Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Географический факультет

А.В. Хорошев

ПОЛИМАСШТАБНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ЛАНДШАФТА

Товарищество научных изданий КМК
Москва ❖ 2016

УДК 911.52
ББК 26.82
Х82

Хорошев А.В. Полимасштабная организация географического ландшафта. Москва: Товарищество научных изданий КМК. 2016. 416 с., ил.
В монографии демонстрируется методология полимасштабного анализа структуры географического ландшафта. Пространственная мозаика ландшафта рассматривается как реализация его полиструктурной организации. Природные территориальные комплексы рассматриваются как результат эмерджентных эффектов пространственных взаимодействий. Межкомпонентные связи в ландшафте рассматриваются как реализация разномасштабных процессов. Свойства каждого компонента интерпретируются не только как результат взаимодействия с другими компонентами, но и как проявление эмерджентного эффекта, возникающего в геосистеме более высокого ранга. Полимасштабный анализ предусматривает для природных территориальных комплексов разделение вкладов детерминированной составляющей, связанной с влиянием разнотипных геосистем более высокого ранга, и составляющей саморазвития. Метод выявления иерархических уровней геосистем основан на математико-статистических моделях межкомпонентных отношений. Обоснованы информативные признаки для ландшафтного картографирования геосистем разных иерархических уровней. Демонстрируется индуктивный способ идентификации и картографирования мозаичных геосистем с единым фактором дифференциации Выявлены межрегиональная общность, региональная специфика и локальные условия реализации типов межкомпонентных отношений в среднетаежных, южнотаежных, смешаннолесных и степных ландшафтах. Выявлены особенности межкомпонентных отношений на разных сукцессионных стадиях. Демонстрируется технология экстраполяции информации о наиболее вероятных состояниях компонентов ландшафта на основе знания об иерархических уровнях проявления межкомпонентных отношений. Предложен вероятностный подход к решению проблемы объективности ландшафтных границ. Показаны методические подходы для учета полимасштабной организации ландшафта в ландшафтно-планировочных решениях.
Книга адресована специалистам в области ландшафтоведения, физической географии, экологии, территориального планирования.

Khoroshev A.V. Multiple organization of geographical landscape. Moscow: KMK Scientific Press. 2016. 416 p., il.
The book describes the theory and methodology for multiscale analysis of landscape structure. The procedure is performed on the example of forest and steppe landscapes in European Russia.

Печатается по решению Ученого совета географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Рецензенты:
В.В. Сысуев, доктор географических наук
А.С. Викторов, доктор географических наук

© А.В. Хорошев, текст, иллюстрации, 2016
© Товарищество научных изданий КМК, издание, 2016

ISBN 978-5-9907838-1-2

Содержание

ВВЕДЕНИЕ 5

Глава 1. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ В КОНТЕКСТЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ НАУКИ О ЛАНДШАФТЕ 9
1.1. Трактовки понятия «ландшафт» и основные тенденции развития науки о ландшафте 9
1.2. Актуальные проблемы современного ландшафтоведения 17
1.3. Актуальные вопросы структурного направления ландшафтоведения 27
1.4. Подходы к исследованию межкомпонентных связей 35
1.5. Подходы к исследованию иерархической и полимасштабной организации ландшафта 41

Глава 2. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ ПОЛИМАСШТАБНОГО АНАЛИЗА ЛАНДШАФТНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ 57
2.1. Причины пространственной вариабельности 57
2.2. Эмерджентные эффекты пространственной структуры геосистем 60
2.3. Операционная территориальная единица, вмещающие геосистемы и выбор масштаба 62
2.4. Вертикальная (компонентная) структура ландшафта и задача снижения размерности данных 67
2.5. Способы и проблемы интерпретации межкомпонентных связей 71
2.6. Характерное пространство межкомпонентных отношений 79
2.7. Проблема разделения вкладов факторов 81
2.8. Синергетические эффекты внутриуровенного взаимодействия независимых парциальных ландшафтных структур 84
2.9. Резонансное пространство межуровневых связей 87
2.10. Устойчивые ядра и переходные зоны: синтез дискретного и континуального представления геосистем 97
2.11. Межкомпонентные связи и устойчивость ландшафта 105
2.12. Место предлагаемой методологии среди подходов к объективизации выделения геосистем 109

Глава 3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ 112
3.1. Описание полигонов исследования 112
3.1.1. Среднетаежный полигон: Архангельская область, бассейн р. Заячья 114
3.1.2. Среднетаежный полигон: Ханты-Мансийский автономный округ, террасы р. Обь 130
3.1.3. Южнотаежный полигон: Костромская область, Кологривский район, бассейн р. Унжа 135

3.1.4. Хвойно-широколиственнолесной полигон: республика Удмуртия, бассейны р. Казанка и р. Вала ... 139
3.1.5. Хвойно-широколиственнолесной полигон: Калининградская область, Куршская коса ... 142
3.1.6. Степной полигон: Оренбургская область, Айтуарская степь, бассейн р. Урал ... 144
3.2. Методы ... 159
3.2.1. Полевые описания ... 159
3.2.2. Подготовка полевых данных и цифровых моделей рельефа к анализу ... 160
3.2.3. Количественные методы анализа межкомпонентных связей ... 163
3.2.4. Предметные и региональные ограничения методологии ... 177

Глава 4. ПОЛИМАСШТАБНЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ЛАНДШАФТА ... 180
4.1. Интерпретация физического смысла осей дифференциации свойств компонентов и ранжирование экологических факторов ... 180
4.2. Межрегиональный анализ внутриуровенной вертикальной структуры ... 193
4.3. Зависимость внутриуровенных межкомпонентных связей от уровня ландшафтного разнообразия ... 212
4.4. Межуровневые связи как индикатор полимасштабности ландшафтной организации ... 226
4.4.1. Подчиненность разных свойств ПТК разномасштабным процессам ... 230
4.4.2. Подчиненность свойства ПТК процессам, происходящим на нескольких вышестоящих уровнях пространственной организации ... 246
4.4.3. Различие характера межкомпонентных связей и стоящих за ними процессов во вложенных и вмещающих ПТК ... 248
4.5. Разделение вкладов внутриуровенных и межуровневых связей в варьирование свойств компонентов ... 264
4.6. Пространственные рамки действия межкомпонентных связей ... 283
4.6.1. Выявление ареала действия межуровневых и внутриуровенных связей с использованием ограниченной выборки данных полевых наблюдений ... 285
4.6.2. Выявление ареала действия межуровневых связей с использованием континуальных данных о свойствах растительного покрова и рельефа ... 289
4.7. Временные рамки действия межкомпонентных связей. Варьирование межкомпонентных связей в зависимости от сукцессионной стадии ... 302
4.8. Синтез геосистем на основе иерархии межкомпонентных отношений ... 326
4.8.1. Программа синтеза парциальных геосистем ... 326
4.8.2. Двухуровневая дедуктивная картографическая модель парциальных геосистем ... 330
4.8.3. Многоуровневая индуктивная картографическая модель парциальных геосистем ... 344

Глава 5. ПОЛИМАСШТАБНЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ЛАНДШАФТА В ПРИМЕНЕНИИ К ЛАНДШАФТНОМУ ПЛАНИРОВАНИЮ ... 366

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ... 385

Литература ... 395

Введение

С постановки проблемы изучения связей между компонентами ландшафта началось ландшафтоведение как наука. Слова В.В. Докучаева о «генетической и вековечной связи», изучение которой составляет «лучшую и высшую прелесть естествознания» заложили основу ландшафтоведения как своеобразной науки о системах внутри физической географии. Без изучения связей между компонентами нет ландшафтоведения. В то же время ландшафтоведение — часть географии, которая в XIX века К. Риттером и А. Геттнером была отнесена к группе хорологических (пространственных) наук. Впоследствии точка зрения Риттера и Геттнера многократно критиковалась, нередко с домысливанием за автора и необоснованными выводами о самом процессе мышления автора (типа «это поставило его в тупик», «а отсюда недалеко до проповеди…», «оставил вопрос без ответа», «обошел один из коренных вопросов», «кто тогда наполнял пространство?… ответ мог быть только один: бог «наполнил» и др.). В многом критика со стороны советских исследователей (Исаченко, 1953, 2004; Мильков, 1959; Саушкин, 1976; Гвоздецкий, 1979; Мересте, Ныммик, 1984; Максимов, 1988) была вынужденной, обусловленной доминировавшими философскими установками, которые требовали искать объективную реальность, единственную истину, признавать генетический подход как единственно верный, признавать принципиальное различие законов природы и общества. Доминирование объективистской точки зрения на ландшафты в СССР, по мнению В.А. Бокова (2012), отражало процессы быстро идущего освоения территории страны, в основе которой находилась необходимость картографирования природных систем. Сомнительна правомерность упреков в адрес Геттнера, что мыслитель, живший в своем времени и имевший в распоряжении достигнутый к тому времени уровень знаний, чего-то недопонял, не раскрыл, не дал ответа на поставленные им вопросы, на которые с легкостью отвечает современный исследователь. Тем не менее, именно хорологический пространственный аспект является, выражаясь языком математики, «необходимым», хотя и не всегда «достаточным» условием географичности исследования. Теперь можно уточнить, что ландшафтоведение, в самом первом (нарочито примитивном) приближении, — наука о том, как и почему различаются связи между компонентами природы на земной поверхности. Особенно важна мысль Геттнера о том, что существуют причинные зависимости «между различными точками на Земле», «ни одно явление на земной поверхности не должно мыслиться само по себе, оно становится понятным только путем установления его положения относительно других частей Земли» (Геттнер, 1930). Сходную мысль сформулировал Э. Нееф (1974), поясняя свое «положение о географическом континууме»: ни один участок земной поверхности нельзя познать с истинно научной точностью, если пренебрегать его взаимосвязью с соседними или удаленными территориями (с. 32).

Развитие хорологического аспекта географических исследований шло несколько различными путями в русскоязычной науке о ландшафте и англоязычной (имеется в виду территория, где в качестве международного научного языка используется анг-

лийский и поэтому обмен идеями в постоянном режиме создавал единое пространство осведомленности). В русскоязычном мире в XX веке пространственный анализ развивался слабо, в основном в виде районирования и картографирования (Голубчик и др., 2005; Богучарсков, 2006). В фундаментальных ландшафтных исследованиях приоритет отдавался изучению «вертикальных» связей (Максимов, 1988) с основной идеей — понять, как каждый компонент ландшафта реагирует на изменения другого компонента. Пространственный аспект исследования был реализован, главным образом, в концепциях ландшафтного картографирования, прежде всего, на основе признания детерминирующей роли морфолитогенной основы. Эффекты, возникающие как эмерджентный эффект пространственных взаимодействий между морфологическими частями ландшафта, в большей степени были предметом геохимии ландшафта, лесоведения, гидрологии, биогеографии.

В англоязычной науке о ландшафте хорологический аспект стал преобладающим в связи с развитием ландшафтной экологии, первоначально в рамках классической экологии (Forman, Godron, 1986; Хорошев и др., 2006; Хорошев, 2013а). Был разработан большой арсенал методов исследования влияния пространственных конфигураций, сочетаний пространственных элементов на состояние компонентов ландшафта, особенно биоты (McGarigal, Marks, 1995).

На неоправданно малое внимание к хорологическому аспекту со стороны русскоязычного ландшафтоведения в последние годы стало обращаться повышенное внимание как внутри сообщества ландшафтоведов, так и со стороны заинтересованных представителей смежных географических наук, которые с этим недостатком связывают свое критическое отношение к теоретическому и методологическому уровню развития ландшафтоведения (Ковалев, 2009; Ласточкин, 2011). В целом приходится констатировать заметное снижение интенсивности разработки теории ландшафтоведения на рубеже веков по сравнению с 1950–1970-ми гг. (Структура…, 1997; Ландшафтоведение…, 2006), хотя растет спрос на новые теоретические разработки с учетом современных тенденций развития географии.

В данной работе автор, исходя из тех очевидных положений, что ландшафтоведение — наука о связях, а география в целом — наука о пространственных различиях, делает попытку представить:

- ✓ ландшафтную мозаику как реализацию полиструктурности ландшафта;
- ✓ природные территориальные комплексы как результат эмерджентных эффектов пространственных взаимодействий;
- ✓ межкомпонентные связи в географическом ландшафте как реализацию разномасштабных процессов.

Основная цель работы — разработать методологию полимасштабного анализа структуры ландшафта для разделения вкладов геосистем разных иерархических уровней в пространственное варьирование свойств компонентов.

В работе поставлены следующие задачи:

1. Дать обзор ключевых современных проблем науки о ландшафте и ее структурного направления.
2. Разработать метод выявления иерархических уровней геосистем на основе информации о межкомпонентных отношениях.

3. Определить межрегиональную общность и региональную специфику межкомпонентных отношений в ландшафте.
4. Оценить влияние ландшафтного разнообразия территории на результаты количественной оценки тесноты межкомпонентных связей.
5. Выявить основания для определения информативных признаков ландшафтного картографирования для разных иерархических уровней организации геосистем.
6. Дать сравнительную оценку вкладов детерминированной составляющей, связанной с принадлежностью к геосистеме более высокого ранга, и составляющей саморазвития (внутриуровенных и межуровневых взаимодействий).
7. Установить локальные условия (пространственные рамки) реализации разных типов отношений.
8. Выявить специфику структуры межкомпонентных отношений на разных стадиях эволюции и динамики ландшафта.
9. Создать технологию экстраполяции информации о наиболее вероятных состояниях компонентов ландшафта на основе знания об иерархических уровнях проявления межкомпонентных отношений.
10. Предложить методические подходы для учета полимасштабной организации ландшафта в ландшафтно-планировочных решениях.

Предлагаемая работа подытоживает результаты многолетних исследований, выполненных в лесных и степных регионах при финансовой поддержке проектов Российского фонда фундаментальных исследований №№ 01-05-64822, 05-05-64335, 08-05-00441, 11-05-00954, 14-05-00170, реализованных под руководством автора, а также проекта № 13-05-00821. Сбор и обработка полевого материала на ранних этапах исследований проведен в рамках проектов РФФИ № № 96-05-65495, 96-05-65730, 99-05-65097, 99-05-65069, в которых автор был одним из исполнителей. В сбор и обработку полевых данных в разных регионах большой вклад внесли сотрудники, аспиранты и студенты географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова: А.А. Прозоров, К.А. Мерекалова, А.П. Столповский, И.П. Котлов, Ю.Н. Бочкарев, Ю.Н.Бондарь, А.П.Безделова, А.С. Кощеева, О.А. Артемова, В.М. Матасов, Н.М. Беляева, Е.О. Брусиловская, Р.И. Беккиев, А.П. Еремеева, М.В. Кончиц, С.А. Садков, Г.М. Леонова, У.К. Байгабулова, К.А. Ткач. На формирование научных взглядов автора большое влияние оказали многолетнее общение и сотрудничество с И.А. Авессаломовой и Ю.Г. Пузаченко. Автор в течение многих лет сотрудничал с Г.М. Алещенко, работы и консультации которого сделали возможными большинство расчетных процедур, рассматриваемых в книге. Большую помощь в организации и проведении химико-аналитических исследований оказали М.А. Хрусталева, Д.В. Ладонин. В течение всех этапов работы автору неизменную поддержку оказывал заведующий кафедрой физической географии и ландшафтоведения географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова член-корреспондент РАН К.Н. Дьяконов. Многолетние исследования в Архангельской области проводились при неизменном содействии Л.Г. Емельяновой; автор многократно пользовался консультациями и помощью И.А. Горбуновой, И.П. Гавриловой, Н.Б. Леоновой, С.Г. Покровского, А.И. Белякова. Исследования в Костромской области были бы невозможны без содействия, товарищеской помощи и консультаций сотрудников Международного института леса, заповедника «Кологривский лес» и Костромского государственного университета имени Н.А. Некрасова: М.Г. Синицына (первый директор

заповедника «Кологривский лес»), А.В. Немчиновой, В.О. Авданина, А.А. Васечкина, В.Н. Смирнова, И.С. Маховой, П.В. Чернявина, Е.В. Терентьевой, И.Н. Петухова, Н.В. Ивановой. Полевые исследования в Ханты-Мансийской автономном округе были организованы при содействии сотрудников Тюменского государственного университета Д.М. Марьинских, А.В. Соромотина, Е.В. Мерзлякова. Работы в Оренбургском заповеднике проводились при неизменной помощи А.И. Пуляева, В.Ф. Шпанагеля, В.В. Шпанагеля, А.В. Каширского, А.Ж. Дускеева, М.К. Касымова, О.В.Сорока. Во время работы в национальном парке «Куршская коса» содействие оказали О.В. Рыльков, И.П. Жуковская, И.Ю. Губарева. Всем перечисленным коллегам автор выражает глубокую благодарность.

Глава 1

Задачи исследования в контексте современного развития науки о ландшафте

1.1. Трактовки понятия «ландшафт» и основные тенденции развития науки о ландшафте

В современной науке различаются, как минимум, шесть трактовок понятия «ландшафт», представляющих интерес для географии.

1. Ландшафт как природный комплекс с определенными границами, с присущей ему горизонтальной (пространственной) и вертикальной (компонентной) структурой. Это с 1940-х гг. наиболее привычное и общепринятое для русскоязычной физической географии представление. Оно реализовано в трудах московской, петербургской, иркутской, львовской, тбилисской и других школ ландшафтоведения и зафиксировано в энциклопедиях, словарях, учебниках, ГОСТе. В Центральной Европе ландшафт до 1960-х гг. был эксклюзивной сферой исследования географии, которая к тому времени (Demek, 2000) практически перестала им заниматься, что стимулировало развитие отдельной холистической науки об отношениях человека и природы. Ландшафтная экология в Центральной Европе стала выводиться за рамки как экологии, так и географии на том основании, что эта наука не «о» каком-либо объекте (так как ландшафт изучается с разных позиций множеством наук), не направленная на классический поиск информации, а наука с чёткой целевой ориентацией, наука «для» – для разработки методологии и способов охраны природной среды и ландшафтного планирования (Mikloš, 1996).

2. Ландшафт как идея связи явлений на географической земной поверхности с единой структурой и динамикой, не являющийся объектом, замкнутым в некоторых границах. Это представление отстаивал Э.Нееф (1974).

3. Ландшафт как пейзаж, прежде всего как видимое сочетание форм рельефа, угодий, водных объектов. Это представление, с одной стороны, обиходное, с другой — широко используемое и предусмотренное нормативной базой в архитектуре, дизайне, городском планировании, курортном планировании, лесном планировании.

4. Ландшафт как пространственная структура, порожденная процессами. В ландшафтной экологии в ее американском варианте (Forman, Godron, 1986) это представление возникло как реакция на недостаточный учет пространственного фактора в классической экологии. В образном сравнении ландшафтная экология возникла как «союз» биологии и географии (Moss, 1999), который первоначально подразумевал применение географических методов (прежде всего — пространственного анализа) к биологическим объектам (в основном популяциям). Предлагалось переосмыслить эти подходы в связи с резко возросшей потребностью экологии и биологии в привлечении пространственного измерения и развитием исследований на уровнях пространственной органи-

зации, сопоставимых с принятием решений в природопользовании, а не только в обычном для классической экологии локальном масштабе. Структура (pattern) понимается, прежде всего, как сочетание взаимодействующих пространственных элементов с их площадью, конфигурацией, ориентацией, соседством, связностью или фрагментированностью. Структура — результат и индикатор радиальных и латеральных процессов. Эта трактовка оказалась особенно продуктивна для сильнотрансформированных антропогенной деятельностью регионов, где зональный ландшафт сохранился в виде немногочисленных «островов». Неслучайно, на первоначальном этапе основой развития этой концепции была теория островной биогеографии Р. МакАртура и Э. Уилсона (MacArthur, Wilson, 1967), а прикладное значение сначала было реализовано при проектировании экологических сетей (ecological networks).

5. Ландшафт как территория под воздействием человека. Показателен специальный комментарий, который дает Ф. Ндубиси — автор одной из самых цитируемых монографий по истории концепций ландшафтного (экологического) планирования. Хотя «экологическое планирование» и «ландшафтное планирование» — одно и то же, он предпочитает для названия книги термин «экологическое планирование» для того чтобы подчеркнуть значимость взаимоотношений (то есть именно для того сюжета, для которого в русскоязычном мире применяется термин «ландшафт»), в то время как ландшафт — это природно-культурная целостность определенного масштаба (Ndubisi, 2002). В работе под названием «Ландшафтный подход для устойчивого развития» автор объясняет применение термина ландшафт и оговаривает пять ключевых аспектов, которые отличают ландшафтный подход: 1) географическая территория, 2) взаимодействие между землепользователями, 3) приверженность идее устойчивого развития, 4) продуцирование знания, 5) обмен знаниями и опытом (Axelsson, 2009). Иными словами термин «ландшафт» применяется для обозначения активной роли землепользователей в ландшафте, которые им пользуются и который они согласованно преобразуют.

6. Ландшафт как территория, воспринимаемая людьми как результат взаимодействия природных и/или антропогенных факторов (Granő, 1923; Европейская ландшафтная конвенция: Landscape convention, 2000; Ковалев, 2009).

В данной работе автор пользуется первой, второй и четвертой трактовками ландшафта как наиболее близкими к хорологической сути географии. Первая (региональная) трактовка употребляется при описании ландшафтной структуры полигонов исследования и описании ландшафтных карт, выполненных в идеологии концепции морфологической структуры ландшафта. В остальных случаях термин *«ландшафт»* применяется для обозначения общей идеи взаимосвязи компонентов и пространственных единиц на некоторой территории, внутри которой предолагается и проверяется наличие разномасштабных геосистем. Термин *«геосистема»* используется для обозначения территории с единым видом межкомпонентных связей и единым способом зависимости от геосистемы вышестоящего ранга, что индицирует наличие системообразующего процесса или явления. Выявление размеров, конфигураций и сущностных характеристик геосистем — одна из ключевых идей работы. Термин *«ПТК (природно-территориальный комплекс)»* употребляется, когда речь идет о конкретных геосистемах с известными границами и известным положением в иерархии морфологических единиц географического ландшафта в региональном понимании (по Н.А. Солнцеву, 1948). Термин *«пространственный элемент»* употребляется для обозначения частей

ландшафта, составляющих его пространственную структуру, безотносительно их иерархического ранга. Термин *«ландшафтная структура»* применяется в традиционном двояком смысле: как совокупность взаимодействующих компонентов (вертикальная, или компонентная структура) и пространственных элементов (горизонтальная, или пространственная структура). В обоих смыслах речь идет о трехмерном образе ландшафта. Термин *«ландшафтный покров»* применяется в тех случаях, когда необходимо обозначить совокупность пространственных элементов ландшафта, визуально легко различимых по космическому снимку как мозаика типов растительности и/или хозяйственных угодий, т. е. как двухмерный образ ландшафта.

Работу над темой стимулировали современные тенденции в развитии ландшафтоведения и ландшафтной экологии.

1. Утверждение **системного понимания** ландшафта (Сочава, 1978; Forman, Godron, 1986). Оно реализуется в применении к ландшафту системной триады «элемент, связь между элементами, новое эмерджентное качество в результате связи», которую в последнее время расширяют (Ласточкин, 2011) до «квадриги», добавляя еще один обязательный аспект: фукциональная роль в надсистеме. Согласно теории иерархии, ландшафт может быть описан как сложное образование, состоящее из триады смежных иерархических уровней организации. Объект исследования представлен на Уровне «0» (фокальном) как компонент верхнего уровня (Уровня «+1»). Уровень «0», в свою очередь, состоит из компонентов, формирующих нижний уровень (Уровень «–1»). Динамика верхнего уровня генерируется процесссами Уровня «0» и определяется как результат всех возможных состояний процессов на этом уровне. С другой стороны, компоненты Уровня «-1» могут быть использованы для объяснения механизмов функционирования на Уровне «0». Таким образом, эта теория дает возможность последовательного научного объяснения отношений между системным объектом, «подсистемой» и «надсистемой» (O'Neill, 1988; Николаев, 2006б): Ландшафт как системное единство проявляется во взаимодействии с другими окружающими его системами. Свойства ПТК интерпретируются как результат не только межкомпонентных взаимодействий на соответствующем участке пространства, но и влияния смежных ПТК и рамочных условий со стороны геосистемы более высокого иерархического уровня.

2. Возрождение и развитие **хорологических подходов**. Представления о самостоятельном значении размеров, конфигурации, ориентации, соседства, удаленных эффектов взаимовлияния элементов ландшафта привлекали довольно мало внимания в отечественном ландшафтоведении. Это вызывает недоумение, поскольку именно изучение пространственных отношений является сутью географии (Максимов, 1988; Трофимов и др., 1993; Ковалев, 2009; Ласточкин, 2011). В последние десятилетия интерес к пространственной структуре ландшафта как таковой и как индикатору ландшафтоформирующих процессов в русскоязычной литературе возрождается благодаря доступности дистанционных материалов и компьютерных способов их обработки (Викторов, 1986, 2006; Пузаченко и др., 2002). В англоязычной ландшафтной экологии, особенно в ее американском варианте, напротив, исследование пространственных отношений между элементами ландшафта, а точнее вопросов «как процессы формируют пространственную структуру и отражаются в ней» и «как пространственная структура влияет на процессы», обозначено как основной вопрос ландшафтной экологии (Forman, Godron, 1986; Forman, 2006; Pickett, Cadenasso, 1995; Moss, 1999; Farina, 1998;

Turner et al., 2001; Wu, Hobbs, 2007). Современная тенденция к описанию и прогнозированию процессов через пространственные структуры противоположна и дополнительна к традиции ландшафтоведения изучать процессы как факторы формирования пространственной структуры («факторы дифференциации»). В то же время англоязычные исследователи призывают перенести внимание с пространственной организации как таковой, что было приоритетом ландшафтной экологии в 1990-е гг. (Forman, 2006), на экологические процессы и их определяющую роль в возникновении пространственных структур (Wu, Hobbs, 2002). В этом смысле русскоязычное ландшафтоведение и англоязычная ландшафтная экология изначально заходили с разных сторон к исследованию связки «процесс-структура» и ныне сближаются по подходам.

3. Признание **полиструктурности** географического пространства и необходимости применения разных способов его описания в зависимости от целей исследования. В рамках этого концепции, впервые высказанной К.Г. Раманом (1972), ландшафт представляется как суперпозиция относительно независимых пространственных структур, причем традиционное подразделение по свойствам морфолитогенной основы рассматривается как частный случай. По мнению И.Г. Черванева, В.А. Бокова и И.Е. Тимченко (2004), геосистемы проявляются не столько как целостные системы, сколько как статистические ансамбли состояний комплексной гетерогенной природы. В.Н. Солнцев (1997) считает, что необходимо различать геостационарные, геоциркуляционные и биоциркуляционные структуры. Э.Г. Коломыц (1998) выделяет ячеистые, изопотенциальные, секторные и бассейновые структуры. М.Д. Гродзиньский (2005) считает, что в сферу интересов ландшафтоведения входят конфигурации генетико-морфологические, позиционно-динамические, парагенетические (Мильков, 1990), бассейновые и биоцентрично-сетевые. Ряд исследователей считает конструктивным выделение парциальных геокомплексов (Haase, 1964; Сочава, 1978; Solon, 1999) — взаимосвязанных комбинаций свойств компонентов, сосуществующих в одном пространстве. Концепция полигеосистемного анализа и синтеза, разработанная в сибирской школе ландшафтоведения, выступает как совокупность средств и методов проективного расслоения сложного географического объекта на множество возможных системных представлений (интерпретаций) через отображение его свойств (или качеств) в разных предметных областях с установлением структуры отношений между этими свойствами (Михеев, 1990; Черкашин, 1985). В.С. Михеев (1987) считал, что необходимо перейти от представления о ландшафте как о системе компонентов к его видению как системы систем различного качества, что составляет суть полигеосистемного подхода. А.К. Черкашин рассматривает ландшафт с позиций теории расслоения ка полисистему, состоящую из множества непересекающихся моносистем (Ландшафтно-интерпретационное картографирование, 2005). Процессы и явления, которые формируют эти относительно независимые структуры, имеют разные характерные временные и пространственные масштабы, в силу чего могут не взаимодействовать, а накладываться или находиться в отношениях подчинения. В то же время есть взгляд, что представление о взаимонезависимых структурах нарушает принцип всеобщей взаимосвязанности природных компонентов и не согласуется с концепцией эмерджентных свойств ландшафта (Мамай, 1999, 2008; А.Г. Исаченко, 2006; Николаев, 2006а).

4. Развитие представления о несовпадающих **характерных временах** процессов, влияющих на развитие компонентов ландшафта (Арманд, Таргульян, 1974). В связи с этим представлением накладываются ограничения на принцип всеобщей взаимо-

связанности взаимообусловленности свойств компонентов. Взаимодействовать могут только те процессы, у которых близки характерные временные и пространственные масштабы (Delcourt, 1983; Shugart, 1984, 1999; Пузаченко, 1986). Наличие каким-либо образом определенной корреляции между свойствами ландшафта может указывать (но необязательно указывает!) на близость характерных времени, на возможность (но необязательность!) взаимодействия. Отсутствие корреляции с большей уверенностью трактуется как отсутствие взаимодействия в выбранном масштабе исследования.

5. Рост интереса к **полимасштабности** ландшафтоформирующих процессов. У этого важного аспекта ландшафтных исследований есть серьезная прикладная мотивация, а именно — осознание несоответствия между глобальным масштабом изменений природной среды, региональным масштабом принятия решений в области природопользования и локальным и даже точечным масштабом сбора данных о структуре и функционировании ландшафтов (Wu, David, 2002; Максимов, 1988). В связи с эти возникает актуальнейшая проблема трансляции информации между масштабами исследования (Turner et al., 2001; King, 1991; O'Neill, 1988; Wu, Jelinski et al., 2000), определения характерных пространств ландшафтных процессов, масштабов восприятия человеком процессов. Масштаб интерпретируется как пространственная и временная параметризация окна восприятия реальности (Burnett, Blaschke, 2003). В связи с необходимостью выбора оптимального масштаба для описания того или иного вида реальности сформулирована актуальная для ландшафтной экологии проблема меняющейся пространственной единицы (MAUP — Modifiable Areal Unit Problem) (Openshaw, 1977). Ее суть состоит в зависимости результатов оценок межкомпонентных связей от количества наблюдений, территориального охвата, размера выбранной операционной единицы. В основе представления о полимасштабности лежит идея о том, что каждое свойство ландшафта отражает результат наложения процессов, действующих на разных иерархических уровнях. Ограничения с высшего уровня реализуются как константы, рамочные условия, в то время как кратковременная динамика на низших уровнях фильтруется, сглаживается и проявляется как средние равновесные значения (O'Neill, 1988; Пащенко, 1993; Wu, David, 2002; Cushman, McGarigal, 2002; Burnett, Blaschke, 2003; Bailey, 2005; Chang et al., 2006; Боков, 2012). Относительные вклады ограничений с высшего уровня и движущих сил низшего уровня — ключ к пониманию сложных систем (Wu, David, 2002).

6. Внедрение **новых концепций** в науку о ландшафте: сложных адаптивных систем, самоорганизованной критичности (Bak, Chen, 1991), иерархической патч-динамики (Wu, David, 2002; Burnett, Blaschke, 2003). В современной экологии наблюдается переход от детерминистских равновесных моделей к представлению об экосистемах как сложных адаптивных системах (Moore et al., 2009; Naveh, 2010). Система считается сложной, когда есть разнообразие пространственных структур и процессов, нелинейные взаимодействия компонентов и пространственная гетерогенность (Waldrop, 1992). Гетерогенность, нелинейность, иерархическая организация и потоки являются ключевыми элементами сложных адаптивных систем, которые позволяют происходить самоорганизации.

7. Стремление к **формализации способов выделения** геосистем математическими средствами. При растущем применении ландшафтных карт на практике и даже включении их в перечни обязательных или желательных картографических материалов хозяйственных проектов, тем не менее, среди географов существует неудовлетворен-

ность методами и результатами ландшафтного картографирования. Это обусловлено, прежде всего, отсутствием единых критериев и несовпадением результатов разных исследователей для одной территории, что отмечается достаточно давно и с неослабевающей интенсивностью (Д.Л. Арманд, 1975; А.Д. Арманд, 1988; Гродзинський, 2005; Ласточкин, 2011; Боков, 2012; Колбовский, 2013). Отмечается, что ландшафтоведение, несмотря на почти общепринятый генетический подход к картографированию, так и не достигло единообразия в подходах к разграничению своих объектов. В то время как в отечественной школе ландшафтоведения роль рельефа в ландшафтной дифференциации всегда была на первом плане и даже переоценивалась, в англоязычной ландшафтно-экологической литературе роли рельефа до сих по уделяется недостаточное внимание в силу преобладания двухмерного мышления матричной модели Р. Формана (Forman, 2006). Особенно недооценена дифференцирующая роль рельефа и горных пород по отношению не к отдельным компонентам ландшафта и биоразнообразия, а к целостной экосистеме и абиотическим процессам в ней (Dorner et al., 2002; Hoechstetter et al., 2008). В русскоязычном ландшафтоведении рельеф, наряду с геологическим строением, всегда рассматривался как важнейший фактор обособления природных систем. С приходом компьютерных технологий и ростом доступности дистанционных материалов и цифровых моделей рельефа в науках о Земле обозначилась тенденция к описанию объективно существующих морфологических элементов рельефа, ритмов рельефа, его иерархической организации, рисунков посредством разнообразных морфометрических характеристик, из которых главное значение придается уклонам, кривизнам, характеристикам расчлененности (Krcho, 1973; Пузаченко и др., 1997, 2002; Minar, Evans, 2008; Сысуев, 2003б; Степанов, 2003; Ласточкин, 2011).

8. Продолжение дискуссии о соотношении **континуальных и дискретных** свойств географического пространства. Русскоязычная школа ландшафтоведения, развивавшаяся в условиях социального запроса на исследование природно-ресурсного потенциала малоизученной огромной страны и большой потребности в физико-географическом и других видах районирования, изначально стремилась отыскать в природе однозначно выделяемую объективную реальность, чего жестко требовала и доминирующая философская парадигма. Как результат был разработан способ выделения ландшафтов и их морфологических единиц в основном по свойствам морфолитогенной основы с опорой на знание о ее генезисе. Исследователи раннего этапа развития ландшафтоведения пришли к убежденности в существовании однозначно выделяемых дискретных границ, к которым жестко адаптируются биокосные и биотические компоненты ландшафта (Видина, 1962). Эта идея быстро оказалась востребована и практикой. Современные исследователи отмечают недостаточность дискретного подхода к выделению ландшафтных комплексов. От глаз наблюдателя в этом случае скрывается большой класс физико-географических объектов, каковыми являются ландшафтные границы — зоны переходов между различными ландшафтными комплексами (Бобра, 2005). Удар по дискретным представлениям, по мнению Г.А. Исаченко (1997), нанесло изучение функционирования и динамики ландшафтов на стационарах, в результате чего были сформулированы принцип полиструктурности, представление о разночастотности элементов и компонентов ландшафта, а также внедрены представления о нечетких стохастических связях между компонентами. Следствием оказалось признание континуальности если не как альтернативы, то как важного дополнения к дискретным представлениям. Потоки вещества способны сделать даже исходно дискретные границы расплывчатыми. Не-

которые потоки, например, водные, могут реагировать на дискретную геоморфологическую границу на некотором расстоянии до нее, вызывая постепенное изменение в пространстве свойств и других компонентов. На развитие англоязычной ландшафтной экологии, с одной стороны, оказывает влияние специфика сильнонарушенных пространств лесной зоны Европы и Северной Америки, где происходит «антропогенная дискретизация» пространства. В идеологии «матричной концепции» она проявляется в обособлении структурных элементов ландшафта (Forman, Godron, 1986): а) «матрицы» («matrix») из освоенных безлесных пространств, б) «пятен» («patch») сохранившихся лесных массивов с четкими антропогенными границами, в) сохраняющиеся или воссоздаваемые связующих «коридоров» («corridor»). Бурное развитие пространственных метрик (McGarigal, Marks, 1995) стимулирует, с одной стороны, развитие дискретного представления. С другой стороны, под влиянием континуалистских представлений фитоценологии и почвоведения активно развиваются градиентные и вероятностные подходы. Идея о континуальных переходах между элементами пространства и частичного пересечения диапазонов свойств между классами развивается на основе теории нечетких множеств и вероятностных подходов. Ясно, что и дискретность, и континуальность имеют место в ландшафте, дополняют друг друга. Поиск методов разделения этих составляющих ландшафтной дифференциации — одна из актуальнейших задач современного ландшафтоведения и ландшафтной экологии.

9. Формирование представлений о существенном вкладе **нелинейных взаимодействий** в ландшафте, возможности бифуркаций развития, множественности устойчивых состояний, самоусилении и самоингибировании ландшафтных процессов, синергетических эффектах. Нелинейная динамика в пространственно гетерогенных системах и ее проявления — эмерджентные свойства, фазовые переходы, наличие критических порогов — рассматриваются в числе 10 наиболее актуальных в начале XXI столетия тем исследования ландшафтной экологии (O'Neill et al., 1986; Wu, Hobbs, 2002; Naveh, 2000; Turner et al., 2001; Hall et al., 2004). Для нелинейных систем важной задачей считается выявление критических масштабов, которые позволяют описать динамику системы в целом; причем считается, что в нелинейном мире процессы обязательно меняются при переходе от одного масштаба к другому (Haila, 2002, Chang et al., 2006).

10. Предположение о **самоподобии**, масштабной инвариантности некоторых (или многих) процессов и пространственных структур в ландшафте. Обозначена проблема выявления диапазона масштабов, в котором проявляется самоподобие и, соответственно, возможна экстраполяция информации между масштабами (Meentemeyer, 1989, Culinnan et al., 1997). Разрабатываются методы автоматического выделения пространственных структур в характерном для них масштабе на основании не волевого решения исследователя о пороговых значениях, а объективного выявления порогов по скачкам дисперсии в континууме (лестнице) масштабов (Wu, Loucks, 1995; Hall et al., 2004; Couteron et al., 2006; Zurlini et al., 2007).

11. Расширение **арсенала многомерных методов** исследования межкомпонентных связей. Помимо традиционных регрессионных и корреляционных методов все большее применение получают методы факторного анализа, многомерного шкалирования, нейронных сетей, клеточного автомата. Одной из главных трудностей комплексного исследования ландшафта является огромное количество показателей, посредством которых он описывается и высокая трудоемкость анализа данных. Многие свойства находятся в определенных отношениях, которые могут быть выражены через корре-

ляционные связи. Поэтому именно появление возможности применения многомерных методов с помощью компьютерных технологий позволило снизить «размерность» ландшафта. Посредством многомерных методов можно выявить главные градиенты среды, меру чувствительности к ним каждого свойства ландшафта, степень согласованности варьирования свойств по отношению к градиенту и положение конкретного участка пространства на оси этого градиента.

12. Осознание недостаточной разработанности методологии исследования **эмерджентных явлений** в ландшафте (Пащенко, 1993; Naveh, 2000, 2001; Петлін, 2005). В рамках нашей работы особенно важны следующие вопросы. Какие свойства ландшафтной единицы обусловлены сочетанием «равноранговых» с ней ландшафтных единиц, составляющих ее окружение и составляющих вместе с ней единицу более высокого ранга? Какие свойства компонентов возникают при совокупном неаддитивном воздействии нескольких факторов, которое выявляется построением нелинейных моделей межкомпонентных связей? К сожалению, в российском ландшафтоведении, за редким исключением (Коломыц, 1998) проблема серьезно почти не рассматривалась, хотя и обозначена в современных учебных пособиях (А.Г. Исаченко, 2004; Николаев, 2006б; Марцинкевич, 2007). В частности в материалах последней ландшафтной конференции в Москве термины «эмерджентность» и «синергетика» почти не встречаются, за исключением статьи В.Н. Петлина (Ландшафтоведение…, 2006). Гораздо большее внимание проблема привлекает в англоязычной (Naveh, 2000, 2001; de Boer, 1999; Hay et al., 2001; Fletcher, 2006) и украиноязычной (Петлін, 2005; Гродзинський, 2005) ландшафтно-экологической литературе, В связи с развитием ландшафтного планирования — одного из самых «географичных» прикладных направлений науки о ландшафте — особенно актуален вопрос о холистических свойствах пространственной структуры (соотношения площадей элементов, форм, конфигураций, ориентации, соседства и т.п.), которые возникают как результат взаимодействия пространственных элементов и определяют эмерджентные свойства микроклимата, стока, миграций животных, биологического разнообразия и т.д. (Николаев, 2011; Дьяконов, Хорошев, 2011).

13. Привлечение моделей межкомпонентных связей для прогноза **регионально-специфичных откликов** на глобальные изменения природной среды. В работах Э.Г. Коломыца и его сотрудников (Коломыц, 2008; Залиханов и др., 2010) арсенал информационных методов исследования связей применен для того чтобы описать возможные варианты поведения ландшафтов и их морфологических частей в условиях современных климатических тенденций.

14. Развитие представлений о **многофункциональности ландшафта**. Ландшафт одновременно выполняет множество экологических, социально-экономических, духовных функций, обладает как материальными, так и нематериальными ценностями, которые влияют друг на друга, могут ограничивать или усиливать значимость ландшафта и его морфологических частей с точки зрения человека (Brandt et al., 2000). Развивается новое для Европы представление о ландшафтной науке (landscape science) как о междисциплинарной области знаний (Antrop, 2000), охватывающей все аспекты ландшафта: не только собственно природные, но и социальные, экономические, исторические и др. В европейской традиции нередко сам термин «ландшафт» трактуется как природная система, обязательно преобразованная и управляемая человеком (Axelsson, 2009). Сформулированы различия между дисциплинарным, междисциплинарным и трансдисциплинарным (с привлечением занитересованных землепользова-

телей к изучению ландшафта и принятию решений) исследованием ландшафта (Tress et al., 2004). Из этих представлений следует постановка задачи выявления ареалов действия разномасштабных процессов, результаты которых, так или иначе, используются при ландшафтном планировании.

15. Признание факта **субъективности**, роли личности исследователя в получаемых результатах, зависимости результатов от формулировки целей (Д.Л. Арманд, 1975). Зависимость результатов районирования и выделения ландшафтов от целей отмечалась еще А. Геттнером (1930). Однако в советский период этот взгляд подвергался резкой идеологизированной критике, и несколько десятилетий прошли в спорах о способах выделения объективно существующих границ (Дронин, 1999). Деятельностный подход определяет, что модель ландшафта строится с заданными требованиями, задаваемыми субъектами деятельности (Боков, 2012).

Теперь перейдем к более подробному анализу современной проблематики науки о ландшафте в целом, ее структурного направления и наиболее важных для целей работы вопросов.

1.2. Актуальные проблемы современного ландшафтоведения

В работах К.Н. Дьяконова (2002, 2008) представлен обзор четырех основных направлений развития современного ландшафтоведения, к числу которых он относит структурно-генетическое, функционально-динамическое, эволюционное и прикладное. Примерно такой же представляется структура современной ландшафтной экологии, хотя и с несколько другим набором акцентов (Forman, 2006). Для того чтобы прояснить место вопросов, решаемых в предлагаемой работе, попробуем, не претендуя на полноту, конкретизировать круг проблем, решаемых наукой о ландшафте в целом (без проведения искусственных границ между русскоязычной и англоязычной традициями), и пересечения проблематики основных направлений. Сделаем необходимую оговорку, что автор не берет на себя смелость подробно анализировать проблематику гуманитарной ветви науки о ландшафте, тем более что этот вопрос подробно освещен в литературе (Калуцков, 2008), а также исследований о ландшафте в других отраслях знания, например — в ландшафтной архитектуре. В отличие от схемы К.Н. Дьяконова, разделим направления исследований функционирования и динамики, а прикладное направление рассмотрим не изолированно, а в сопряжении с отдельными сюжетами четырех направлений исследования — структуры, динамики, функционирования и эволюции (рис. 1).

Для ответа на простой и в то же время сложный вопрос об основном вопросе географии в свое время было предложена идея, что связь между потоками и соответствующими пространственными проявлениями, то есть между структурой, процессами и стадиями развития, может составить сердцевину нового типа синтеза в географии (Харвей, 1974). Это в полной мере относится к ландшафтоведению. Характерно, что именно взаимоотношения «процесс – структура» были обозначены с 1980-х гг. как основной предмет и англоязычной ландшафтной экологии (Forman, Godron, 1986; Picket, Cadenasso, 1995). Геоморфология, начиная с В. Дэвиса, развивалась под влиянием его модели «структура – процесс – стадия» (Тимофеев, 2002). Процессы обмена вещества и энергии, т. е. функционирование, подвержены динамическим (динамика) и направ-

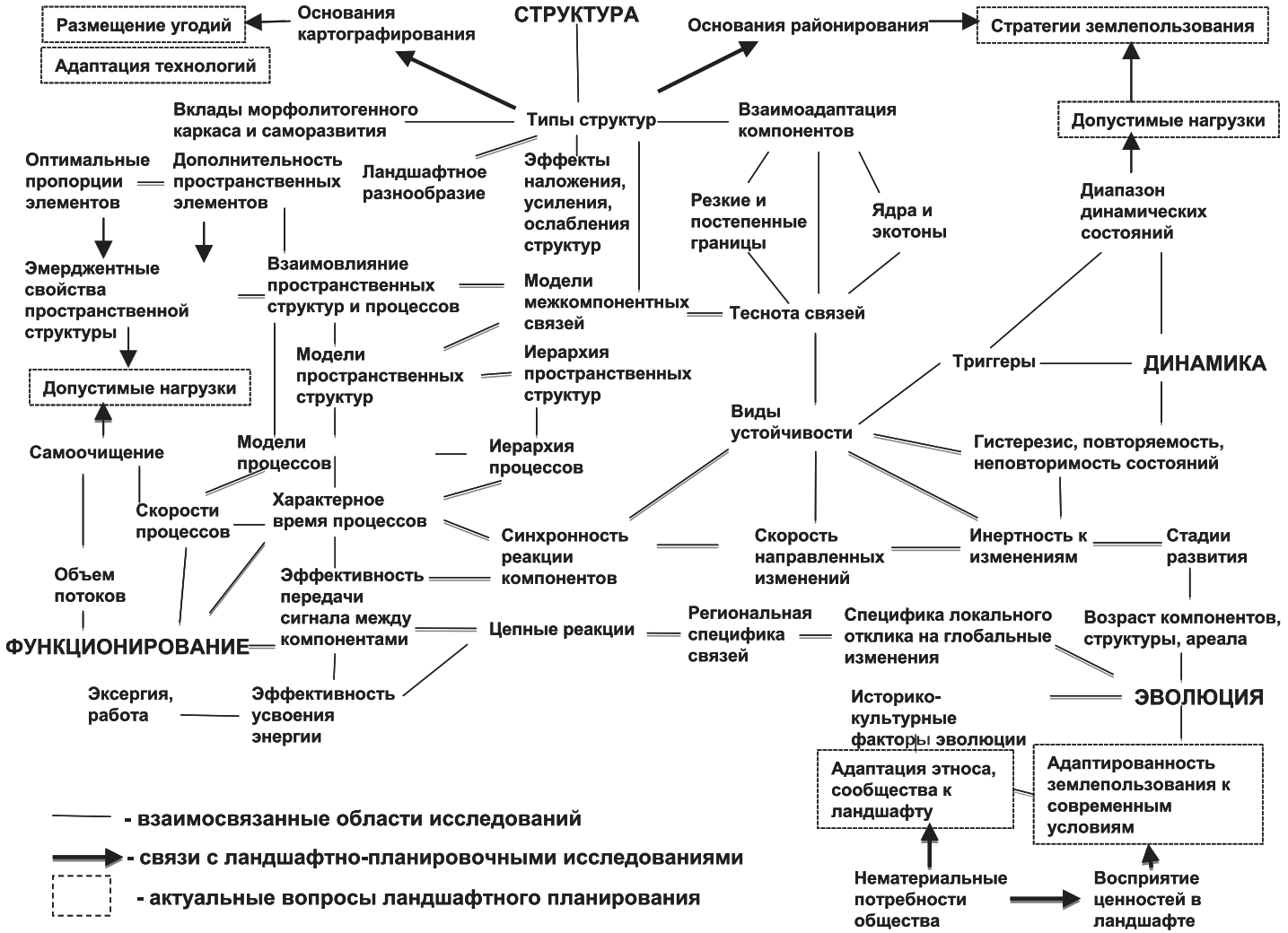

Рис. 1. Проблематика современного ландшафтоведения.

ленным (эволюция) изменениям. Результатом являются развивающиеся пространственные структуры и вертикальная структура ландшафта, которые в ходе развития оказывают обратное влияние на ход процессов. Поэтому автор предпочитает представить круг вопросов науки о ландшафте в виде переплетающихся и образующих «паутину» ветвей сюжетов (выделены курсивом в следующих абзацах), берущих начало от четырех ключевых терминов «структура», «функционирование», «динамика» и «эволюция» (рис. 1). В некоторых узлах этой «паутины» решение фундаментальных проблем дает «плоды» в виде практических рекомендаций для ландшафтного планирования, то есть образует прикладное направление (на схеме показаны стрелками).

Исследования, концентрирующиеся на ***структуре*** ландшафта и образующие структурно-статическое направление моделирования (по А.Г. Топчиеву, 1988), в качестве основного «продукта» производят классификацию типов структур. Если на начальном этапе развития ландшафтоведения структурно-генетический подход представлялся основным и единственно правильным, то на рубеже веков преобладает представление о сосуществовании разных типов структур, или, по М.Д. Гродзинському (2005), конфигураций. Одной из них является «генетико-морфологическая», или «структурно-морфологическая», подробно изученная в работах школ Н.А. Солнцева, А.Г. Исаченко, К.И. Геренчука. Она показана как предпочтительная в некоторых современных учебниках (Міллер и др., 2002; Голованов и др., 2006; Марцинкевич, 2007) и критически анализируется в других (Колбовский, 2006). Идея полиструктурности, разрабатываемая в ландшафтоведении с 1970-х гг. (Раман, 1972; В.Н. Солнцев, 1977, 1981; Коломыц, 1998; Пащенко, 1993), имеет глубокие корни в географии вообще. В качестве одного из положений общей теории организации пространства высказана мысль, что компоненты природной среды испытывают накладывающиеся друг на друга взаимодействия в пределах определенной пространственной сферы, напряженность и качества которой меняются от места к месту (Трофимов и др., 1993). Любой географический комплекс обладает бесконечным множеством «структурных срезов» и может рассматриваться по многим системообразующим отношениям (Топчиев, 1988). Д. Харвей (1974) напоминает, что в споре географического детерминизма и поссибилизма начала XX века у представителей второго направления (преимущественно французских географов — последователей школы П. Видаль де ла Блаша) сформировалась четкая философская позиция. Исследователем французской географии Д. Лукерманом (Luckermann, 1965; цит по: Харвей, 1974): она была сформулирована так: индивидуальные события во всей их широте и многообразии объяснимы только в случайном пересечении взаимонезависимых причинных рядов. Эту идея просматривается в работах А.А. Крауклиса (1969: 1979), Ф.Н.Милькова (1986) и других русскоязычных исследователей. В.Н. Солнцев (1997) предложил различать три типа ландшафтных структур, прямо или косвенно порождаемых морфолитогенной основой ландшафта: геостационарные, геоциркуляционные и биоциркуляционные. (Похожие по смыслу категории предложил выделять и Э.Г. Коломыц (1998)). Геостационарные структуры создаются устойчивыми радиальными связями компонентов ландшафта, которые в локальном масштабе определяются, прежде всего, свойствами отложений, создающими тот или иной режим минерального питания, фильтрации атмосферной влаги, воздушный режим почвы и т.п. Геоциркуляционные структуры обособляются в зависимости от напряженности и направленности латеральных потоков и тесно связаны с показателями расчлененности рельефа. Биоциркуляционные структуры агрегируют пространство в зависимости от ориентировки

по отношению к потокам солнечной энергии. И. Круглов (2006) предлагает понятие «геоэкосистема» как геопространственную модель взаимосвязей одного из свойств ландшафта как системообразующего компонента с другими ландшафтными свойствами. Это понятие отражает синтез морфологических (геопространственных) и функционально-генетических (экосистемных) отношений между компонентами, т.е. геосистемных и экосистемных представлений. Геоэкосистемы цитируемый автор делит на группы генетических и функциональных. Они могут быть морфогенными (связи морфогенетических или морфометрических свойств рельефа с другими свойствами), литогенными, биогенными, социогенными, гидрологическими (бассейновыми), функциональными экспозиционно-климатическими, функциональными биотическими и социально-экономическими сетевыми, функциональными биотическими и социально-экономическими переходными (пограничными). В отличие от идеи множественности ландшафтно-территориальных структур (Швебс и др., 1986; Гродзинський, 1993), отмечающей полиструктурность, концепция геоэкосистемы выделяет также полифункциональность и полигенетичность ландшафта (Круглов, 2006).

Взаимодействие компонентов ландшафта, порождающее вертикальную структуру, пожалуй, самая давняя и традиционная (наряду с темой морфологической структуры), но не теряющая актуальности тема ландшафтоведения. В англоязычной науке тема связей природных тел в большей степени лежит в сфере интересов классической экологии, причем с явно выраженных биоцентрических позиций. По Б.В. Виноградову (1998), это предмет функциональной ландшафтной экологии. В англоязычной ландшафтной экологии исследование вертикальных связей в ландшафте пока занимает подчиненную позицию по сравнению с исследованием пространственных взаимодействий, хотя интерес к этой теме растет в большей степени в Европе, в меньшей — в Северной Америке. Взаимодействие компонентов «по вертикали» происходит в разных формах и корректируется разнотипными пространственными структурами в зависимости от функциональной роли ПТК в геосистеме того или иного типа. Степень взаимоадаптации (когерентности, по А.И. Перельману, 1991) компонентов может быть различной в зависимости от динамического состояния ландшафта. Давно отмечено, что взаимосвязь необязательно выражается в полном совпадении пространственных границ компонентов; сущность многих ландшафтов составляет их переходный экотонный характер (Беручашвили и др., 1989). Расплывчатость границ не означает отсутствия или субъективности выделения самих ПТК (Преображенский, 1972). Поэтому обособляется еще одна важная тема ландшафтоведения: причины формирования *резких или постепенных ландшафтных границ*, соотношение и способы идентификации *ядер типичности и экотонов* (Д.Л. Арманд, 1975; Сочава, 1978; Russel, Jones, 2001; Николаев, 2006б). О высокой актуальности и даже болезненности этой темы свидетельствуют недавние публикации, содержащие критику ландшафтоведения сразу с двух противоположных сторон: за излишнюю приверженность «морфолитогенному детерминизму» и дискретному взгляду на природу (Колбовский, 2013; Смирнова, 2011) и за недостаточный геотопологический детерминизм (Ласточкин, 2011). Критический анализ этих представлений, не вполне корректно отражающих современный диапазон концепций ландшафтоведения, приводится в разделе 1.2. Более того, уже выражено мнение, что ландшафтные экотоны и процесс экотонизации геопространства на разных уровнях становятся приоритетными объектами изучения современной физико-географической науки и ландшафтоведения (Бобра, 2009). Важное следствие существования ядер типичности и переходных зон (экотонов) — повышен-

ный интерес в современном ландшафтоведении к проблемам идентификации участков ландшафта с различной *жесткостью межкомпонентных связей,* разным соотношением *видов устойчивости* (инертности, эластичности, пластичности, в терминологии М.Д. Гродзинского, 1987, 1995), о возможности нескольких устойчивых состояний в экотонах, в т.ч. о *триггерных эффектах* (А.Д. Арманд, Ведюшкин, 1989; А.Д. Арманд, 2006). Эту группу сюжетов можно рассматривать как связующее звено «структурной» и «динамической» линий современных ландшафтных исследований. Прикладной выход исследований устойчивости и триггерных эффектов видится в определении *диапазонов возможных динамических состояний* данного участка ландшафта (Исаченко А.Г., Исаченко Г.А., 1993; Мамай, 1992, 2005; Коновалова, 2004) и на основе этих знаний — поиске методов расчета *допустимых антропогенных нагрузок* (А.Д. Арманд и др., 1991; Fritz et al., 2003). В конечном итоге эти действия направлены на выбор *стратегии (набора допустимых видов) землепользования* и способов размещения конкретных хозяйственных угодий в ландшафте.

Эффекты *взаимодействия* (взаимоусиления, взаимоослабления), наложения *разнотипных структур* представляются одним из актуальнейших вопросов ландшафтоведения в наше время. Соответственно, возникает вопрос о *разделении вкладов жесткого морфолитогенного каркаса и процессов саморазвития других независимых от него типов структур* в ландшафтную дифференциацию. Именно этот вопрос и ставится в центр внимания данной монографии. Результаты исследований ложатся в основу многообразия видов *картографирования* ландшафтных структур и *районирования* в зависимости от целей исследований. Выработка оснований для типологического картографирования позволяет в рамках прикладного направления предлагать способы экологичной *адаптации* видов хозяйственных угодий *к ландшафтной структуре* (основная задача ландшафтного планирования) и конкретных технологий (задача отраслевого планирования) (например: Копыл и др., 1990; Ландшафтно-интерпретационное..., 2005; Суворов, Новицкая, 2007; Кощеева, Хорошев, 2008). С другой стороны, районирование по комбинациям ландшафтных структур нацелено на разработку регионально-специфичных *стратегий землепользования* в рамках более широкомасштабных видов интегрального территориального планирования (особенно, схем территориального планирования муниципальных образований).

Выделение и картографирование разнотипных ландшафтных структур с выделением ядер типичности и переходных зон, разделением резких и постепенных границ позволяет расширять диапазон методов оценки *ландшафтного разнообразия* и на этой основе — биологического разнообразия. Горизонтальные связи отражают пространственные отношения геосистемы с остальными частями ландшафтной сферы и способствуют увеличению ландшафтного разнообразия, определяемого вертикальными связями (Коновалова, 2004). Картометрическому исследованию ландшафтного разнообразия в СССР положили начало работы В.А. Николаева (1971; 1979). На современном этапе прогресс в этой области связывается с формализованной обработкой многоканальной дистанционной информации на основе математических методов (Пузаченко и др., 2002, 2014). В англоязычной ландшафтной экологии, имеющей глубокие корни в биоэкологии, особенно в США, ландшафтное разнообразие рассматривается на количественном уровне как условие сохранения биологического разнообразия. Эта цель достигается путем поддержания, восстановления или создания оптимальной пространственной конфигурации, ориентации, размеров, соседства местообитаний в

нарушенном ландшафте (Tischendorf, Fahrig, 2000; Larsen, Madsen, 2000; Bender et al., 2003). Огромный набор количественных показателей, характеризующих пространственную структуру, сведён в популярной компьютерной программе *Fragstats,* ставшей с 1990-х гг. стандартом для пространственного анализа (McGarigal, Marks, 1995). В то же время выявлен целый ряд проблем использования ландшафтных метрик: чувствительность к пространственному разрешению и масштабу, корреляция многих метрик между собой, неоднозначная связь индексов с пространственными структурами (Wu et al., 1997, 2000; McIntyre, Wiens, 2000; Jaeger, 2000; Tischendorf, 2001; Opdam et al., 2003). Важное направление иследований влияния структуры ландшафта на биоразнообразие — оценка отношений между компонентами ландшафта — почвами, водами, отложениями, растительностью (Ernault et al., 2003). Ландшафтное разнообразие, даже в рамках изначально биоцентричной ландшафтной экологии, на современном этапе рассматривается как один из показателей пространственной структуры, контролирующий не только перемещения животных, но микроклимат, потоки абиотического вещества, режим стока и т.п. (Forman, 2006). Англоязычные исследователи в начале 2000-х гг. отмечали, что если до сих пор основное внимание уделялось пространственной организации как таковой, то на новом этапе востребован перенос внимания на экологические процессы и их определяющую роль в возникновении пространственных структур (Wu, Hobbs, 2002). Формулировка основного вопроса географии, описанного Д. Харвеем (1974), применительно к ландшафтоведению может быть такой: как пространственная структура ландшафта определяет характер процессов и как процессы создают те или иные пространственные структуры. Исследование пространственной и временной некоммутативности (т.е. изменения характера процессов и свойств геосистем при перестановке их в пространстве и времени) рассматривается как одна из актуальнейших задач ландшафтоведения, фактически — задача выявления *эмерджентных свойств* структуры ландшафта (Боков, 1992; Пащенко, 1993). Представленный в нашем исследовании подход к оценке эмерджентных свойств пространственной структуры, выраженных через сочетания форм рельефа на нескольких иерархических уровнях, нацелен на решение ряда актуальных прикладных задач в рамках ландшафтного планирования, которые, на взгляд автора, относятся к «привилегиям» ландшафтоведения. К их числу относится такие *пространственные планировочные решения* как размещение или поддержка компенсирующих, связующих, буферных элементов ландшафта (в том числе в рамках создания экологического каркаса), регулирование направлений и интенсивности потоков, распределение очередности ресурсопользования в пространстве и времени, создание оптимальных площадных пропорций и соседств хозяйственных угодий (Ružička, 2000; Ландшафтное планирование..., 2006; Колбовский, 2008; von Haaren et al., 2008; Хорошев, 2012б). В.А. Боков обращает внимание на значимость для современного ландшафтоведения исследования принципа неинвариантности относительно изменения масштаба: законы природы несимметричны относительно изменения масштаба. Например, чем больше площадь водосбора, тем больше вероятность того, что отдельные отклонения от фона будут компенсированы противоположными явлениями (Боков, 1992). Учет эффектов компенсации в ландшафтном масштабе важен с практической точки зрения для ландшафтного планирования. Имеется в виду, что планируемая утрата тех или иных экологических функций частью ландшафта или бассейна (убежище для животных, регулирование стока, регулирование теплового режима и др.) при планировочных решениях должна быть компенсирована сохранением, восстанов-

лением или созданием аналогичного природного комплекса в другой части ландшафта и бассейна. Тогда появляется шанс на сохранение эмерджентного эффекта пространственной структуры.

Исследования, концентрирующиеся на ***функционировании*** ландшафта и образующие функционально-статическое направление моделирования (по А.Г.Топчиеву, 1988) концентрируются, в первую очередь на *эффективности передачи сигнала* от одного компонента ландшафт к другому (Беручашвили, 1990). Для ландшафтоведения особый интерес представляют *цепные реакции*, или «однопричинные эффекты» (Ретеюм, 1988), охватывающие множество свойств ландшафта вследствие внешнего импульса или саморазвития какого-либо компонента. Факт физического взаимодействия не всегда возможно установить, поэтому введено разделение понятий «связь» и «отношение» (В.Н. Солнцев, 1977; Мересте, Ныммик, 1984; Топчиев, 1988). Построение количественных моделей межкомпонентных связей служит основой для дальнейшего «расследования» возможных физических взаимодействий посредством потоков вещества и энергии либо для заключения о случайных или опосредованных связях. В принципе факт корреляции свойств в пространстве или времени может служить указанием на близость характерных времен и возможность физического взаимодействия. Поэтому интерес к моделям межкомпонентных связей, которые в отечественном ландшафтоведении строились с 1960-х гг., не утрачен (Пузаченко, Мошкин, 1969; Арманд, 1975; Абишев, 1975; Дьяконов, 1975а, 1991; Нечаева и др., 1975; Пузаченко, Скулкин, 1981; Коломыц, 1984, 2008; Арманд и др., 1991; Авессаломова и др., 2002; Хорошев, 2002; Дьяконов и др., 2004), так как его стоит рассматривать как предварительный этап анализа функционирования ландшафта. При наличии временного ряда наблюдений появляется возможность индикации наличия межкомпонентного взаимодействия по степени синхронности-асинхронности поведения свойств. Этот вопрос в течение многих лет исследуется К.Н. Дьяконовым (1991, 2008). Определение характерных времен ландшафтных процессов само по себе представляет один из важнейших вопросов современного ландшафтоведения (Сысуев, 2002).

В связи с этим встает чрезвычайно важная и слабоизученная задача, которая тесно смыкается с проблематикой исследования полиструктурности ландшафта. Это необходимость определения *иерархических уровней* ландшафтной организации, на которых проявляются процессы, обусловливающие взаимосвязанное варьирование свойств и возникновение *целостных структур*. Этот вопрос и составляет ядро нашего исследования. Проблема иерархии и масштабов на рубеже веков считается ключевой методологической проблемой в ландшафтной экологии, которая стимулирует развитие методов пространственного анализа и внедрение новой научной парадигмы, призывающей перейти к исследованию нелинейных и хаотических процессов. Для каждого процесса, каждой исследуемой проблемы может быть выстроена своя иерархия и для каждого из них свой масштаб может оказаться основным (O'Neill, 1988). Ключевые вопросы, на которые должна ответить ландшафтная экология для решения этой проблемы, сформулированы следующим образом (Wiens, Milne, 1989). В каких масштабах, на каких иерархических уровнях происходят и могут быть изучены экологические процессы? Какова должна быть детальность исследования в каждом из масштабов? Как информация, полученная для одного масштаба, может быть транспонирована в другой масштаб, так как необходимо осознавать ограниченность возможностей экс-

траполяции полученной информации на другой иерархический уровень (Wiens, Milne, 1989)? С исследованием иерархических уровней ландшафтной организации тесно связан вопрос о *синхронности реакции компонентов и ПТК* на внешнее воздействие (Дьяконов, Иванов, 1991; Беляков, 2004; Мамай и др., 2013а). С точки зрения прикладного направления решение этой задачи направлено на определение примерной *дробности деления территории* на относительно однородные участки, допускающие одинаковые планировочные решения. Давно обозначена и не утратила актуальности острая необходимость согласования уровня ландшафтной дифференциации, отображаемого на прикладных картах, с глубиной проработки проектных решений (Гросс, Булатов, 1989).

С другой стороны, могут выявляться территории, в пределах которых нет монотонности свойств компонентов, но наблюдается одинаковый тип связи между ними. Такой принцип деления территории соответствует идентификации парциальных структур с единым фактором дифференциации. Они могут быть компактными или состоящими из разобщенных в пространстве участков. Частным случаем является компактный, однородный в буквальном смысле (т.е. одного рода, происхождения), «ландшафт-система» в понимании А.Ю. Ретеюма (2006), или парагенетическая система Ф.Н. Милькова (1990). Если смотреть шире, то вообще-то надо доказывать, что связи того или иного типа существуют на всей территории исследования. Теснота связей может варьировать в пространстве ландшафта (Беручашвили и др., 1989). Есть необходимость исследования вопроса о варьировании типов связей в ландшафте. Его решение позволит определить ареал допустимого применения того или иного прогноза, основанного на оценке связей, что и предлагается в этой монографии.

Среди других привлекающих повышенное внимание вопросов функционирования ландшафта, которые даже косвенно не затрагиваются в нашем исследовании, но занимают или будут занимать большое место в проблематике современного ландшафтоведения, назовем следующие. Для прогнозирования состояния ландшафта в условиях внешних воздействий принципиальное значение имеют количественные оценки *скоростей процессов, объема потоков вещества, емкости геохимических барьеров* (Likens, Bormann, 1995; Солнцева, 1998, 2002; Ryszkowski et al., 1999; Касимов, 2002; Кошелева, 2002; Хомич и др., 2004; Битюков, 2007; Линник, 2008; Авессаломова и др., 2013). Отметим, что определение критических объемов потоков вещества переплетается с задачей оценки *рисков разрушения оптимальных пространственных пропорций* элементов ландшафта. Так как разнотипные элементы пространственной структуры могут иметь взаимодополнительное значение (А.Д. Арманд, 2008) для обеспечения устойчивого функционирования ландшафта, резкое увеличение или уменьшение объемов потоков (твердого и растворенного вещества, животных, семян и т.п.) может спровоцировать изменение площадных соотношений и, как следствие, режима функционирования ландшафта как целостной системы. Примером может служить изменение теплового и водного баланса после зарастания полей. Этот вопрос можно отнести к разряду мало изученных ландшафтоведением. Определённый интерес вызывает влияние пространственной структуры на объемы переноса вещества с внутрипочвенным и поверхностным стоком (Wickham et al., 2003), пространственно-временная динамика физико-химических свойств ландшафта, которая отражает состояние гидрологических факторов в бассейне (Malard et al., 2000). Работы такого рода отражают пока лишь намечающуюся в западноевропейской и американской школах тенденцию глубокого эмпирического исследования функционирования ландшафта. Она идёт на смену господствовавшему

долгое время приоритетному вниманию к пространственным геометрическим соотношениям без анализа генерирующих их процессов. Более глубокие корни изучение вертикальных взаимосвязей, переноса вещества имеет восточноевропейская ландшафтная экология, в которой в частности широко применяется ландшафтно-геохимическая методология (Opp, 1991; Klimo et al., 1996; Sugier et al., 1998; Ryszkowski et al., 1999; Banaszuk et al., 2000; Röder, Syrbe, 2000; Wicik, 2001). Огромное практическое значение придается выявлению *критических порогов* накопления вещества (в почвах, водах, фитоценозах), после превышения которых происходят цепные реакции изменения множества свойств других компонентов (А.Д. Арманд и др., 1991).

Если потоки вещества в ландшафте подробно изучаются большими силами исследователей уже, как минимум, полвека, то потокам энергии уделяется гораздо меньшее внимание ландшафтоведов (Дьяконов, 1991). Основной прогресс в этой сфере связан с *моделированием геофизической дифференциации* на основе морфометрического анализа рельефа (Сысуев, 2002, 2003а, 2004) Оно предусматривает строго формализованное выделение ландшафтных единиц по параметрам аккумуляции и рассеяния влаги и перераспределения солнечной энергии. Стоит подчеркнуть, в ответ на упреки Е.Ю. Колбовского (2013) и А.Н. Ласточкина (2011), что в ландшафтной науке формализовать выделение ландшафтных единиц на основе рельефа стали еще в 1970-е гг. в Чехословакии (Krcho, 1973; Minar, Evans, 2008). В.В. Сысуев (1986) подробное обосновал этот метод в 1980-е гг. в рамках геохимического моделирования функционирования ландшафта одновременно и независимо от А.Н. Ласточкина, что последний сам признает (Ласточкин, 2011). Самое новое направление исследований функционирования ландшафта, пришедшее из функциональной экологии, — термодинамическое — формируется уже в последнее десятилетие и концентрируется на вопросе об *эффективности усвоения и использования энергии* ландшафтом на основе понятий «работа», «*эксергия*», с использованием данных дистанционного зондирования (Jorgensen, Svirezhev, 2004; Muller, 2005; Сандлерский, Пузаченко, 2007; Stremke et al., 2011; Сандлерский, 2013). Теоретически этот вопрос в ландшафтоведении был поставлен Э. Неефом (1974) еще в 1960-х гг. Энергетические аспекты функционирования ландшафта и их связь с пространственной структурой отражены в понятии «энергетический ландшафт» и спроецированы на задачи пространственного планирования (Blaschke et al., 2013).

Наше исследование, пользуясь терминологией А.В.Топчиева (1988), можно отнести к функционально-статическому направлению, которое «раскрывает механизм функционирования геосистемы на фиксированный момент ее развития, анализирует «застывшую» структуру», «раскрывает закономерности взаимодействия компонентов в географических комплексах, направление, степень и характер их воздействия друг на друга, которое формирует целостную геосистему». Функция компонента, т.е. его свойства и параметры, представляются как результат взаимодействия изучаемого компонента со всеми остальными в границах соответствующего географического комплекса. Обратим внимание, что, по мнению цитируемого автора, существует некоторый парадокс развития системных представлений в географии: функционально-динамические подходы разработаны лучше, чем функционально-статические.

Исследования ***динамики и эволюции*** ландшафта, образующие функционально-динамическое направление моделирования (по А.Г. Топчиеву, 1988) концентрируются на выявлении диапазона естественных колебаний структуры в пределах инварианта и оп-

ределении механизмов появления направленных изменений. Ключевое место занимает исследование скоростей развития структуры ландшафта (Беручашвили, 1990; Мамай и др., 2013б; Петрушина, 2013). Особенно важна оценка вкладов внутригодовых и многолетних состояний в развитие, определение количественных пределов, за которыми наступают новые состояния (Мамай, 2008). Как уже было сказано, разрабатываемое с 1980-х гг. представление о триггерных эффектах служит «мостом» к структурному направлению, а представление о диапазоне возможных динамических состояний — к прикладному направлению и определению допустимых нагрузок на ландшафт. По мнению Т.И. Коноваловой (2004), если внешний сигнал не выходит за пределы количественных вариаций, происходящих в определенном интервале, внутри которого сохраняется данное качество, то видимой реакции обычно не происходит. В случае, когда возмущения будут абсолютно чужды ей, геосистема будет разрушена. Н.Л. Беручашвили предлагал понятие об этологии ландшафта, т.е. науке о поведении, и этоцикле (Беручашвили, 1989). Он считал, что под устойчивостью следует понимать свойство ПТК сохранять не только структуру и функционирование (присутствующие в большинстве определений), но и этоцикл при различных воздействиях; по этоциклам можно планировать допустимые нагрузки и типы использования ландшафта (Ахметели, Беручашвили, 1990). В связи с «поведением» ландшафта одно из узловых мест занимает проблема определения видов устойчивости. Исследования *скорости направленных изменений*, *синхронности изменений компонентов* решают проблему *устойчивости-инертности геосистем* (Дьяконов, Иванов, 1991). Другой вид устойчивости — эластичность, т.е. способность возвратиться в исходное состояние после нарушений — наиболее важен для принятий пространственных планировочных решений и распределения антропогенных нагрузок. Однако за последние десятилетий сформировались представления о *гистерезисе* — несовпадении прямой и обратной траекторий, невозможности возвращения геосистемы в исходное состояние по всем характеристикам (Нееф, 1974; Арманд, Ведюшкин, 1989; Пузаченко и др., 1991), о неповторимости состояний ПТК (Мамай, 1997). Отсюда следует, что в динамике накапливаются предпосылки к направленным изменениям. Исследование этого вопроса путем накопления полевых данных является одним из актуальнейших сюжетов ландшафтоведения. поскольку от его решения зависит разработка *технологий управления ландшафтом, адаптированных к региональным условиям*. Недостаточно исследован вопрос о соотношении тесноты межкомпонентных связей с устойчивостью и зависимости этого соотношения от динамического состояния ландшафта. Имеется представление, что слабым компенсационным механизмом к внешним воздействиям обладают системы с крайними проявлениями согласованности частей и разнообразия составляющих ее подсистем (Коновалова, 2004). Сравнение разновозрастных структур лежит в основе структурно-динамического направления моделирования геосистем (Топчиев, 1988). Некоторые элементы этого подхода представлены и в нашей работе (раздел 4.7).

Переплетение задач динамического и эволюционного направлений в ландшафтоведении видится в прогнозировании *реакции ландшафтов на глобальные изменения.* Она зависит от инертности, эластичности, явлений гистерезиса, стадии развития ландшафта, возраста отдельных компонентов, положения ландшафта по отношению к границам ареалов. Весьма перспективным и «привилегированным» вкладом ландшафтоведения в проблему адаптации хозяйства к глобальным изменениям представляется применение моделей межкомпонентных связей и связей свойств ландшафта с климатическими параметрами для разных климатических сценариев (Коломыц, 2008; Коломыц, Шарая, 2012). Эти

работы позволяют выявлять локальную специфику отклика ландшафтов на климатические тенденции, определить меру их инертности. Их практическим выходом может быть оценка надежности используемых технологий в долгосрочной перспективе, «срочность» структурных изменений в хозяйстве, новые риски опасных процессов (или уменьшение таковых). В англоязычной ландшафтной экологии эта тема стала одной из приоритетных в последние два десятилетия (Reid et al., 2000; European landscapes…, 2009). Наиболее остро стоит вопрос: динамика какого масштаба в вышестоящей экосистеме отражается на динамике исследуемой экосистемы (Shugart et al., 1988)? Приводятся примеры влияния разномасштабных климатических эффектов на динамику лесных экосистем (Shugart et al., 1988; Rupp et al., 2000). Привлекает внимание вопрос о соотношении вкладов локальных и глобальных факторов для динамики экосистем (Phillips, 2002). Предлагаемый этим автором принцип разложения энтропии связности позволяет разделить вклады локальных и глобальных факторов в формирование пространственной структуры (общая энтропия). Наконец, эволюционные изменения ландшафта нельзя сводить исключительно к результатам действия природных механизмов. Механизмы действия историко-культурных факторов к концу XX века рассматриваются как один из приоритетных предметов науки о ландшафте, в большей степени — в Западной и Центральной Европе, несколько в меньшей, но с нарастающей интенсивностью — в отечественном ландшафтоведении (Калуцков, 2008; Г.А. Исаченко, 1998; Низовцев, 2013). Адаптация хозяйственной деятельности к ландшафту и антропогенная трансформация структуры ландшафты находится в тесной связи не только с материальными возможностями и социально-экономической ситуацией, но и с нематериальными потребностями человека. Растущий интерес к перцепции ландшафта (казалось бы, к чисто гуманитарной ветви географии и — в еще большей степени — к психологии) не приходится отделять от сферы интересов ландшафтоведения. Во-первых, есть опыт изучения перцепции, в том числе эстетических свойств с применением достаточно строгих как количественных методов ландшафтоведения (с учетом морфометрических характеристик рельефа, мер ландшафтного разнообразия, пространственных метрик конфигурации), так и качественного анализа пространственной структуры ландшафта (Snacken, Antrop, 1983; Фролова, 1994; Николаев, 1999; Oťahel' et al., 2007; Колбовский, 2008). Во-вторых, восприятие местным сообществом «своего» ландшафта и способ расстановки материальных и нематериальных приоритетов определяет пространственное распределение нагрузок и, соответственно, обратимых и необратимых изменений его структуры (Decamps, 2000; Oťahel' et al., 2007). С точки зрения прикладного ландшафтоведения механизм влияния нематериальных предпочтений общества на процедуру принятия ландшафтно-планировочных решений представляется чрезвычайно востребованным направлением научного поиска.

1.3. Актуальные вопросы структурного направления ландшафтоведения

После краткой характеристики современных приоритетных тем ландшафтоведения опишем более детально актуальную для нашей работы проблематику структурного направления или, точнее — функционально-статического направления моделирования в ландшафтоведении. На рис. 2 показаны связи между наиболее малоизученными вопросами структурного направления и положение приоритетных проблем, разрабатываемых в нашем исследовании (выделены шрифтом).

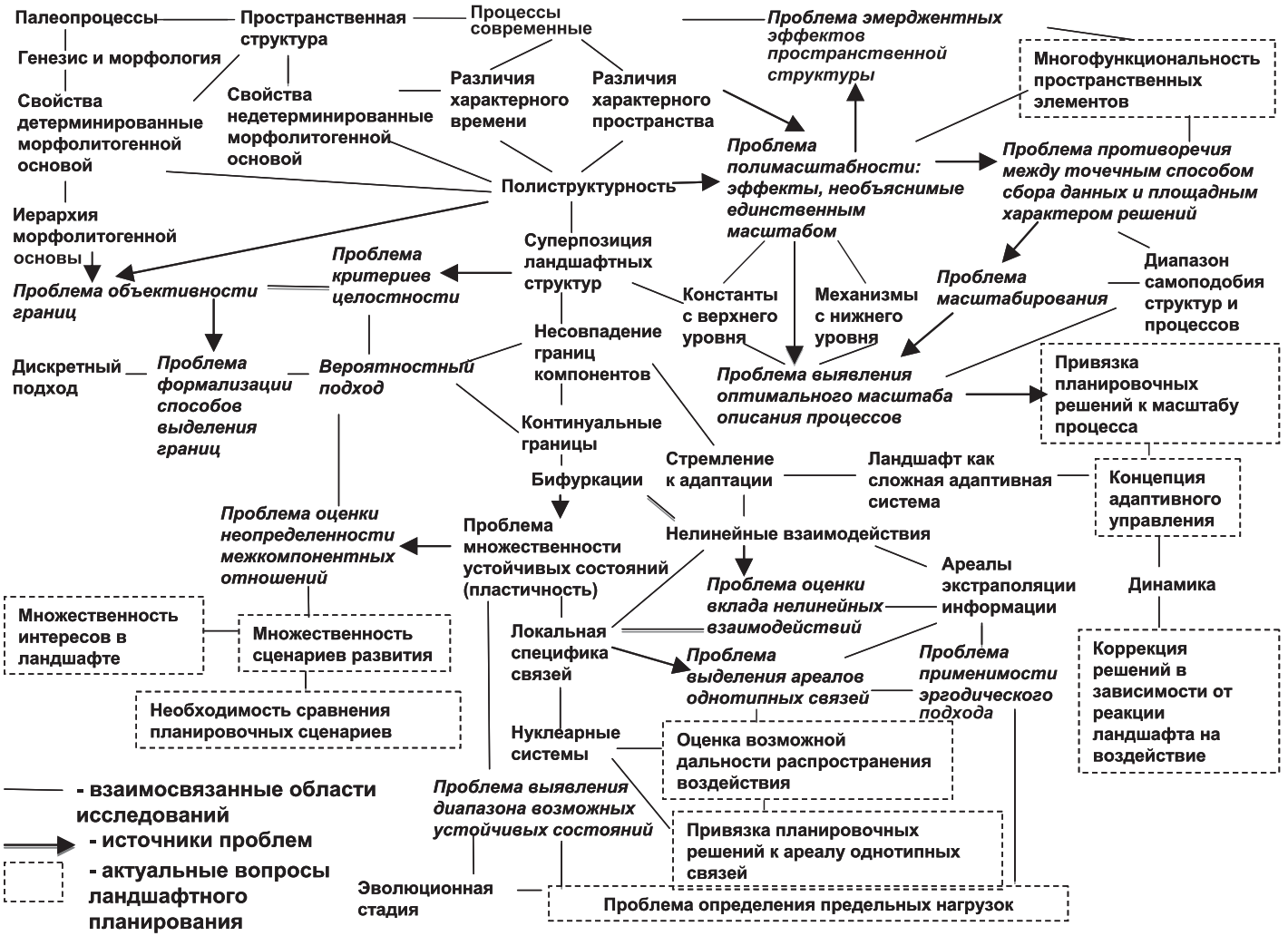

Рис. 2. Проблематика структурного направления ландшафтоведения. Курсивом выделены проблемы, освещаемые в работе.

В современной науке ландшафт рассматривается как система, относящаяся к категории сложных. Под сложностью системы обычно понимают ее принципиальную несводимость к простой сумме своих частей, из чего следует, что сложность неразрывно связана с нелинейностью (Подлазов, 2005). В ландшафте наблюдаются признаки сложной системы: разнообразие пространственных структур и процессов, нелинейные взаимодействия компонентов и пространственная гетерогенность (Hall et al., 2004). Ландшафтную сложность следует отличать от ландшафтной гетерогенности: сложность — состояние между порядком и хаосом с хорошо различаемыми структурами (Papadimitriou, 2010). Поэтому в ряде работ нейтральная модель случайного распределения пространственных элементов используется как «точка отсчета» для оценки степени сложности, закономерной пространственной организации реальных ландшафтов (Gardner, Urban, 2006; Zurlini et al., 2007).

Принято различать вертикальную и горизонтальную структуру ландшафта, однако в эти понятия в русскоязычной и англоязычной школах вкладывается разный смысл.

В русскоязычном ландшафтоведении «горизонтальная структура» часто отождествляется с «морфологической структурой ландшафта» (Анненская и др., 1963). Стоит заметить, что И.М. Забелин (1978) обращал внимание на неуместность этого термина в данном контексте, поскольку морфологические (по Н.А. Солнцеву) части ландшафта не являются неотъемлемыми частями единого организма, подобного частям человеческого тела; скорее морфологическими частями следует называть компоненты. Одновременно существует понятие «вертикальная структура», под которой понимается состав и взаимоотношения «компонентов» — горных пород, почв, вод, воздуха, растительности, животного мира (иногда в этот список включаются также мортмассы). В этом смысле термин употребляется и в этой книге. В аналогичном смысле термин «вертикальная структура» применяется в немецкоязычной школе ландшафтной экологии, причем в ранге компонентов выступают также дополнительно энергия, человек и гумус (Bastian, Steinhardt, 2002). Вертикальные топологические отношения между компонентами используются как основа иерархической модели экосистем, которая используется как основа для классификации и картографирования экосистем в разных пространственных масштабах в Нидерландах (Klijn, de Haes, 1994), Канаде (Rowe, 1996), США (Bailey, 2005).

В англоязычной ландшафтной экологии ландшафт как сложная система имеет вертикальную структуру (асимметричные отношения между уровнями) и горизонтальную структуру (симметричные отношения между холонами) (Wu, David, 2002). В большинстве публикаций под структурой ландшафта чаще всего принято понимать пространственный рисунок, который образуют его элементы, взаимодействующие между собой в латеральном направлении (Forman, Godron, 1986; Urban et al., 1987). Термин «вертикальная структура» подразумевает отношения между смежными иерархическими уровнями природных систем (Wu, David, 2002). Иначе говоря, в отличие от русского термина, под «вертикальной структурой» подразумеваются отношения между смежными иерархическими уровнями природных систем (Wu, David, 2002). Относительные вклады ограничений с высшего уровня и движущих сил низшего уровня рассматриваются как ключ к пониманию сложных систем. Если пространственная структура относительно статична по сравнению с процессами, то возможно только влияние структуры на процесс, но не наоборот (Wu, David, 2002). Все уровни экологических систем имеют рамки (constraints), обусловленные биотическим потенциалом с низших уровней.

Например, стая птиц не может лететь быстрее, чем самая слабая птица; лес не может фиксировать атмосферный азот, если отсутствуют нужные для этого организмы. Кроме того, действуют ограничения среды (environmental limits) с высших уровней. Наличие иерархической структуры в сложных ландшафтах позволяет исследователю разложить динамику на быстрые и медленные компоненты (O'Neill et al., 1989).

Пространственная (горизонтальная) структура рассматривается как результат действия современных процессов и наследия процессов прошлого. В отечественной концепции морфологической структуры ландшафта (генетико-морфологической конфигурации, по Гродзинському, 2005) заложена идея определяющей роли генезиса. Генезис ландшафта, прежде всего, отождествляется с генезисом морфолитогенной основы (МЛО), что находит отражение в классификациях ландшафтов (Николаев, 1979) и легендах ландшафтных карт. С другой стороны, говоря о возрасте ландшафта, всегда стараются подчеркивать, что речь идет не о возрасте морфолитогенной основы, а о возрасте инвариантной структуры (Сочава, 1978; Николаев, 1989, 2006б). Абсолютно приоритетная информативность генетического принципа подвергается на современном этапе сомнению. Так, Г.А. Исаченко (1998) вообще называет генетические подразделения рельефа малоинформативными для типологии геокомплексов и понимания их структуры в силу их повсеместной дискуссионности. Более значимыми он считает характеристики литологического состава отложений и морфологии рельефа. Сомнение в приоритетности генетического подхода высказал Е.Ю. Колбовский (2013). А.Н. Ласточкин (2011) также высказывает мнение, что морфологический подход (прежде всего, через формализацию рельефа и выделение геотопов) в ландшафтоведении заслуживает гораздо большего внимания, называя прежние приоритеты середины XX века «генетическим флюсом», который проявился также в геоморфологии. К сожалению, этот автор, критикуя теоретический уровень ландшафтоведения по состоянию на 2011 г., парадоксальным образом не обратил внимание на огромный прогресс в формализации ландшафтных единиц с помощью цифровых моделей рельефа и космических снимков, достигнутый в 1990–2010-х гг. (Хорошев, 2014). Несмотря на гигантский список литературы в книге с фундаментальным названием «Общая теория геосистем», легко заметить, что работ по собственно ландшафтоведению, опубликованных после 1992 г., в нем ровно одна (!) — монография А.С. Викторова (2006). Как бы то ни было, популярный и широко используемый на практике генетико-морфологический подход действительно опирается на принцип детерминизма, в большой степени обращен в прошлое ландшафтов, придает самое высокое таксономическое значение при картографировании генезису почвообразующих отложений (даже при сходстве их вещественного состава – например, древнеаллювиальных и водноледниковых песков) и привычно показывает резкие границы ландшафтных единиц. Хотя в описаниях ландшафтной структуры возможность постепенных переходов обычно упоминается, в традиционных технологиях ландшафтного картографирования это практически не находит отражения, хотя бы в простейшем виде пунктирных линий разной толщины. Стоит отметить, что еще более полувека назад были опубликованы предложения о способах показа границы линиями разных типов (А.Г. Исаченко, 1961), которые почему-то не получили широкого развития. Отсюда понятна не теряющая актуальности *проблема объективности ландшафтных границ, а точнее — проблема оценки степени их объективности*. Вопрос можно сформулировать так: *какова вероятность того, что исследователь не ошибся и морфолитогенная граница является в полном смысле ландшафтной*, т.е. отражается

в резкой смене свойств всех или большинства компонентов? Этот вопрос одновременно поставлен и в англоязычной науке о ландшафте (del Barrio et al., 1997; Ostendorf, Reynolds, 1998; Burrough et al., 2001 и др.). Автор ни в коем случае не хочет сказать, что взаимодетерминированности свойств, в том числе определяемых морфолитогенной основой, не существует. Проблема в другом: *оценить количественно вклад* морфолитогенной основы в варьирование свойств других компонентов. При этом признается наличие свойств и саморазвития структуры ландшафта, которые не зависят от МЛО.

Автор развивает *вероятностный подход* к решению проблемы объективности ландшафтных границ (раздел 4.8). Он позволяет на основе анализа межкомпонентных связей рассчитать и показать на карте степень неопределенности классификационной принадлежности (НКП) конкретных пространственных единиц (Хорошев и др., 2002). Генетико-морфологический подход придает современным ландшафтным процессам как бы второстепенное значение по сравнению с унаследованным от прошлых процессов генезисом морфолитогенной основы. Это отражается, например, в том, что ландшафт будет определен как моренный, и только на более низком таксономическом уровне будет указано на внутренние контрасты, обусловленные современным перераспределением влаги, миграцией элементов минерального питания, динамикой растительного покрова или антропогенными модификациями. Строго говоря, эту иерархию необходимо доказывать количественными оценками межкомпонентных связей (что автор и делает в данной работе), а не принимать *a priori*. Современные ландшафтообразующие процессы, как давно доказано, имеют разные характерные времена и характерные пространства, что накладывает ограничения на осуществимость взаимодействий (Арманд, Таргульян, 1974; O'Neill, 1988; Пащенко, 1993; Wu, Jelinski et al., 2000; Сысуев, 2002). Отсюда вытекает неизбежно представление о полиструктурности ландшафта. В исследовании этого явления автор, соглашаясь с В.М. Пащенко (1993), И.И. Мамай (2008), считает наиболее актуальными:

- ✓ *проблему механизмов и условий взаимодействия (или наложения, суперпозиции, интерференции) разнотипных парциальных структур;*
- ✓ *проблему критериев целостности геосистем, возникающих в результате их взаимодействия или наложения;*
- ✓ *проблему количественной оценки степени дискретности/континуальности границ геосистем.*

Другая группа нерешенных в ландшафтоведении проблем возникает в силу лишь декларативно-уважительного отношения к хорологическому подходу. Речь идет о проблеме механизмов возникновения *эмерджентных свойств пространственной структуры ландшафта*. В русскоязычном ландшафтоведении увлечение идеологизированной критикой «геттнерианства» привело к тому, что «вместе с водой выплеснули ребенка» (Максимов, 1988; Дронин, 1999; Голубчик и др., 2005; Богучарсков, 2006) и методы пространственного анализа долгое время почти не развивались. В англоязычной ландшафтной экологии они развиваются активно в последние два десятилетия после появления компьютерной программы Fragstats (McGarigal, Marks, 1995). Однако заметные результаты исследований эмерджентности можно пока констатировать разве что в оценке зависимости жизнеспособности популяций животных от взаиморасположения и пропорций пространственных элементов ландшафта. Основная часть рассуждений об эмерджентных свойствах остается на теоретическом уровне (Naveh, 2000). Основная трудность видится в том, что эмерджентность

возникает как результат одновременного проявления разномасштабных процессов, а методы *масштабирования (транспонирования информации из одного масштаба в другой)* разработаны пока слабо. Например, уровень трофности пойменных почв и обилие нитрофильных видов в травяном ярусе может определяться, с одной стороны разгрузкой грунтовых вод у подножья коренного склона (эффект уровня катены), с другой — привносом минеральных веществ во время половодья (эффект уровня бассейна), с третьей — перераспределением вещества гравитационными процессами или животными между повышенными и пониженными фациями пойменного урочища. Вышестоящие по рангу геосистемы задают константы, нижестоящие — генерируют механизмы, создающие некоторый средний уровень значений свойства. Поиск подходов к решению проблемы транспонирования информации между масштабами стоит в центре внимания представленной работы.

Как уже говорилось, одной из главных методологических проблем науки о ландшафте считается *проблема противоречий между точечным масштабом сбора данных и площадным характером принятия решений* в природопользовании. Важнейшая задача современной науки о ландшафте в связи с этим — определение диапазона иерархических уровней, в пределах которого наблюдается самоподобие процессов, связывающих компоненты между собой, что может быть выражено серией однотипных уравнений (например, с одинаковыми знаками и пропорциональными значениями коэффициентов), а в идеальном случае — одним и тем же уравнением. Например, пусть доказано, что продуктивность древостоя контролируется по некоторому правилу выпуклостью/вогнутостью форм микрорельефа, и по такому же правилу отличаются средние уровни продуктивности междуречий и долин. Тогда можно говорить о самоподобии перераспределения минеральных веществ по горизонтали и биологического поглощения. Закономерность, полученная по точечным данным, может быть использована для экстраполяции на территорию ландшафта. Диапазон масштабов, в котором соблюдается степенная зависимость, соответствует диапазону самоподобия явления (Wu et al., 2000). Таким образом, с учетом полиструктурности и полимасштабности ландшафта становится актуальной *проблема выявления оптимального масштаба принятия ландшафтно-планировочных решений.* Этот масштаб должен быть адекватен характерному пространственному и временному масштабу процессов, к которым предполагается адаптировать землепользование или которые предполагается регулировать. Дополнительную сложность управления ландшафтом создает многофункциональность его пространственных элементов. Проблема состоит в том, что планировочное решение, оптимизирующее одну функцию и принимаемое в масштабе X, может минимизировать выполнение другой функции, для которой требуется решение в масштабе Y. Например, рост продуктивности древостоя в заболоченном ландшафте для последующей рубки достигается осушительной мелиорацией, которая охватывает крупное приводораздельное урочище. В то же время это урочище может оказаться функционально неотъемлемой частью местности, т.к. включено в миграционные потоки охотничье-промысловых видов животных. Для обеспечения необходимого набора стаций может потребоваться неизменное состояние этого урочища в силу его безальтернативности в данной местности как необходимого местообитания.

Возвращаясь к проблеме дискретности/континуальности и связывая ее с проблемой полимасштабности, необходимо отметить, что именно от выбранного (а лучше доказанного) иерархического уровня ландшафтного анализа зависит возможность отразить

границу геосистем линией или полосой. Такое же мнение высказала Т.В. Бобра (2005). Возможен (и удобен для ландшафтного планирования) случай, когда чисто технологическое ограничение задает критический порог, позволяющий проводить границу в случае постепенного перехода. Легко представить, что для пахоты и внесения удобрений важен механический состав почв (и соответственно химический состав) в верхних 30 см, т.е. на глубину вспашки. Пусть мощность песчаного плаща поверх моренных суглинков возрастает в какой-то полосе постепенно. Соответственно, уменьшается доля ели, увеличивается — сосны, оглеенность постепенно вытесняется оподзоленностью и т.д. Тогда в целях землеустройства придется провести критическую границу по линии, где мощность плаща достигает именно 30 см. При распашке более мощного песчаного плаша перестает запахиваться богатый минеральными элементами суглинок и начинается резкое обеднение пахотных почв. Для выбора целевой породы для рубки порог может быть другой, для строительства — третий и т.д. *Определение критических порогов* такого рода, важных для ландшафтного планирования в широких экотонных полосах представляет собой одну из интересных прикладных задач ландшафтоведения (Хорошев, 2014).

Как уже было сказано, из несовпадения характерных времен компонентов ландшафта, их разной инерционности, следует неполная их взаимоадаптированность и широкое распространение постепенных переходов между геосистемами, которые, по мнению Г.А. Исаченко (1999), вообще преобладают в природе. Стремление компонентов к взаимоадаптации не должно приводить в взаимооднозначному соответствию на некоторой зрелой стадии развития. В.М. Пащенко (1993) видит связь между инвариантностью и эмерджентностью и соотносит ее со стадией развития. По его мнению, если система зрелая со стабилизировавшейся структурой и имеет устойчивое инвариантное ядро, то эмерджентные эффекты возникают на ее периферии; если система в периоде неустойчивых состояний, то эмерджентные эффекты возникают наоборот в ядре и способствуют перерождению инварианта и возникновению нового качества, т.е. эволюции. Связь между инвариантностью и эмерджентностью состоит в замещении инвариантных составляющих структуры эмерджентными в распадающемся инвариантном ядре и замещении эмерджентных составляющих инвариантными в формирующемся ядре (Пащенко, 1993, с.55). *Свойства ландшафта как сложной адаптивной системы* (Naveh, 2010) остаются малоизученными. В связи с этим прогноз передачи последствий антропогенных нагрузок по цепочке между компонентами оказывается не таким простым, как это следовало из первоначальной почти детерминистической концепции ландшафтоведения: степень неопределенности исхода взаимодействия высока. Неслучайно возникла концепции адаптивного управления экосистемами (читай — ландшафтами), сформулированная К. Холлингом (Holling, 1978), которая подразумевает необходимость и неизбежность периодической коррекции (адаптации) управленческих решений по результатам мониторинга их последствий.

Чрезвычайно важной представляется трактовка экотонных зон, или в широком смысле — зон с неполной взаимоадаптации компонентов, с точки зрения *устойчивости*. Расширенный диапазон возможных сочетаний свойств компонентов может означать допустимость нескольких устойчивых состояний, т.е. проявление одного из видов устойчивости — *пластичности*. Равновероятностные переходы геосистемы из одного устойчивого состояния в другое и обратно могут провоцироваться случайными соче-

таниями событий. Близка по смыслу проблема *бифуркации* — равновероятностного «выбора» геосистемой одного из устойчивых состояний или хаотического состояния после прохождения (во времени) крнтической «точки» (O'Neill, 1988; Пузаченко, 1998; Naveh, 2000). Принципиальная непрогнозируемость траектории развития после точки бифуркации (Пузаченко, 1998) ставит перед ландшафтоведением методологическую проблему выявления *диапазона возможных устойчивых состояний*. Возможность нескольких устойчивых состояний следует из нелинейных связей между компонентами. Например, статистическая достоверность уравнения связи между свойствами ландшафта 2-й степени свидетельствует о наличии двух решений. Следовательно, возможны два состояния независимой переменной, при котором наблюдается одинаковый диапазон значений зависимой переменной. Знак коэффициентов уравнения указывает на возможность либо самоусиления, либо самоингибирования процесса, ответственного за взаимодействие свойств (Пузаченко, 2004). Статистические средства позволяют легко сравнивать приращение объясненной дисперсии при введении второй степени в регрессионное уравнение, что облегчает определение критических порогов состояния ландшафта. Нелинейные взаимодействия сейчас находятся в центре внимания науки о ландшафте (Ludwig et al., 1997; Пузаченко, 1998; Naveh, 2000; Wu, Hobbs, 2002; Черванев и др., 2004). В.И. Чупрынин (2003) выделяет следующие виды нелинейных эффектов в геосистемах: неустойчивость, обострение и локализация, «забывание», множественность режимов функционирования, бифуркация, катастрофа, взаимовлияние подсистем (конкуренция, отбор, объединение в систему), эмерджентность, когерентность (совершение коллективных действий при некотором бифуркационном значении параметра), разнообразие видовое, стохастичность (турбулентность), самоорганизация, эволюция. Нелинейные диссипативные структуры (например, триггерные геосистемы, автоколебательные структуры) возникают в системах при четырех условиях: система открыта; уравнения системы нелинейны; микроскопические процессы происходят согласованно (когерентно); отклонение от равновесного состояния превышает критическое значение (Чупрынин, 2003). Получив информацию о наличии нелинейной связи между исследуемыми свойствами можно разделить область значений аргумента на ограниченные интервалы, при которых отклики функции линейны, но имеют разные знаки, либо отклик отсутствует вообще.

Оценка *вклада нелинейных взаимодействий* в ландшафтоведении позволила бы более корректно определять ареалы допустимой экстраполяции информации о виде связи, устанавливать возможность смены в пространстве знака коэффициента чувствительности одного свойства к варьированию другого. Иными словами — находить в пространстве гетерогенного ландшафта *ареалы действия однотипных линейных связей*. В более общем смысле выявление ареала действия связи любого вида — линейного или нелинейного — рассматривается как подход к решению проблемы локальной специфики связей внутри ландшафта. В частности, можно устанавливать границы нуклеарных систем, существование которых А.Ю. Ретеюм (1988) обосновал теоретически, но, к сожалению, не предложил строгих количественных критериев. На взгляд автора, именно наличие в некотором пространстве однотипной связи при знании механизма пространственной дифференциации, может свидетельствовать о существовании нуклеарной системы. Рассмотрим пример нуклеарной системы, ядром которой служит место склоновой разгрузки высокоминерализованных грунтовых вод в тайге. Такая система может быть выделена в границах компактного ареала, в котором соотношение мегат-

рофных и олиготрофных видов закономерно меняется по единому правилу в зависимости от уровня грунтовых вод и расстояния до места разгрузки. Правило описывается единым уравнением с высоким коэффициентом детерминации. Здесь процесс разгрузки грунтовых вод служит и интегрирующим фактором (объединяет территорию единым правилом пространственной организации), и фактором дифференциации (разная интенсивность процесса в пределах территории создает пространственные различия). Противопоставление факторов дифференциации и факторов интеграции оказывается весьма условным. В нашей работе вопрос о значимости нелинейной составляющей межкомпонентных связей по сравнению с линейной исследуется в разделе 4.2 посредством построения мультирегрессионных уравнений второй степени. Предлагаемые способы выявления ареала действия связей рассматриваются в главе 5. Кроме того, можно сделать более формализованной и корректной процедуру разграничения геосистем на основании однотипного сочетания контрастных элементов, переходы между которыми подчиняются единому правилу. Примером может служить разграничение местностей — морфологической единицы ландшафта, дефиниция которой у Н.А. Солнцева (1948) наиболее «туманная» — по однотипному сочетанию урочищ.

Решение проблемы локальной специфики межкомпонентных связей создает основы для решения другой актуальной проблемы, имеющей тесную связь с практикой в вопросе *расчета допустимых нагрузок, — корректности применения эргодического подхода,* к которому отечественное ландшафтоведение «присматривается» достаточно давно (В.Н. Солнцев, 1981; Боков, 1992; Дьяконов, 1984; Беручашвили, 1989; Пащенко, 1993; Гришанков, 2001; Николаев, 2006б) и уже получило результаты на немногочисленных пока примерах. Пусть: а) известно правило дифференциации территории (например, изменение биопродуктивности по градиенту уровня грунтовых вод), б) известен ареал действия этого правила, в) можно представить пространственный градиент как градиент степени выраженности процесса во времени. Тогда в этом ареале можно более или менее уверенно прогнозировать изменения в ландшафте (например, биопродуктивности) при гипотетических антропогенных нагрузках (например, при осушительных мелиорациях). Другой важный аспект ландшафтно-планировочных решений, связанный с ареалами действия связей, состоит в возможности прогнозирования дальности распространения воздействия. Например, пусть построена достоверная модель связи между пространственной структурой древесного яруса и характеристиками подстилки как горючего материала для лесного пожара и доказана ее корректность только для местности густорасчлененных склонов долин. Тогда для не обеспеченной полевыми данными территории с известным рельефом по космическому снимку можно оценить характеристики подстилки и предсказать потенциальную дальность распространения пожара.

1.4. Подходы к исследованию межкомпонентных связей

Ключевой для нашей работы вопрос о связях между компонентами ландшафта в мировой науке выходит далеко за пределы физической географии и даже более относится к традиционной сфере интересов экологии. Во всяком случае, термин «отношения» ассоциируется больше с экологией, чем с наукой о ландшафте (Ndubisi, 2002). В географии давно предложено различать связи и отношения (Мересте, Ныммик, 1984; Топчиев, 1988;). Отношения есть опосредованная связь объектов без указаний на промежуточные звенья этой связи, на процессы (Свидерский, Зобов, 1979; цит. по: Ме-

ресте, Ныммик, 1984). Сеть географических отношений между элементами множества обеспечивает его целостность (Мересте, Ныммик, 1984). В.Н. Солнцев (1977) применительно к задачам ландшафтоведения предложил различать «связи-взаимодействия» и «связи-отношения». Связи-взаимодействия выявляются на основе изучения непосредственного изучения потоков вещества и энергии. Примером хорошо разработанных экспериментальных моделей типа «воздействие–отклик» могут служить результаты ландшафтных, по сути, исследований: в лесной гидрологии по изучению влияния осушительных мелиораций на приросты древесины и рубок — на свойства стока (Вомперский, 1968; Likens, Bormann, 1995; Битюков, 2007), в геохимии ландшафта — самоочищения почв (Солнцева, 1982; Снакин и др., 1997). Соотношение между величиной воздействия и реакцией системы может быть самым разным и зависит от структуры системы, что обусловливает нелинейность взаимодействий между компонентами, в том числе в силу сигнально-информационных воздействий, когда эффект воздействия неадекватен его величине (Черванев и др., 2004). «Связи-отношения» могут возникать в «одностороннем порядке», когда геосистема более высокого иерархического уровня создает рамочные условия (ограничения, константы) для подчиненных геосистем: свойство с большим характерным временем ограничивает разнообразие свойства с меньшим характерным временем. Близость характерных времен может обусловливать «связь-взаимодействие».

В экологии большинство концепций и моделей связей разработано для какого-либо одного масштаба, чаще всего — локального. Например, почти половина всех экологических экспериментов, результаты которых опубликованы в авторитетном журнале Ecology, относились к участкам земной поверхности менее 1 м в диаметре, и/или охватывали период времени менее одного года (Wu, 1999). На современном этапе наблюдается значительный рост интереса к более широкоохватным и длительным процессам, что ведет к смыканию интересов экологии и физической географии.

Ощущается необходимость в концепции, позволяющей минимизировать субъективность при разграничении ландшафтных систем по выбранному классификационному признаку и оценить степень равновесности в отношениях между компонентами ландшафта для выбранного иерархического уровня. Внести определенность в вопрос о равновесных сочетаниях ландшафтных компонентов позволяет понятие «относительное пространство» (Marceau, 1999). Свойства относительного пространства определяются потоками вещества и энергии; пространство измеряется не евклидовыми метриками, а структурными и функциональными отношениями между объектами, в то время как под абсолютным пространством понимается пространство с жестко заданной неизменной структурой, описываемое евклидовой геометрией (Топчиев, 1988; Meentemeyer, 1989).

Внимание к различным компонентам ландшафта довольно сильно различается в русскоязычной и англоязычной науке о ландшафте. В русскоязычном ландшафтоведении поиск количественных методов изучения связей между биотическими и абиотическими компонентами начался достаточно давно, прежде всего — Институтом географии Сибирского отделения РАН (Топология степных геосистем, 1970; Природные режимы..., 1975; Южная тайга Прииртышья, 1975). Б.В. Виноградов (1998) оценивал выявление связей экосистем с почвами и рельефом как одно из главных достижений ландшафтной экологии в его понимании — как биоцентрической науки, использующей достижения школы ландшафтоведения. В англоязычной ландшафтной экологии, как и следует из ее названия, в центре внимания находятся биотические компоненты,

однако развитие этой отрасли знаний идет в сторону от изначального биоцентризма к более полному охвату всех компонентов, особенно в Европе. В то время как в отечественной школе физической географии роль рельефа в ландшафтной дифференциации всегда была на первом плане и даже переоценивалась, а иногда (Ласточкин, 2011) абсолютизировалась, в англоязычной ландшафтно-экологической литературе роли рельефа до сих по уделяется недостаточное внимание. Причины видятся в преобладании двухмерного мышления матричной модели Р. Формана; особенно слабо изучена дифференцирующая роль рельефа по отношению не к отдельным компонентам ландшафта и биоразнообразию, а к целостной экосистеме и абиотическим процессам в ней (Bailey, 2004; Sebastiá, 2004; Hoechstetter et al., 2008). Зарубежные исследователи последних лет отмечают недостаточное понимание того, как взаимодействие рельефа, нарушений и динамики растительности формирует ландшафтную структуру: традиционные для ландшафтной экологии модели динамики пространственной структуры ландшафта разработаны в основном для плоских территорий (Dorner et al., 2002). Появление доступных цифровых моделей рельефа резко увеличило интерес к изучению геоморфологических факторов дифференциации и динамики ландшафта.

Один из наиболее актуальных вопросов современной ландшафтной экологии — в какой степени компоненты ландшафта детерминированы абиотическими условиями (Minar, 1993; Walsh et al. 1994; Myster et al., 1997; Litaor et al., 2002; Makhdoum, 2008), то есть наблюдается всплеск интереса к проблеме, которая занимала отечественных ландшафтоведов, как минимум, с 1940-х гг. Так называемые топографические (в русскоязычной терминологии геолого-геоморфологические) факторы дифференциации компонентов ландшафта исследованы, например, для разных иерархических уровней на примерах мощности почвенных горизонтов (Kachanoski, 1988), биологической продуктивности в условиях периодических пожаров в прериях (Benning, Seastedt, 1995), закустаривания на экотоне прерий и пустынь (Turnbull et al., 2010). Установлены зависимости водоудерживающей способности экосистем от пространственной гетерогенности растительного покрова, почв и уклонов (Guo et al., 2003). В Хорватии построена модель пространственного распределения классов почв в соответствии с типами рельефа, макроклимата и литологического субстрата методом нейронных сетей (Antonić et al., 2003). Проведено сравнение вкладов геоморфологических, климатических и фитоценотических факторов в пространственные структуры популяций птиц Испании (Seoane et al., 2004). Степень подчинения растительного покрова формам рельефа методом регрессионного анализа исследовалась в Аппалачах (Bolstad et al., 1998).

Соответствие между классами элементов ландшафта (по почвам, растительности) и классами рельефа исследовано в Испанских Пиренеях (del Barrio et al., 1997). В этой работе исследуется связь каждой ландшафтной единицы с топографическими переменными методом бинарного дискриминантного анализа. В качестве топографических переменных использованы уклоны, экспозиция, площадь водосбора, индекс влажности, потенциальная радиация. Оказалось, что из 10 типов ландшафтных единиц 8 достаточно точно предсказываются топографическими переменными. Авторы обсуждают проблему неполной дискриминации классов ландшафтных единиц из-за действия неучтенных факторов. Они делают предположение, что часть ландшафтных единиц выстраиваются по адаптации к условиям физической среды в ряд по стадиям развития, причем внутренняя вариабельность свойств в этом ряду уменьшается; тогда нет

необходимости привлекать топографические переменные для объяснения. Основной вывод заключается в том, что топографические переменные (т.е. рельеф) отражают комбинацию широкого спектра физических факторов среды и потому ответственны за формирование обратных связей; второстепенное значение принадлежит внутрибиоценотическим факторам. Этот вопрос, как хорошо известно, очень подробно обсуждался в советском ландщафтоведении. Московская школа с ранних этапов отстаивала положение о морфолитогенной основе как наиболее сильном компоненте; воронежская и иркутская школы не были столь категоричны. Вопрос о соотношении значимости почвенно-фитоцентических, морфолитогенно-фитоценотических и внутрифитоценотических связей в разных регионах подробно рассматривается в нашей работе ниже в разделе 4.2.

Сам факт наличия статистически достоверной связи между свойствами еще не означает наличия физического взаимодействия: взаимодействие возможно только между переменными с сопоставимыми масштабами пространства или времени, на так называемых «когерентных уровнях» (Delcourt et al., 1983; Shugart, 1984; Пузаченко, 1986; O`Neill et al., 1986). Этот вопрос более подробно рассматривается нами в разделе 4.4.

Ведется поиск и сравнение адекватных статистических методов исследования межкомпонентных отношений. Одним из наиболее популярных методов исследования межкомпонентных отношений, используемых также в нашей работе, является мультирегрессионный анализ (Ludwig et al., 1999; Dzeroski, Drumm, 2003; Kennedy et al., 2008). Широко применяется также метод канонического анализа соответствий, который позволяет исследовать зависимости в многомерном пространстве (Cushman, McGarigal, 2002; Kennedy et al., 2008). Общим недостатком многомерных методов называют необходимость снижения размерности и, соответственно, потери информации. Предложена мера дистанции, которая избавлена от такого недостатка (Tran et al., 2006). Она представляет собой взвешенную евклидову дистанцию, веса для которой рассчитаны из коэффициентов детерминации уравнений, связывающих характеристики ландшафта между собой.

Американскими исследователями изучался вопрос о том, в какой степени растительный покров Йеллоустонского национального парка описывается топоклиматическими классами. Исследование проведено с применением классификации рельефа методом к-средних и критерия хи-квадрат для определения точности попадания в класс предсказанных по рельефу и реально наблюдавшихся классов растительности (Burrough et al., 2001). Авторы этой работы отталкиваются от необходимости привести большое количество биотических и абиотических признаков (проблема многомерности данных) к управляемому количеству классов, имеющих пространственный смысл. Для отражения на карте резких и постепенных переходов между классами разработан коэффициент, представляющий отношение первой по значимости вероятности принадлежности к классу ко второй как мера перекрытия классов. Авторы рассчитали классификационную энтропию — меру, которая позволяет оценить степень однозначности тяготения того или иного класса растительности к классам рельефа, то есть фактически меру равновесности между растительностью и рельефом. Задача, решаемая авторами цитируемой работы, — не просто выделение топоклиматических классов по морфометрическим характеристикам рельефа (годовая солнечная радиация, топографический индекс влажности, индекс подвижности/транспортировки отложений/седиментов, кривизны, уклоны), а выделения «экологически значимых»

классов, которые находят отклик у растительного покрова. Примерно одновременно автор начал разрабатывать подход к решению той же проблемы и предложена сходная мера неопределенности классификационной принадлежности (НКП) (Хорошев и др., 2002). По сути, это не узко экологическая, а типичная ландшафтоведческая задача. Она находится в контексте решения проблемы вероятностных отношений между компонентами и оценки неопределенности ландшафтных границ. Резкую границу между соседними единицами можно проводить в тех случаях, когда каждая из них очень характеризуется высокой вероятностью соответствия типичным характеристикам одного класса и низкой — характеристикам других классов. Иначе говоря, НКП низкая. При высокой НКП констатируется сочетание в вертикальной структуре свойств разных классов (например, в силу большей инертности одних компонентов и меньшей — других), граница становится расплывчатой. Тогда менее очевидным становится прогноз изменений при внешнем воздействии. С точки зрения динамики и эволюции это может означать высокую вероятность направленных изменений вертикальной структуры (процесса изменения одного компонента для адаптации к свойствам другого, более инертного) или возможность нескольких устойчивых комбинаций компонентов. С точки зрения ландшафтного планирования при множественности интересов землепользователей это может означать разнообразие возможностей использования. Тогда необходимо разрабатывать и сравнивать обязательно несколько конкурирующих сценариев использования с привлечением разных специалистов, для чего потребуется разработка междисциплинарного «языка» (Tress et al., 2004).

Логика нечетких множеств является попыткой расширить концепцию континуального варьирования свойств ландшафта в зависимости от постепенного изменения свойств среды (Molenaar, Cheng, 2002; Robinson, 2002; Burrough et al., 2001; Braimoh et al., 2004). Применяется Байезианский подход с расчетом вероятности принадлежности объекта к каждому классу и мер неопределенности (Fortin et al., 2000; Burrough et al., 2001; Jager, King, 2004; Hlasny, 2006; Musio et al., 2007, Cullinan et al., 1997; Hooten et al., 2003).

Т.В. Бобра (2005) предложила интересный подход к проблеме границ. Она понимает ландшафтные границы как площадной объект, особый тип географических систем, который имеет соимеримые масштабы с площадями самих ландшафтных комплексов (ядер типичности-однородности). Информационная мера используется для выделения переходных зон между ландшафтными комплексами. Представленные карты предлагают новый подход к ландшафтному картографированию, исходящий из представлений о континуальности ландшафтной структуры (Бобра, 2005). Идеологически сходный подход, основанный на вероятностном картографировании, предлагался автором (Хорошев, 2005б), А.Н. Кренке с соавторами (Кренке и др., 2011).

Похожий подход применен для объяснения варьирования индекса NDVI в тундре Северной Америки (Ostendorf, Reynolds, 1998): рассчитаны частоты и вероятности встречаемости того или иного класса растительности при данном сочетании значений уклона и стока, рассчитанного через площадь водосбора по ЦМР. Для предсказания типа растительности выбрана максимальная из частот. 43% варьирования NDVI объяснено топографическими данными; 38% варьирования типов растительности описано высотой, инсоляцией, влажностью почв и характеристиками снежного покрова.

В целом ряде работ сделан вывод о необходимости и возможности разработки методов, которые позволили бы выявлять смены типов межкомпонентных связей в

пространстве (Крауклис, Евдокимова, 1975; van Horssen et al., 1999; Ludwig et al., 1999; Lookingbill, Urban, 2004). Вертикальные топологические отношения между компонентами положены в основу серии иерархических моделей пространственной организации экосистем, которые используется как основа для классификации и картографирования экосистем в разных пространственных масштабах в Нидерландах (Zonneveld, 1989; Klijn, de Haes, 1994), Канаде (Bailey, 2005), США (Rowe 1996; Smith, Carpenter, 1996), Бельгии (van Eetvelde, Antrop, 2007). Сибирскими ландшафтоведами высказано предположение, что в геосистемах существуют некоторые механизмы компенсации временного разнообразия пространственным и наоборот (Крауклис, 1975). В фациях с оптимальными условиями существования одновременно умещается большее число функционально важных элементов, сокращаются диахронность процессов и контрастность состояний. В тех фациях, где в силу избыточности или дефицитности одного или нескольких факторов ограничена возможность синхронного существования облигатных элементов, усиливается тенденция к чередованию процессов во времени, что влечет за собой потенциальное уменьшение устойчивости системы (Крауклис, 1975).

Подводя итог этого краткого обзора состояния вопроса, можно констатировать общее согласие исследователей по следующим позициям.

1. Связи между компонентами ландшафта не абсолютно жесткие, носят вероятностный характер и потому допускают гибкость реакции ландшафта на внешние воздействия, что служит залогом его устойчивости.
2. Возможно частичное перекрытие свойств биотических и биокосных компонентов в разных классах абиотической среды, определяемое неравнозначностью одновременно действующих ландшафтоформирующих процессов.
3. Связи-взаимодействия компонентов с реальным обменом веществом и энергией возможны при близости характерных времен и/или характерных пространств.
4. Вид и знак межкомпонентных связей может варьировать в пространстве, поэтому необходимо устанавливать в каждом конкретном случае ареал реализации той или иной связи.
5. Для определения природы взаимосоответствий между компонентами ландшафта необходим полимасштабный анализ ландшафтоформирующих процессов.
6. Степень взаимоадаптированности компонентов зависит от стадии развития ландшафта.
7. Исследование связей в сложных системах требует применения методов многомерного анализа и снижения размерности данных.

Среди наиболее актуальных вопросов, привлекающих внимание современных исследователей межкомпонентных связей в ландшафте, в том числе автора этой книги, выделяются:

1. доля пространственного варьирования свойств компонентов, жестко определяемая морфолитогенной основой;
2. способы выявления рамочных условий, налагаемых на ландшафт системой более высокого иерархического уровня;
3. вклад самоорганизации биотических и биокосных компонентов ландшафта, внутрибиоценотических факторов в пространственное варьирование его свойств.

1.5. Подходы к исследованию иерархической и полимасштабной организации ландшафта

Ключевое слово нашей работы — полимасштабность. Рост современного интереса к проблеме масштаба в науке о ландшафте связывают с пятью основными причинами (Turner et al., 2001).

1. Экологический кризис.
2. Несопоставимость масштаба природных процессов с масштабами их восприятия человеком.
3. Экосистемные взаимодействия происходят в разных масштабах.
4. Полевые данные собираются в крупном масштабе, а природопользование планируется в более мелком.
5. Разномасштабные данные при необходимости одновременного сопряженного использования.

Три ключевых публикации определили развитие исследований проблемы масштаба в ландшафтной экологии (Turner et al., 2001). T. Allen и T. Starr (1982) заложили основы применения теории иерархии на основе общей теории систем и спровоцировали огромную дискуссию в экологии. P. Delcourt (1983) впервые графически показал корреляцию между пространственными и временными масштабами на примере палеоэкологических данных по динамике растительного покрова. R. O'Neill (1986) предложил иерархическую концепцию экосистем. Согласно этой концепции, пространственные и временные структуры являются следствием нелинейных взаимодействий между биотическими и абиотическими компонентами экосистемы. Иерархия скоростей процессов отражается в иерархии пространственных структур (O'Neill, 1986, 1988, 1989).

Один из наиболее сложных вопросов современной науки о природных системах — *критерии определения иерархических уровней*.

Исследователи практически пришли к согласию, что не существует единого априорного критерия выявления иерархии. Для разных проблем должны выявляться разные иерархии. Хотя большинство экологов соглашаются, что системы окружающей среды полимасштабны, по-прежнему сетуют на попытки сводить экологию к немногим фундаментальным уровням, таким как популяции или экосистемы. Считается, что пока система функционирует устойчиво и стабильно, можно игнорировать динамику на нижележащем уровне. Однако в нарушенном состоянии, быстрая динамика нижележащей системы может ее нарушать и приводить к новой конфигурации, т.к. перестает работать сдерживающий фактор со стороны высокого уровня (O'Neill, 1988).

Выделяются следующие важнейшие следствия полимасштабности ландшафта (Wu, Jelinski et al., 2000):

1. ландшафты могут быть иерархически организованы, хотя и необязательно;
2. в ландшафтах существуют разнотипные пространственные структуры неодинаковых масштабов, которые порождаются разными процессами; поэтому масштаб наблюдения влияет на результаты наблюдения;
3. для понимания функционирования ландшафта необходимо полимасштабная характеристика пространственных структур и процессов;
4. модели, разработанные для одного масштаба, могут оказаться неприменимы к другому масштабу.

Большое внимание исследователей привлекает соотношение масштаба исследования с возможностями *оценки устойчивости* природных систем.

Современное повышенное внимание физической географии и экологии к климатическим изменениям и эффектам быстро протекающих природных и антропогенных процессов в большой степени концентрируются на проблеме оценки чувствительности экосистем и ландшафтов (Demek, 1995). Если брать шире — возрастает актуальность изучения форм устойчивости ландшафта к внешним природным и антропогенным факторам, включая факторы не выясненного до конца генезиса (например, климатические изменения). Хорошо известно, что существуют несколько видов устойчивости (Holling, 1973, 2004; Гродзинский, 1987, 1995; Huba, 1998; Ares et al., 2001; Светлосанов, 2009). Во-первых, это устойчивость резистентная, иными словами — стабильность, сопротивляемость, инертность, то есть способность системы сохранять параметры структуры и функционирования при внешних воздействиях. Во-вторых, это устойчивость как способность возвращаться в исходное состояние, иными словами — эластичность. В-третьих, это устойчивость как способность переключаться с одного возможного устойчивого состояния на другое, иными словами — пластичность. Последний вид устойчивости привлекает особенно внимание в связи с быстро развивающимися теорией нелинейной динамики, представлениями о бифуркациях состояния в зависимости от сигналов малой мощности из внешней среды, о множественности устойчивых состояний (O'Neill, 1988; O'Neill et al., 1989; Peterson et al., 1998; Пузаченко, 1998; Naveh, 2000; Pickett, Cadenasso, 2002; Wu, David, 2002; Hay et al., 2002; Phillips, 2006; А.Д. Арманд, 2006; Hugget, 2007; Moore et al., 2009; Papadimitriou, 2010). Сведения о господстве нелинейных отношений между природными явлениями накапливаются с большой скоростью (Phillips, 2006; Moore et al., 2009). О сложных системах, к категории которых относится и ландшафт, говорят как о диссипативных структурах, механизмом возникновения которых является самоорганизация. Последняя индицируется по возникновению пространственных структур и временных ритмов, необходимость идентификации которых делает актуальной проблему определения наилучшего (или «когерентного») масштаба для каждого конкретного изучаемого явления (O'Neill, 1988; Carlile et al., 1989; Gosz, Sharpe, 1989; Phillips, 1999; Wu, Qi, 2000; Hay et al., 2002; Ben Wu, Archer, 2005; McMahon et al., 2004).

Канадский эколог К. Холлинг (Holling, 1973) различает техническую эластичность как скорость возвращения в исходное состояние (система остается в стационарном состоянии; зависит от «крутизны склонов», ограничивающих «яму» — мощность отрицательной обратной связи) и экологическую эластичность как способность переходить в другое устойчивое состояние (мощность изменений, которые переводят систему из одного состояния, создаваемого одним множеством взаимоподдерживающих сил, в другое с другим множеством процессов и структур). Холлинг использует метафору ландшафта (как территории с расчлененным рельефом) для иллюстрации видов эластичности. Если техническая эластичность зависит от «локального уклона», то экологическая эластичность — от «регионального рельефа» (Peterson et a., 1998). Если виды в функциональной группе существуют в разных пространственно-временных масштабах, они обеспечивают взаимоусиление, которое вносит вклад в эластичность (resilience) функции, в то же время минимизируя конкуренцию видов внутри функциональной группы. Межмасштабная эластичность дополняет внутримасштабную эластичность, порождаемую перекрытием экологических функций между видами разных

функциональных групп, которые существуют в одном масштабе. Конкуренция между видами многовидовых функциональных групп минимизируется, если члены группы, использующие одинаковые ресурсы, пользуются разными масштабами (Peterson et al., 1998). Вероятно, биоэкологические примеры цитируемого автора вполне могут быть отнесены и к ландшафту как природному комплексу, в котором подчиненность разных компонентов разномасштабным процессам (и одного компонента процессам нескольких масштабов) обеспечивает устойчивость целостного образования как способность восстанавливаться после нарушений. Устойчивость природных территориальных комплексов связана с их иерархическим рангом (Н.А. Солнцев, 1984). Фация может вместить наименьшее число компонентов, необходимых для независимого функционирования, поэтому это значительно ослабляет ее автономность к среде по сравнению с геосистемами других уровней; серийные геосистемы низких таксонов будут отличаться стабильностью, получая дополнительную энергетическую подпитку (Коновалова, 2004).

М. Тернер с соавторами (Turner et al., 1993), анализируя современные концепции устойчивости, указывают, что широко известная концепция мерцающей мозаики Ф. Борманна и Дж. Лайкенса (shifting mosaic steady-state concept) не всегда способна выявить равновесие из-за зависимости от масштаба. Эта концепция подразумевает сохранение стационарного состояния ландшафта (в примере авторов индицируемого биомассой) при изменчивости его внутренней структуры за счет постоянного «перемещения» пятен в разных сукцессионных состояниях внутри ландшафта, пропорция которых остается неизменной (Bormann, Likens, 1979; Likens, Bormann, 1995; Керженцев, 2006). Она применима, только когда нарушения небольшие и частые на большой гомогенной территории. Кроме того, концепция мерцающей мозаики подразумевает, что разрывы градиентов рельефа, почв, влажности и других факторов, влияющих на частоту нарушений, усредняются по ландшафту, что обычно не соответствует реальности. При пересечении экотонов между биомами происходит смена режимов нарушений и движущих сил, что делает понятие равновесия неприменимым. На примере модели мерцающей мозаики показано, что если учитывать разномасштабность процессов в экосистемах, то локальная нестабильность может приводить к стационарному состоянию в региональном масштабе (Jørgensen et al., 2007). Существует также концепция ландшафтного равновесия как стационарного процесса, при котором сообщество в точке может быть неустойчиво, но в целом долговременная последовательность изменений образует устойчивую систему, поскольку одна и та же последовательность повторяется после каждого нарушения. Концепция ограниченного равновесия считает систему, изменяющуюся без выхода за определенные границы, стохастическим аналогом равновесия. Для экологических исследований, возможно, больше подходит понятия *гомеоретической устойчивости* (возвращение к нормальной динамике), чем гомеостатической устойчивости (возвращение к ненарушенному состоянию). Существует концепция ограниченного равновесия (система меняется, но остается в некоторых границах), которая не избегла проблемы масштаба. Цитируемые авторы предложили методику и разработали имитационную модель разделения пространственных и временных масштабов на основании сравнения интервала между нарушениями с временем релаксации и площади нарушения с размером ландшафта (Turner et al., 1993). Использование этих отношений позволяет сравнивать ландшафты в широком диапазоне масштабов. Устойчивость к нарушениям оценивается на основании двух отношений: площади наруше-

ний к площади ландшафта и интервала между нарушениями к времени восстановления до стадии зрелости. Если интервал между нарушениями достаточно длительный по отношению к времени восстановления и нарушена относительно небольшая доля ландшафта, ландшафт считается устойчивым (традиционные равновесные системы). Если интервал между нарушениями сопоставим с временем восстановления и нарушена большая доля ландшафта, ландшафт устойчив, но очень мозаичен. Когда интервал между нарушениями становится существенно короче по сравнению с временем восстановления и нарушена большая доля ландшафта, ландшафт может быть неустойчив и перейти на другую траекторию развития. Сходные представления развивает Ю.Г. Пузаченко (1998).

В связи с развитием представления о наличии нескольких возможных устойчивых состояний оценка устойчивости ставится в зависимость от положения системы по отношению к точкам бифуркации. Чем ближе система к точке бифуркации, тем медленнее восстановление (меньше устойчивость). Приближение к любой точке радикальных изменений должно индицироваться изменением времени восстановления. (O'Neill, 1988). Распространено мнение, что по мере развития экосистемы связность ее элементов возрастает, специализация по экологическим нишам сужается (Jorgensen et al., 2007). Этому вопросу уделяется внимание в разделе 4.7.

Интересный предмет исследований — *соотношение устойчивости со степенью взаимной адаптации компонентов.* Установлено, что при неравновесных изменениях в пространстве существует много разных способов адаптации, при равновесных — все части меняются одинаковым образом (Phillips, 2006; Hugget, 2007). Ландшафты и рельеф рассматриваются как результаты проявления детерминистских законов, действующих в специфическом экологическом и историческом контексте, с разными результатами для каждой группы процессов и граничных условий (Hugget, 2007). В работе (Milns et al., 2010) выявляется характерный масштаб отношений между популяциями птиц, характеристиками рельефа и растительного покрова на основе байезианских сетей, показывающих наиболее вероятные связи между характеристиками популяций и местообитаниями. Авторы рассматривают версию о том, что преобладание *слабых связей при небольшом количестве сильных может быть условием устойчивости системы.*

Устойчивость ландшафта — понятие многомерное и полимасштабное. С одной стороны определяется свойствами собственной структуры ландшафта или его пространственного элемента. С другой стороны, ландшафт, как любая система, согласно теории иерархии, существует и функционирует в рамочных условиях, заданных свойствами системы более высокого ранга, задающей так называемые «константы» (O'Neill, 1988; Wu, David, 2002; Cushman, McGarigal, 2002; Burnett, Blaschke, 2003; Bailey, 2005; Chang et al., 2006). Локальные взаимодействия между компонентами существенны для организации и глобальной динамики сложных систем (Wu, David, 2002). Поэтому для понимания свойств ландшафта, их взаимоотношений, прогноза цепных реакций между свойствами, которые могут вывести ландшафт из равновесия, требуется полимасштабный анализ межуровневых взаимодействий (Vasconcelos et al., 1993). Иначе говоря, при описании и выявлении причин пространственной гетерогенности (то есть решения основной задачи географии) необходимо проверять гипотезы о том, в какой степени свойства ландшафта контролируются не внутренними процессами, а свойствами системы более высокого иерархического уровня. Соответственно, отдельная задача — определение размеров вышестоящей задающей константы системы, причем, возможно

не одной. На качественном уровне автор искал подходы к решению этой задачи в одной из ранних работ (Хорошев, 1995); в данной работе разрабатываются количественные подходы.

Полимасштабности ландшафтных процессов в последние два десятилетия посвящена обширная литература, опирающаяся на положения общей теории систем, теории сложных адаптивных систем, теории иерархии (Carlile et al., 1989; Vasconcelos et al., 1993; Cullinan et al., 1997; Haila, 2002; Perry, Enright, 2002; Hall et al., 2004; King et al., 2004; McMahon et al., 2004; Jin Yao et al., 2006; Kennedy et al., 2008). В теоретическом плане проблема иерархической организации ландшафта и полимасштабности подробно рассматривается в работах (O'Neill, 1988; Meentemeyer, 1989; O'Neill et al., 1989; Phillips, 2002; Dungan et al., 2002). В первых же публикациях были указаны типичные ошибки транспонирования информации между масштабами: макроотношения выводятся из микроотношений, выводы с макромасштаба переносятся на микромасштаб; перенос закономерностей одной популяции на другую внутри уровня (Meentemeyer, 1989).

В работе (Dungan et al., 2002) дается анализ терминологии и определений, связанных с проблемой масштаба. Выделены три категории применения концепции масштаба: 1) явления, 2) пространственные единицы опробования, 3) анализ данных. К основным понятиям отнесены:

а) протяженность, или пространственный охват (extent) — общий объем анализируемого пространства или размер множества данных:

б) зерно (grain) — размер элементарной единицы опробования-наблюдения, расстояние до ближайшего объекта опробования, мельчайшая единица измерения;

в) разрешение (resolution) — способность улавливать различия, не только пространственные, но и в свойствах (например, бледно-зеленый – ярко-зеленый пиксел);

г) лаг — интервал между соседними единицами; дистанция между центрами или между границами.

От размера и формы единиц опробования, лага и охвата может зависеть результат оценки среднего, дисперсии, пространственной автокорреляции, пространственной анизотропии, многомерных отношений, размера пятен и разрывов. Изменение масштаба в ландшафтной экологии трактуется как или изменение зерна, или изменение пространственного охвата, или и то и другое вместе (Dungan et al., 2002). По Р. Гарднеру (Gardner, 1998, цит. по: Dungan et al., 2002), масштаб — изменение структуры определенное пространственным или временным охватом измерений, необходимое для выявления существенных изменений вариабельности анализируемой характеристики.

К сожалению, в русскоязычной географической науке интерес к проблеме полимасштабности пока существенно ниже, чем в англоязычной ландшафтной экологии. Проблема изучается на многочисленных чисто экологических, ландшафтно-экологических, физико-географических примерах: разложения мертвой древесины (Kennedy et al., 2008), пространственной структуры растительного покрова водно-болотных угодий (King et al., 2004), варьирования морфологических свойств почв (Kachanoski, 1988), восстановления видового разнообразия в склерофильных лесах (Vasconcelos et al., 1993), влажности почв как фактора структуры растительного покрова (Lookingbill, Urban, 2004), распределения деревьев в парковой саванне в зависимости от перераспределения влаги по рельефу (Ben Wu, Archer, 2005), характера закустаривания в зави-

симости от обратных связей между почвами и растительностью (Turnbul et al., 2010), видового разнообразия подлеска в зависимости от почвенно-гидрологических факторов (Sweeney, Cook, 2001), структуры тропических лесов в зависимости от структур рельефа (Chang et al., 2006), отношений стока, эрозии и растительного покрова в семиаридных ландшафтах юго-запада США (Wilcox et al., 2003), структуры лесной покрова под воздействием ураганов в зависимости от рельефа и климата (Boutet, 2003), прогнозирования биомассы в зависимости от влажности почв при использовании как источников информации карт разного масштаба (Weishampel et al., 1999), химических свойств почв и почвенной биомассы в горной тундре (Oline, Grant, 2002), влияния топографического градиента и градиента накопления снега на почвенные показатели в альпийской тундре Скалистых гор (Litaor et al., 2002).

Для нелинейных систем, к числу которых относится ландшафт, важной задачей считается выявление *критических масштабов*, которые позволяют описать динамику системы в целом (Haila, 2002, Chang et al., 2006). Разрабатываются методы автоматического выделения пространственных структур в характерном для них масштабе на основании не волевого решения исследователя о пороговых значениях, а объективного выявления порогов по скачкам дисперсии в континууме (лестнице) масштабов (Wu, Loucks, 1995; Hall et al., 2004; Couteron et al., 2006; Zurlini et al., 2007). Совпадение характерных пространственных масштабов варьирования свойств ландшафта может указывать на прямые взаимодействия компонентов (Meisel, Turner, 2002).

В качестве теоретической основы для иерархического моделирования пространственной организации разработана парадигма иерархической динамики пространственных единиц-пятен (hierarchical patch dynamics paradigm — HPDP) (Wu, Loucks, 1995; Wu, David, 2002). Она интегрирует теорию иерархии и теорию динамики пространственных единиц. Парадигма подчеркивает динамичность отношений между пространственными структурами, процессами и масштабом в ландшафтном контексте. На первом шаге выявляются адекватные задачам иерархии пространственных единиц (пятен, в терминологии авторов). На втором шаге на основании наблюдений разрабатываются модели для фокальных уровней. Для каждого экологического процесса выявляются один или несколько основных масштабных уровней. На третьем шаге информация экстраполируется в некотором диапазоне масштабов (Wu, David, 2002).

Канадскими исследователями из университета Монреаля предложена процедура объекто-специфичного анализа и масштабирования, когда автоматическими средствами для каждого пиксела на снимке последовательным увеличением размеров скользящего квадрата вычисляют пороги резкого изменения дисперсии значений яркости, соответствующие выходу за пределы данного иерархического уровня пространственной организации (Hay et al., 2001). Каждый пиксел рассматривается как часть объекта и используется для выявления протяженности объекта. Обычный подход — анализ дисперсий при меняющемся разрешении. Скачок дисперсий должен указывать на смену иерархического уровня. Метод объектоспецифичного анализа не пытается выявить некое оптимальное разрешение, которого вообще не существует для гетерогенных систем. Вместо этого разные оптимальные разрешения определяются для разных объектов. Выявляется естественная пространственная единица, т.е. определяется площадь пространственного влияния пиксела, относительно однородная территория. Затем на основании значений среднего, дисперсии и площади однородного пространства выводится весовой коэффициент для агрегирования изображения на следующем, более вы-

соком иерархическом уровне, т.е. для выявления эмерджентных самоорганизующихся пространственных структур. Методика позволяет выявить критические пороги в полимасштабной организации ландшафта. Каждый пиксел изображения участвует, таким образом, в собственной иерархической «лестнице». Авторы считают, что проблема меняющейся пространственной единицы (modifiable areal unit problem — MAUP) минимизируется. Метод полезен для определения критических масштабных порогов, границ экотонов. Позже (Hall et al., 2004) авторы интегрировали объекто-специфичный анализ и сегментацию водосборов. Предложен полимасштабный подход *к автоматическому выделению пространственно доминирующих ландшафтных объектов*. Для каждого пиксела строится кривая изменения дисперсий по мере увеличения скользящего окна. При достижении порога фиксируется среднее значение в окне данного размера и соответствующая площадь окна. Это позволяет сопоставить с каждым пикселом принадлежность его к вышестоящей системе с известными размерами. Таким образом, определяется оптимальный масштаб анализа для каждого пиксела. В отличие от HPDP, лестница масштабов имеет неравномерные промежутки между ступенями, размер этих промежутков определяется пространственными характеристиками анализируемого объекта. Для каждого объекта-пиксела — своя лестница масштабов. В каждом масштабе проявляется свой набор ландшафтных объектов.

Австрийскими исследователями на основе парадигмы HPDP разработана методология полимасштабного сегментирования — шаг от пиксельноориентированного анализа к объектоориентированному; многие масштабы исследуются на одном и том же массиве данных (Burnett, Blaschke, 2003). Для того чтобы увеличить эффективность методологии мониторинга в экологическом анализе, они считают необходимым оптимизировать пространственные и временные разрешения, максимизировать объем информации из каждого слоя, объединить информацию из слоев с разным пространственным и временным разрешением. Через *полимасштабную сегментацию* авторы выявляют градиенты потоков между ландшафтными единицами. В основе работы концепция ландшафта как континуума процессов, который может быть подвергаться разложению. Авторы обращают внимание, что проблема MAUP — не проблема как таковая, а природа реальных иерархически структурированных систем. Пиксельный подход ими критикуется за игнорирование концепции иерархии и масштаба, т.к. обычно это мономасштабное исследование.

Возможное существование нескольких масштабов, определяемых несколькими уровнями разрешения, проанализировано в работе (Carlile et al., 1989). Этими авторами предложена пространственная модель для выявления наиболее *подходящих уровней разрешения* для измерения распределения растений, основанная на допущении мозаики наложения факторов среды. Растительный покров характеризуется мозаикой перекрывающихся единиц, размер которых определяет внутренний присущий масштаб для растительного покрова.

Интересный пример приведен в работе о структуре корреляций между ландшафтными и температурными показателями (Saunders et al., 1998). Рассчитаны корреляции между парами почвенных, растительных и температурных показателей в разных масштабах методом вейвлет-трансформации. Судя по плавному снижению вейвлет-дисперсий без скачков по мере увеличения масштаба, не подтвердилась *гипотеза о существовании доминантного масштаба варьирования* температур. То есть природа пространственных структур континуальна. В то же время выявлен масштаб, в котором лучше проявляются

температурные градиенты. Также установлена бимодальная структура корреляций между растительными и температурными показателями, что интерпретировано как свидетельство дискретного характера взаимоотношений, наличия нескольких основных «рекуррентных» масштабов взаимодействия. Поставлен вопрос о естественной или антропогенной природе бимодальности. По результатам работы сделан важный практический вывод: подразделять территорию (особенно в целях охраны) только по растительности некорректно — вполне ландшафтный, в нашем понимании, вывод. Например, температурные контрасты и внутрисуточные перепады температур могут быть существенным фактором связности-фрагментарности местообитаний для эктотермных животных (в большей степени, чем границы растительных сообществ).

Огромное количество работ посвящено исследованию *влияния изменения масштаба* на результаты анализа пространственной структуры ландшафта (Turner et al., 1989; Meentemeyer, 1989; Obeysekera, Rutchey, 1997; Wu et al., 2000, 2004; Buyantuev, Wu, 2007). Выделен следующий набор основных вопросов, связанных с использованием традиционных для ландшафтной экологии (McGarigal, Marks, 1995) пространственных метрик (Wu, 2004):

- ✓ Как меняются значения метрик при изменении зерна и охвата?
- ✓ Различается ли поведение ландшафтных метрик при изменении масштаба в разных ландшафтах?
- ✓ Существуют ли общие постоянные для всех ландшафтов правила перевода информации из одного масштаба в другой?
- ✓ Могут ли существовать масштабно-инвариантные пространственные структуры с простыми аллометрическими правилами масштабирования?
- ✓ Значит ли это что один и тот же процесс контролирует возникновение структур в разных масштабах?

Считается, что эффект изменения разрешения более предсказуем, чем эффект изменения территориального охвата (Wu, 2004).

При анализе процессов в конкретном элементе ландшафта большое значение придается *взаимодействию его с соседними* и удаленными элементами посредством потоков вещества и энергии, что требует учета позиционных факторов (Нееф, 1974; Сочава, 1978; Vasconcelos et al., 1993; Крауклис, 1997; Burnett, Blaschke, 2003).

Большинство пространственных моделей исходят из допущения, что состояние пиксела не *зависит от соседних пикселов*, исключение — модель клеточного автомата (Weaver, Perera, 2004). Моделирование поведения каждого пиксела по отдельности может приводить к ошибкам в прогнозе и планировании, например к фрагментации единого местообитания. Проблема зависит от масштаба. Моделирование для малых пикселов должно больше внимания уделять пространственной зависимости, чем для больших. В цитируемой работе рассчитаны индексы пространственной зависимости Морана, территория разделена на регионы с пространственной зависимостью и без таковой. В регионах с пространственной зависимостью вероятности перехода пиксела из одного состояния в другое корректировались (взвешивались), в пространственно независимых — нет. Доказана разница пространственных индексов для смоделированной ландшафтной структуры с учетом и без учета пространственной зависимости (Weaver, Perera, 2004).

На примере водно-болотных экосистем Эверглейдс разработан полимасштабный способ опробования, учитывающий как собственные свойства центроида кластера,

так и свойства непосредственно соседствующих участков и участков, отстоящих на заданное расстояние (King et al., 2004). Тем самым проверяется гипотеза *о влиянии процессов разного масштаба на варьирование* растительного покрова, связанных со свойствами пространственной структуры, химических свойств почв, гидрологических и физических нарушений (пожаров). Варьирование растительного покрова описывается, во-первых, вдоль градиента антропогенного воздействия, во-вторых, под воздействием дискретных уровней воздействия, в третьих, под воздействием контрастов мелкомасштабных и крупномасштабных пространственных структур. Авторы пришли к выводу, что при интенсивном антропогенном воздействии фактор пространственной близости вносит решающий вклад в варьирование растительного покрова, в то время как в ненарушенной зоне господствуют местные экологические факторы. Полимасштабная модель влажного склерофильного леса, подверженного периодическим пожарам (Vasconcelos et al., 1993) исходит из положения, что исследование ландшафтов как вложенных (гнездовых) иерархических систем требует анализа как взаимодействия между компонентами одного уровня, так и между компонентами и системами более высокого уровня. Поэтому особое внимание при исследовании послепожарной динамики эти авторы уделяют, помимо свойств самой единицы, пространственному положению в ландшафте и взаимодействию с соседними единицами.

Влияние пространственного взаиморасположения элементов ландшафта на сток моделировалось для условного наклонного ландшафта с однонаправленным потоком с двумя типами элементов со случайным расположением при разной пропорции, один из которых источник вещества, другой — поглотитель (Gergel, 2005). Сравнивались средние значения и вариабельность в количестве поглощаемого вещества при тысячекратном конструировании ландшафта со случайным расположением элементов при одинаковом площадном соотношении двух элементов. В этом случае вариабельность определяется только разницей в расположении элементов в пространстве. Оказалось, что при малой или большой доле элементов-источников *пространственное расположение играет второстепенную роль, но основное значение для поглощения вещества имеет их площадь.* При средней же доле пространственное расположение выходит на первый план, определяя основное варьирование.

Констатировать факт полимасштабности явно недостаточно. Неоходима разработка методов *разделения вкладов разномасштабных процессов* в варьирование исследуемой характеристики ландшафта (Borcard, Legendre, 1994, 2002; Cushman, McGarigal, 2002; Jin Yao et al., 2006). Описан опыт исследования зависимости пространственных структур мертвой древесины от 98 характеристик климата, рельефа, землевладения в четырех масштабах — от участка до части бассейна — посредством регрессионного анализа (Kennedy et al., 2008). Для каждой группы характеристик установлен масштаб, в котором они влияют на распространение и разложение мертвой древесины. Установлено, что широкомасштабные климатические факторы могут быть замаскированы среднемасштабными факторами нарушений. На примере пустыни Чихуахуа (Jin Yao et al., 2006) и проблемы опустынивания исследованы вклады факторов, действующих в трех масштабах (растение, пятно, ландшафтная единица) в пространственную вариабельность травяного покрова. Применено иерархическое разделение дисперсии по значениям коэффициента детерминации r^2. Независимый вклад каждого фактора определялся с использованием Пирсоновского коэффициента корреляции как среднее из объясненной дисперсии по всем регресси-

онным моделям, в которых фактор был значим. При исследовании *характерных масштабов пространственного варьирования* почвенной влажности и топоклиматических характеристик использован анализ полувариограмм (Lookingbill, Urban, 2004). Комбинированное регрессионное уравнение показало, что около 50% варьирования влажности объясняется разномасштабными факторами рельефа и климата, в т.ч. уклонами, расстоянием до водотоков, топографическим индексом конвергентности, экспозицией, потенциальной радиацией. Высокая nugget-дисперсия показывает, что почвенная влажность не описывается на ландшафтном уровне и подчиняется микромасштабным факторам, не описываемым при выбранном разрешении. Получен вывод, что факторы, контролирующие летний водный баланс, и сама почвенная влажность варьируют в множестве пространственных масштабов. Исследование последствий ураганов в лиственных лесах запада США методами автокорреляции и расчета фрактальной размерности показало, что ураган приводит к росту случайности пространственной структуры в локальном масштабе (до 100 м) и к формированию неслучайных структур, связанных с рельефом, погодой, характеристиками древостоев, в ландшафтном масштабе 10–500 км (Boutet, 2003). В работе, посвященной связи пространственного варьирования населения птиц с ландшафтной структурой (Cushman, McGarigal, 2002), для разделения объясняемой дисперсии на независимую и связанную составляющие, применена серия частных канонических ординаций, что позволяет оценить относительную значимость факторов, действующих на разных иерархических уровнях. Исследования на катенах в альпийской тундре Скалистых гор установили, что вклады топографических градиентов, криотурбаций, эоловой седиментации, биологической активности, литологических контрастов в варьирование свойств почв проявляются на разных иерархических уровнях (Litaor et al., 2002).

Для сравнительной оценки вкладов экологической и пространственной составляющих в варьирование исследуемых свойств ландшафта предложен ряд методов, основанных на автокорреляции, тесте Мантела, канонической ординации, Фурье-анализ (Legendre, 1993; Couteron et al., 2006; Cross, Perakis, 2011). В работе (Musio et al., 2007) использована общая аддитивная смешанная модель (General additive mixed model) с применением байезианского подхода для разделения вкладов характеристик конкретного дерева, характеристик местообитания и пространственного эффекта (географического положения) для объяснения дефолиации. Метод имеет преимущества перед линейными регрессионными моделями: позволяет комбинировать бинарные, порядковые и континуальные независимые переменные, учитывает пространственную корреляцию, учитывает нелинейную составляющую. Нейтральная модель случайного распределения элементов в пространстве ландшафта применяется как эталон для оценки вклада топографических ограничений и фактора развития городов в формирование структуры лесного покрова (Gardner, Urban, 2006). Определен универсальный критический порог доли одного из двух существующих элементов условного модельного ландшафта, при котором обязательно обеспечивается проницаемость ландшафта для миграции — 0,5928 (Gardner et al., 1987).

Поскольку, как уже упоминалось выше, потребности практики в большой степени стимулировали интерес к проблеме масштаба, значительный пласт исследований посвящен применению концепции полимасштабности к *целям территориального планирования* и выбора оптимального масштаба для планировочных решений, в том числе для охраны биологического разнообразия и создания экологических сетей

(Papadimitriou, Mairota, 1996; Wickham et al., 2007; Strayer et al., 2003; Wamelink et al., 2003; Waldhardt et al., 2004). Существует проблема выбора масштаба и базовой единицы для принятия решений в землепользовании и оценки его влияния на биологическое разнообразие (Turner et al., 1989; Tischendorf, 2001; Gustafson et al., 2004). Например, рассчитано видовое богатство при меняющемся размере окна опробования для двух участков с разной структурой угодий при двух сценариях землепользования на основе частоты и вероятности обнаружения вида (Waldhardt et al., 2004). В концептуальной модели, связывающей нарушения землепользования с масштабами пространственных структур и с реальным землепользованием (Zurlini et al., 2007) разделены ареалы с разными характерными масштабами нарушений. Рассчитана относительная площадь нарушений в скользящем окне разных размеров. Использована мера вероятности примыкания очагов нарушения. Точкой отсчета является точка конвергенции – показатели для региона в целом («глобальная величина»). Кластерный анализ применен для классификации точек по сходству мультимасштабных профилей изменения вероятностей при изменении масштаба (размера окна). Группировка кластеров мультимасштабности на карте сопоставлялась с реальными географическими регионами. Метод применим к оценке успешности миграции при нарушениях и различий между ядровыми и экотонными видами. Скачки на мультимасштабном профиле знаменуют границы между диапазонами масштабов, внутри которых *пространственные структуры самоподобны,* т.е. не меняются или меняются монотонно при изменении масштаба.

Таким образом, к настоящему времени сформулированы следующие важные для нашей работы элементы концепции масштаба в науке о ландшафте.

1. Каждое свойство ландшафта, как правило, отражает процессы, происходящие на разных иерархических уровнях ландшафтной организации. Поэтому для объяснения варьирования разных свойств могут потребоваться разные иерархические построения (специфическая лестница масштабов).
2. Для понимания структуры и функционирования ландшафта необходимо учитывать наложение относительно самостоятельных иерархий факторов пространственной дифференциации.
3. Совпадение характерных пространств варьирования свойств может рассматриваться как признак наличия связей-взаимодействий между соответствующими компонентами ландшафта.
4. Математический вид межкомпонентных связей может различаться в зависимости от масштаба.
5. По скачкам характеристик вариабельности можно выявить критические пороги варьирования и характерные масштабы ландшафтных процессов и свойств компонентов.
6. Могут быть выявлены свойства ландшафта, для которых не существует доминантного масштаба варьирования и которые подчиняются континуальным пространственным структурам.
7. Для некоторых свойств ландшафта и межкомпонентных связей могут существовать диапазоны масштабов, в которых пространственная организация свойств и межкомпонентные связи самоподобны; одновременно могут существовать критические пороги, которые знаменуют смену типа связи.

Актуальные проблемы исследования полимасштабности ландшафтной организации автору видятся следующим образом.

1. Недостаточно разработаны методы анализа вклада геосистем высших иерархических уровней на свойства геосистем низших уровней.
2. Требуется установить регионально-специфичные соотношения местных (вертикальных, межкомпонентных) и пространственных факторов варьирования свойств компонентов ландшафта.
3. Ощущается необходимость накопления региональных примеров, как оцениваются вклады разномасштабных факторов в варьирование свойств компонентов.

Итак, по мнению автора, в современном ландшафтоведении и ландшафтной экологии остается слаборазработанным ряд вопросов, на решение которых направлена данная работа.

Во-первых, преобладающие в ландшафтно-экологической литературе модели либо отражают межкомпонентные отношения на одном иерархическом уровне (локальном или региональном), либо — чаще — отражают иерархическую организацию какого-либо одного компонента или его свойства (Hay et al., 2001, Lookingbill, Urban, 2004; Коломыц, 2008 и др.) за редким исключением (Bian, Walsh, 1993; Lobo et al., 1998). Проблема выявления иерархической пространственной организации природы решается преимущественно на примере «ландшафтного покрова», т.е. визуально различимого на дистанционных и картографических материалах сочетания типов растительного покрова (в сильноосвоенных районах — типов земельных угодий) (Cullinan et al., 1997; Fuhlendorf et al., 2002). По выявленным пространственным структурам разных иерархических уровней делаются выводы о природе сформировавших их процессов и связанных с ними свойствами других компонентов. Мы предлагаем способы «пространственной развертки» межкомпонентных отношений и выстраивания *иерархии не избранного компонента, а их взаимосвязанных плеяд*, что более соответствует традиционным задачам ландшафтоведения. Это позволяет выявить основания для определения информативных признаков ландшафтного картографирования на разных иерархических уровнях организации геосистем.

Во-вторых, в представленной работе рассматривается мало исследованный в ландшафтоведении вопрос о *зависимости результатов оценок межкомпонентных связей от количества наблюдений, территориального охвата, размера выбранной операционной единицы* (проблема MAUP), которая обозначена достаточно давно, но продолжает оставаться в числе недостаточно изученных.

В-третьих, внедрение системных принципов в науку о ландшафте требует четкого обоснования положения и функциональной роли исследуемых объектов в системе более высокого порядка (надсистеме). Следовательно, свойства каждого компонента ландшафтной единицы должны интерпретироваться не только как результат взаимодействия с другими компонентами, но и как проявление эмерджентного эффекта, возникающего в надсистеме, не свойственного составляющим ее элементам по отдельности. В ландшафтной экологии, возникшей именно как реакция на недостаток учета пространственного фактора в экологических моделях, большое значение придается размерам, конфигурации, соседству пространственных единиц (Weaver, Perera, 2004; Forman, 2006). В русскоязычном ландшафтоведении хорологический аспект на протяжении нескольких десятилетий оставался на периферии внимания исследователей, за исключением геохимии ландшафта. Автор предлагает модель межкомпонентных

отношений именно исходя из *анализа влияния соседних геосистем (эмерджентного эффекта надсистемы, охарактеризованной через ее пространственную структуру)*, в совокупности образующих вмещающую геосистему более высокого ранга.

В-четвертых, в отечественной ландшафтоведческой литературе мало разрабатывалась проблема *количественной оценки вкладов разномасштабных процессов* в пространственную дифференциацию свойств ландшафта и их связей, хотя гораздо большее внимание она привлекает в англоязычной литературе. Автор развивает метод ранжирования факторов пространственной дифференциации на основе количественной оценки тесноты межкомпонентных отношений и выявления характерного пространства реализации этих отношений.

В-пятых, оценки тесноты межкомпонентных связей и иерархического уровня их проявления могут лежать в основе оценок разных видов устойчивости геосистем. Существенный вклад в развитие этих представлений внес Э.Г. Коломыц и его сотрудники (Коломыц, 1984, 2008; Залиханов и др., 2010), но в основном публикации по теме носят сугубо теоретический характер. Важный малоизученный аспект проблемы устойчивости — *пространственное варьирование межкомпонентных отношений, а также изменение их характера во времени*. Поэтому необходимо четко оговаривать ландшафтные условия проявления межкомпонентных связей, выявлять локализацию в пространстве ареалов с разными типами отношений между компонентами, учитывать специфику отношений на разных этапах развития геосистемы. В данной работе мы предлагаем *индуктивный способ идентификации и картографирования целостных мозаичных геосистем с единым фактором дифференциации* на основе концепции полиструктурности ландшафта. Целостные геосистемы выявляются по критерию совпадения характерного пространства парциальных геосистем, отражающих многообразие механизмов пространственной организации ландшафта. Хотя концепция полиструктурности ландшафта получила довольно широкое признание, примеры картографирования на ее основе единичны (Гродзинський, 2005; Хорошев, 2005б; В.Н. Солнцев и др., 2006). Автор разделяет мнение (Гродзинський, 2005), что традиционная концепция морфологической структуры ландшафта представляет собой частный случай более общей концепции полиструктурности. В зависимости от целей исследования и конкретной географической ситуации может оказаться адекватным тот или иной способ картографирования ландшафтной структуры. В работе демонстрируется вероятностный подход к решению *проблемы объективности ландшафтных границ*. В зависимости от принадлежности к одному или другому типу межкомпонентная связь может выступать как индикатор разных видов устойчивости — инертности, эластичности или пластичности. В зависимости от положения территориальной единицы по отношению к границам ареалов типов связей мера устойчивости также может различаться. В данной работе исследуется вопрос о соотношениях между характерным пространством, ареалами проявления связей, видом связей и возможной реакцией геосистем на внешние воздействия разного пространственного масштаба. Знание о характерном пространстве ландшафтообразующих процессов рассматривается как основа для адаптации ландшафтно-планировочных решений к иерархическим уровням организации ландшафта.

В табл.1 перечень актуальных проблем науки о ландшафте сопоставлен с задачами работы и подходов к их решению, которые описываются в нижеследующих главах.

Таблица. 1.

Задачи работы в контексте современной проблематики науки о ландшафте

Проблема в науке о ландшафте	Суть проблемы	Задача работы	Подход к решению задачи	Глава
1	***2***	***3***	***4***	***5***
Проблема выявления иерархической организации природных комплексов	Большинство ландшафтно-экологических моделей либо отражают иерархическую организацию какого-либо одного компонента, либо отражают межкомпонентные отношения на одном иерархическом уровне.	Разработать метод выявления иерархических уровней геосистем на основе информации о межкомпонентных отношениях.	Процедура полимасштабного анализа компонентной структуры географического ландшафта.	2
Проблема региональной специфики межкомпонентных отношений	Межкомпонентные отношения рассматриваются как пространственно-инвариантные.	Определить межрегиональную общность и региональную специфику межкомпонентных отношений в ландшафте.	Сравнительный анализ статистических моделей межкомпонентных связей для ряда регионов, различных по зональной принадлежности и геолого-геоморфологическим условиям.	4.2
Проблема меняющейся пространственной единицы	Результаты оценок межкомпонентных связей варьируют в зависимости от размера выбранной операционной единицы, количества наблюдений, территориального охвата.	Оценить влияние ландшафтного разнообразия территории на результаты количественной оценки тесноты межкомпонентных связей.	Сравнение результатов количественной оценки тесноты межкомпонентных связей при варьировании размера операционной территориальной единицы и территориального охвата.	4.3
Проблема эмерджентных эффектов пространственной структуры ландшафта. Проблема транспонирования информации между масштабами	Большинство разрабатываемых пространственных моделей исходят из допущения, что состояние операционной территориальной единицы не зависит от соседних единиц. Примеры картографирования на основе концепции полиструктурности единичны.	Выявить основания для определения информативных признаков ландшафтного картографирования на разных иерархических уровней организации геосистем.	Статистическое моделирование зависимости свойств операционной территориальной единицы от характеристик пространственной структуры геосистем более высоких рангов.	4.4

Таблица (*продолжение*)

1	*2*	*3*	*4*	*5*
Проблема разделения вкладов факторов в ландшафтную дифференциацию	Слабо разработаны методы количественной оценки вкладов разномасштабных процессов в пространственную дифференциацию.	Дать сравнительную оценку вкладов детерминированной составляющей, связанной с принадлежностью к геосистеме более высокого ранга, и составляющей саморазвития (внутриуровенных и межуровневых взаимодействий).	Сравнительная оценка эмерджентных эффектов внутриуровенных межкомпонентных отношений и эмерджентных эффектов межуровневых отношений.	4.5
Проблема пространственного варьирования межкомпонентных отношений	Возможности ландшафтной индикации и пространственного планирования ограничены из-за слабой изученности вопроса об изменениях тесноты и вида межкомпонентных связей в пространстве.	Установить локальные условия (пространственные рамки) реализации разных типов отношений.	Индуктивный способ идентификации и картографирования целостных мозаичных геосистем с единым фактором дифференциации.	4.6
Проблема динамики межкомпонентных связей	Возможности ландшафтной индикации и прогноза ограничены из-за слабой изученности вопроса об изменениях тесноты межкомпонентных связей во времени.	Выявить специфику структуры межкомпонентных отношений на разных стадиях эволюции и динамики ландшафта.	Сравнительный анализ плеяд связей, формирующихся на разных сукцессионных стадиях.	4.7
Проблема объективности ландшафтных границ	Единство критериев выделения ландшафтных единиц на основе детерминистской концепции не достигнуто, что оборачивается несовпадением результатов ландшафтного картографирования разных исследователей для одной территории.	Создать технологию экстраполяции информации о наиболее вероятных состояниях компонентов ландшафта на основе знания об иерархических уровнях проявления межкомпонентных отношений.	Вероятностное картографирование парциальных ландшафтных структур и оценка неопределенности классификационной принадлежности.	4.8

Таблица (*продолжение*)

1	*2*	*3*	*4*	*5*
Проблема адаптации планировочных решений к иерархической организации ландшафтообразующих процессов	В территориальном планировании решения принимаются преимущественно на основании собственных свойств пространственной единицы без учета рамочных условий, накладываемых геосистемами более высокого ранга.	Предложить методические подходы для учета полимасштабной организации ландшафта в ландшафтно-планировочных решениях.	Прогноз изменения целевого показателя при изменении ландшафтной структуры на основе идентификации ареалов однотипных межкомпонентных отношений.	5

Глава 2

Теоретико-методологические основания полимасштабного анализа структуры ландшафта

В главе 2 представлен обзор общих подходов автора к полимасштабному анализу структуры ландшафта. Методы реализации этих подходов описываются в главе 3, а примеры реализации — в главах 4 и 5.

2.1. Причины пространственной вариабельности

Фундаментальный вопрос географического исследования вообще и ландшафтно-географического исследования в особенности может быть сформулирован следующим образом: почему то или иное свойство может принимать разные значения на разных участках пространства? Ответ может заключать несколько вариантов: 1) наличие естественного диапазона допустимых состояний; 2) влияние других тел и потоков, независимых от расположения в пространстве; 3) локальные различия свойств пространства.

Первый вариант подразумевает наличие *естественного диапазона допустимых состояний, «физического запрета», ограниченного самой природой исследуемого свойства* (Козловский, 1991). Пребывание в том или ином отрезке допустимого диапазона определяется стадией развития. Например, сосновый древостой может иметь высоту порядка первых десятков метров. Если измеренная высота составляет, допустим, 10 м, то это может означать просто раннюю стадию развития древостоя. Высота в этом примере может никак не зависеть от других свойств ландшафта. Другой вопрос — скорость прохождения древостоем «положенных» ему по природе стадий; на нее может влиять множество внешних по отношению к еловому древостою причин. Однако те же 10 м высоты соснового древостоя могут означать верхний предел роста в условиях верхового болота.

Второй вариант подразумевает, что различия от места к месту обусловлены *влиянием других тел и потоков, независимых от расположения в пространстве.* Часть свойств биотических компонентов подчиняется исключительно внутрифитоценотическим процессам. Диагностическим признаком этой группы свойств является отсутствие статистически достоверных связей со свойствами почв, вод, отложений, рельефа. Это свойства, пространственное варьирование которых объясняется процессами, распределяющимися в пространстве ландшафта случайным образом. Например, несколько сосновых насаждений одного возраста могут имеют разную высоту, но это объясняется действием других элементов растительного покрова. Можно представить, что в одном случае сосновый древостой развивался на вырубке, расчищенной от подроста

других пород, кустарников, трав, мхов, а в другом — после вырубки с сохранением напочвенного покрова и подроста других пород. Тогда различия в высоте спустя несколько лет могут быть объяснены разной напряженностью межвидовых конкурентных взаимодействий. При прочих равных условиях результат (высота соснового древостоя) никак не зависит от свойств пространства, в котором он достигается. Другими примерами могут быть мозаика фитоценозов, обусловленная ветровалами, оконной динамикой древостоя, сгущением обилия видов растений вследствие жизнедеятельности животных.

Можно допустить и некоторую регулярность распределения этих свойств в пространстве. Так, градиент обилия вида может быть связан со степенью удаленности от источника семян (от куртины семенников, от края опушки), с траекторией ветровала, с расположением гнезд птиц и т.п. На фациальном уровне возможно случайное возникновение куртин кустарничков, мхов, трав. Иногда куртина первоначально возникает не случайно, а, например, при специфических условиях нанорельефа (ложбина, западина), но впоследствии выходит вследствие саморазвития за границы этой формы. Тогда, в статистическом смысле, связь размывается и следует говорить не о литогенно обусловленном распределении, а о результате чисто фитоценотического процесса саморазвития. Тогда на момент измерения эти градиенты не обусловлены свойствами других компонентов ландшафта. Масштаб их проявления обусловлен характерным пространством и временем порождающего их биотического процесса (например, максимальной дальностью ветрового разноса семян ели, сосны, березы и т.д.). С точки зрения устойчивости, такие «абсолютно независимые» свойства ярусов фитоценоза подвержены наиболее легким сукцессионным изменениям (низкая инертность) и прежнее состояние само по себе не восстанавливается, а лишь – при возобновлении действия породившего их процесса. К этой же серии относятся давно выявленные понятия «спутники ели», «спутники дуба» и т.д. Даже если древостой образовался в результате посадок, не согласованных с почвенными условиями, может возникнуть характерный травостой, например, теневыносливые травы под еловым пологом или полное отсутствие травяного яруса (само по себе свойство фитоценоза) в перегущенном сосновом жердняке. Причиной тесной связи ярусов в таком случае является часто биофизическое или биохимическое воздействие (тень, микроклимат, корневые выделения и др.).

Третий вариант подразумевает, что *причина различий от места к месту кроется в свойствах пространства*. Пусть, как и в предыдущем варианте, высота сосняка различается из-за разной напряженности конкуренции с другими видами, но представим иные исходные условия. Предшествующая вырубка была произведена одинаковым образом с сохранением подроста, но на одном участке основной конкурент — ель — растет медленно, а на другом быстро и через несколько десятилетий начинает угнетать сосну. Причина различий высоты сосны вроде бы та же самая — отношения с елью, — однако в эти отношения вмешивается некий третий участник, который и определяет разную степень «агрессивности» конкурента. Это может оказаться разное положение уровня грунтовых вод, разная гумусированность или оглиненность почвы, разный радиационный баланс и т.д.

Допустим, причина кроется в разной мощности элювиального горизонта почв. По одному сценарию, мощность элювиального горизонта (и, следовательно, доступность элементов минерального питания) в свою очередь зависит от древостоя. На одном из сравниваемых участков перед вырубкой долгое время существовал ельник, который и поспособствовал глубокому выщелачиванию и развитию подзолистого горизонта. На другом участке

вырубка произошла в мелколиственном лесу, за время существования которого оподзоливание происходило с меньшей интенсивностью, и почва содержит большее количество питательных веществ. Тогда исход конкурентных взаимоотношений будет определяться состоянием третьего участника — почвы. Однако сама почва — результат местных вертикальных взаимодействий между компонентами ландшафта. По другому сценарию вырубке в обоих местах предшествовал одинаковый древостой, и разная оподзоленность почвы имеет место по другой причине, которая не объясняется собственными свойствами местоположения и местными вертикальными взаимодействиями. Почвы разные, потому что одно местоположения дренируется лучше другого, так как расположено на узком плоском междуречье в окружении склоновых урочищ, а другое — на тоже плоском, но широком междуречье на большом удалении от склонов. По этому сценарию для объяснения высоты соснового древостоя конкурентными взаимодействиями с елью недостаточно констатировать почвенные контрасты. Приходится привлекать пространственный фактор: результат разный из-за разного ландшафтного соседства. Иначе говоря, два участка принадлежат разным системам более высокого порядка, которые диктуют разные «рамочные условия», или допустимые диапазоны состояний.

Приведенные рассуждения показывают необходимость различать две группы причин пространственных различий свойств ландшафта. Одна группа - взаимовлияние компонентов геосистемы на некотором «нулевом» иерархическом уровне ландшафтной организации (уровень «0»). Другая группа — влияние параметров надсистемы более высокого иерархического уровня («+1»). Он состоит из множества элементов «нулевого уровня», которые в совокупности создают эффект, не свойственный каждому элементу по отдельности, то есть э*мерджентный эффект* надсистемы. В приведенном выше примере эмерджентный эффект заключается в положении уровня грунтовых вод и, соответственно, степени дренированности, обусловленной набором и количественными соотношениями междуречных и склоновых элементов.

В нашей работе ключевое значение придается именно эмерджентным эффектам в надсистеме, которые оказывают влияние на состояние компонентов изученных в поле геосистем. Ниже для этого аспекта применяется термин «*межуровневые взаимодействия*». Для обозначения *внутриуровенных взаимодействий* между разнокачественными природными телами будем применять, для избежания путаницы, термины «*компонентная структура*» и «*межкомпонентные связи*». В географической литературе имеются указания на то, что относительная значимость двухмерного (горизонтального) и трехмерного (в нашем случае — межкомпонентного) аспектов анализа структуры природных систем зависит от масштаба исследования: по мере увеличения масштаба (роста разрешения, дробности анализа) возрастает относительная значимость вертикального трехмерного аспекта отношений (Meentemeyer, 1989). *Основной сюжет нашей работы — сравнение вкладов внутриуровенных и межуровневых взаимодействий в формирование пространственных различий.* При реализации этой задачи в работе учитываются отношения между собственными свойствами ПТК, а также проводится экстраполяция значений свойств по территории на основе регрессионных уравнений, что соответствует признакам скрыто-пространственных моделей (Peters et al., 2007). Кроме того, учитывается позиция в ландшафте или соседство, что близко к модели явно-пространственного типа в терминологии публикации (Peters et al., 2007).

2.2 Эмерджентные эффекты пространственной структуры геосистем

Итак, при анализе отношений, возникающих между многочисленными свойствами ландшафта, приходится выявлять тот иерархический уровень ландшафтного разнообразия, который ответственен за пространственную дифференциацию каждого из них. Приходится различать межуровневые и внутриуровенные отношения. Первые — это константы, рамочные условия, навязанные надсистемой элементам системы, вторые — отношения между элементами системы.

Сразу возникает законный вопрос: как определить границы системы? Она будет иметь право называться геосистемой при соблюдении ряда условий: возможностей определить ее границы в географическом пространстве и, соответственно, размеры, выявить системообразующий процесс, установить эмерджентные свойства, не свойственные каждому из элементов по отдельности. Целостность ее будет определяться: 1) единым правилом внутренней дифференциации вертикальной структуры, которое связывает свойства компонентов, 2) наличием эмерджентных свойств, обусловленных взаимодействием пространственных элементов, то есть горизонтальной структурой. Индикатором наличия единого для всей геосистемы правила внутренней дифференциации вертикальной структуры может служить доказанная достоверная связь между свойствами компонентов. Само разнообразие состояний каждого компонента при достоверной связи между ними доказывает наличие внутренней дифференциации геосистемы, то есть наличие подсистем. Но только обнаружение единого правила межкомпонентной связи доказывает единство самой геосистемы. Например, в таежном ландшафте правило может быть таким: чем круче склон, тем меньше гумуса и тем меньше неморальных, но больше бореальных видов травостоя. Каждый участок с присущим ему уклоном, содержанием гумуса и соотношением неморальных и бореальных видов будет выступать как элемент единой геосистемы. Наличие эмерджентного свойства выявляется по единому типу зависимости между свойством каждого пространственного элемента и некоторой характеристикой разнообразия геосистемы в целом. Приведем несколько возможных таких характеристик, которые можно называть хорологическими (приводимые ниже примеры зависимостей не имеют универсального значения).

а) Расчлененность рельефа (вертикальная и горизонтальная), определяет эмерджентное свойство «уровень грунтовых вод» («чем сильнее расчленение, тем ниже уровень грунтовых вод на водораздельной поверхности»).

б) Мера разнообразия растительного покрова (охарактеризованная, например, индексом Шеннона или индексом уникальности конкретного сообщества в геосистеме) определяет эмерджентное свойство «биологическое разнообразие» («чем равномернее распределены сообщества, тем больше видов»).

в) Мера фрагментации ландшафтного покрова определяет эмерджентное свойство «размер и жизнеспособность популяции млекопитающих» («чем больше фрагментация, тем меньше видов, способных преодолевать большие разрывы между пригодными местообитаниями»).

г) Соотношение лесных и безлесных элементов геосистемы определяет эмерджентное свойство «степень зарегулированности поверхностного стока» («чем ближе соотношение к 1:1, тем равномернее сток»).

д) Соотношение заболоченных и дренированных элементов геосистемы определяет эмерджентное свойство «водный баланс» («чем меньше болот, тем меньше расход влаги на испарение и больше — на сток»).

е) Соотношение отрицательных и положительных форм мезорельефа определяет эмерджентное свойство «повторяемость заморозков на водораздельных пространствах» («чем больше оврагов и балок, тем лучше выражено стекание холодного воздуха в понижения рельефа и меньше повторяемость заморозков на водораздельных пространствах»).

Каждый из приведенных примеров иллюстрируется количественной характеристикой пространственной структуры геосистемы, которая учитывает взаимовлияние элементов, положение элемента в географическом контексте, вклад элементов в функционирование целостной геосистемы. В данной работе основное внимание уделяется лишь одной из перечисленных возможных характеристик пространственной структуры — расчлененности рельефа как свойству геосистемы, налагающему ограничения на разнообразие допустимых состояний ее пространственных элементов. Расчлененность рельефа выступает как предиктор в уравнении межуровневой связи («целое влияет на часть»).

Итак, можно констатировать существование эмерджентных свойств геосистемы, если доказано, что в некотором пространстве межкомпонентные связи подчиняются единому правилу. Единообразный тип связей интерпретируется как единство ландшафтоформирующего процесса, разные количественные уровни проявления которого создают мозаичность пространственных единиц. Разумеется, ландшафтоформирующих процессов множество, и они действуют в разных масштабах. Задача исследователя — определить границы ареала проявления каждого процесса, условия его проявления и установить свойства ландшафта, контролируемые каждым из процессов. Наблюдаемое значение

Рис. 3. Схема наложения действия разномасштабных факторов дифференциации и формирования результирующих значений свойств ландшафта.

каждого свойства рассматривается как результат наложения результатов действия разномасштабных процессов, схематически изображенного на рис. 3. Для того чтобы установить степень подчиненности описываемой в полевых условиях ландшафтной единицы разномасштабным процессам, требуется задать границы участка пространства, для которого изученная единица является репрезентативной. Немецкие исследователи предложили для репрезентативного абсолютно однородного участка хорологической единицы специальный термин «экон» (Leser, 1997; Bastian, Steinhardt, 2002). В отличие от экотопа, сопоставимого с фацией в отечественном ландшафтоведении, экон обладает только одним — вертикальным — измерением, то есть характеризуется отношениями между компонентами. Экотоп же — это однородная единица морфологической структуры ландшафта со строго определенными границами. В реальности исследователь, проводя измерения и описания, имеет дело именно с эконом. При этом должно быть определено, для какой морфологической единицы ландшафта он репрезентативен. Итак, возникает проблема определения операционной территориальной единицы (ОТЕ) и зависимости результатов количественных оценок от этого выбора.

2.3 Операционная территориальная единица, вмещающие геосистемы и выбор масштаба

Есть два пути для описания отношений, которые существуют между пространственным элементом ландшафта (например, морфологической ландшафтной единицей) и группой элементов того же уровня, которые в совокупности образуют геосистему более высокого ранга с эмерджентными свойствами, общими для всех составляющих ее элементов.

Первый путь — пытаться выявить зависимость свойств каждой ландшафтной единицы от пространственной структуры единицы более высокого ранга, предварительно составив ландшафтную карту с дискретными контурами. В русскоязычном ландшафтоведении еще в 1960-е гг. разрабатывались многочисленные индексы пространственной структуры на основе ландшафтных карт (Ивашутина, Николаев, 1971). Для того чтобы ими пользоваться, надо быть уверенным в строгой согласованности пространственного варьирования всех компонентов ландшафта со скачками состояний при пересечении дискретных границ.

Второй путь — признавая возможность постепенных изменений и необязательности скачка свойств абсолютно всех компонентов при пересечении геолого-геоморфологических границ, разделить территорию на одинаковые по размеру пространственные единицы (клетки, пикселы), присвоить каждому пикселу значения измеренных внутри свойств и затем проверять гипотезы о зависимости свойств пиксела от свойств совокупности пикселов в некоторой окрестности. Этот путь мы рассматриваем как один из возможных способов построения модели межуровневой связи. При втором подходе исследователь абстрагируется от возможного наличия границ в окрестности пиксела и пытается их найти индуктивным путем на основании полученных характеристик межуровневых связей. Предмет поиска в данном случае — размер и конфигурация пространства, в котором существует межуровневая связь. Автор в данной работе пользуется преимущественно именно таким подходом.

Одинаковые по размерам неделимые пространственные единицы с одинаковым состоянием измеряемых характеристик в некоторый период времени будем называть

операционными территориальными единицами (ОТЕ). Этот термин не нов: его применяли еще в 1960-1970-х гг. (Taylor, 1969; Углов, 1971; Куприянова, 1975); предлагался также близкий по смыслу термин «территориальный носитель информации — ТНИН» (Дьяконов, 1975). Выбор их размера отражает гипотезу исследователя о размере однородного участка при разных уровнях абстракции и отражает его полевой опыт о средних размерах однородных ландшафтных единиц на изучаемой территории. Выбирая ОТЕ меньшего размера, исследователь выдвигает гипотезу, что измеряемые свойства варьируют согласованно с высокочастотной мозаикой (например, состав травяного яруса варьирует в зависимости от микрорельефа, оконной динамики древостоя и т.п.). Выбирая ОТЕ большего размера, исследователь считает, что существуют свойства, общие для соответствующего участка независимо от внутренней мозаичности. Например, в таежной зоне на песчаной террасе сосновый древостой (свойство компонента «растительность») может быть развит повсеместно вне зависимости от наличия микропонижения и микроповышений. В связи с акутальностью уже упомянутой проблемы изменяющейся пространственной единицы (MAUP) (Openshaw, 1977) автор предлагает процедуру *полимасштабного анализа структуры ландшафта*. Она подразумевает выявление групп свойств, для отражения варьирования которых более адекватен тот или иной размер ОТЕ, или, в терминологии геоинформатики, разрешение.

Большинство свойств ландшафта меняется в соответствии с некоторыми градиентами среды, которые могут быть или постепенными, или резкими. Каждая ОТЕ характеризуется, с одной стороны, собственными свойствами, обусловленными внутриуровенными межкомпонентными связями, и, с другой стороны, эмерджентными свойствами вмещающих геосистем (межуровневыми связями), возможно, нескольких иерархических уровней. *Полимасштабный анализ включает выдвижение и проверку серии гипотез, что ОТЕ зависит от эмерджентных свойств ряда вмещающих геосистем, размер которых мы и определяем индуктивным путем*. Иначе говоря, на первом (или, точнее, «нулевом») этапе исследования мы представляем свойства компонентов ландшафта как некую «груду кирпичей», способы и причины соединения которых (тип связей и порождающий их процесс) надо выяснить. Свойства-«кирпичи» могут соединяться разными способами (то есть иметь достоверные связи), формируя целостные геосистемы, подчиняющиеся единому системообразующему фактору. Количественные уровни проявления этого единого фактора могут различаться в пространстве геосистемы, что создает внутреннюю дифференциацию. Предполагается, что если изменятся характеристики рельефа или ландшафтного покрова в некоторой окрестности ОТЕ, соответствующей вмещающей геосистеме более высокого ранга, то должны измениться и характеристики самой ОТЕ. Размер ОТЕ может быть установлен разный в зависимости от типа процессов, гипотетически ответственных за ландшафтную дифференциацию. *Поэтому необходимо исследование эффекта пространственного разрешения и территориального охвата для структуры межкомпонентных связей.* Традиционные «точки комплексного ландшафтного описания», как правило, соответствуют геосистеме ранга фации, а точнее — ее репрезентативной части, т.е. упоминавшемуся выше «экону» в терминологии немецкой школы (Bastian, Steinhardt, 2002). Некоторые характеристики, определенные при полевом исследовании, могут относиться к подурочищу или урочищу. Данные, характеризующие более крупные геосистемы, в основном являются результатом обработки результатов маршрутных исследований, картографических или дистанционных материалов. Способ категоризации такой ин-

формации определяет выбор мельчайшей единицы, которая может быть соотнесена с тем или иным рангом морфологической единицы ландшафта. Путем агрегирования информации различными способами (осреднение, расчет модального значения, максимального значения и т.п.) можно создать ОТЕ более высокого ранга. Чтобы процедура агрегирования не была формальной, а результат имел ландшафтное содержание, необходимо на каждом шаге агрегирования удостоверяться, что полученные ОТЕ находят отражение в свойствах других компонентов. Иначе говоря, группы свойств компонентов должны достоверно различаться между выделенными классами ОТЕ.

Типы связей между свойствами компонентов ландшафта, описанные при разном разрешении, могут быть предметом сравнения. Например, обилие какого-либо вида растений, измеренное при полевом описании фации, может гипотетически зависеть от уклона. Уклон можно измерить непосредственно на местности (уклон фации выпуклого участка на склоне балки), по цифровой модели высокого разрешения (средний уклон подурочища склона балки), либо по цифровой модели рельефа низкого разрешения (средний уклон урочища балки в целом или его отрезка). Тем самым путем перебора способов описания уклона высказываются три разные гипотезы о факторах, влияющих на обилие вида в конкретном месте. В первом случае — о скорости миграции вещества; во втором — косвенно об интенсивности процесса врезания, ответственного за крутизну склонов; в третьем — косвенно о геологическом строении, так как общий уклон балки зависит от проходимого водотоком пути, что определяется разницей высот между кровлей водоупорного пласта, по которому идет разгрузка грунтовых вод, и базисом эрозии.

В то же время можно высказать гипотезу о зависимости обилия вида в «точке», или «эконе», от ландшафтной обстановки в окрестности того или иного размера, которую можно охарактеризовать, например, вертикальной расчлененностью рельефа. Мера расчлененности рельефа, рассчитанная по цифровой модели высокого разрешения (когда размер ОТЕ сопоставим со средним размером фации), может быть отождествлена с условиями для определенного уровня грунтовых вод: при сильной расчлененности уровень более низкий, при слабой — более высокий. Однако меру расчлененности можно рассчитать по цифровой модели низкого разрешения, когда размер ОТЕ становится сопоставим со средним размером, например, урочища. Тогда ее следует интерпретировать, скорее, как показатель принадлежности к некоторому генетическому типу рельефа, что может соответствовать специфике геологических условий или истории развития территории, которые, так или иначе, отражаются на свойствах всех фаций, принадлежащих этой территории.

Анализ вида связей между аналогичными характеристиками, рассчитанными при разном размере ОТЕ, может дать информацию о подобии или смене типа отношений при переходе с одного иерархического уровня на другой. Сопоставление тесноты межкомпонентных связей, рассчитанных при разном размере ОТЕ, позволяет сделать заключение о целесообразности выделять тот или иной иерархический уровень для объяснения причин пространственного варьирования свойств геосистем. Легко представить ситуацию, когда какое-либо свойство (например, содержание гумуса) остается неизменным при смене элемента мезорельефа (при переходе с гребня на склон). Это означает, что для гумусонакопления, по сути, безразличен микромасштабный фактор. В то же время принципиальное значение может иметь принадлежность к местности глубокорасчлененного коренного склона долины: только при переходе в местность

слаборасчлененного склона, сложенного моренными суглинками, содержание гумуса претерпит изменение. Пикселы цифровой модели рельефа малого размера (высокое разрешение) смогут отразить различие локальных гребней и склонов и их соотношение, но эта информация будет бесполезна для объяснения варьирования (или его отсутствия) содержания гумуса. Зато крупные пикселы (низкое разрешение), игнорируя информацию о различиях элементов мезорельефа, отразят контрасты участков склона долины в целом, связанные с наличием врезания в коренные породы либо с преобладанием слаборасчлененных склонов. Сравнение моделей связи между группами свойств ландшафта и рельефом, построенных при разном разрешении, покажет, какой иерархический уровень пространственной дифференциации значим для изучаемой группы свойств или на разных участках территории.

Другой важная характеристика масштаба — пространственный охват (extent). Он характеризует пространство, в котором согласно гипотезе проявляется тот или иной тип отношений между компонентами ландшафта. Важен, собственно говоря, не сам по себе размер пространства, на котором проверяется гипотеза, а уровень его ландшафтного разнообразия. Многочисленные методы выявления разнообразия территории и иерархических уровней ее организации, разработанные в ландшафтной экологии, основаны на поиске параметров модели, при котором происходит резкий скачок вариабельности изучаемого свойства (Wu et al., 2000; Hay et al., 2002; Hall et al., 2004). Представляет большой интерес проблема сохранения типа отношений между компонентами ландшафта при разных уровнях ландшафтного разнообразия. Последнее можно задать, включая в анализ данные, охватывающие ландшафтные или физико-географические единицы разных уровней. Для сравнимости моделей количество использованных данных и размеры ОТЕ должны быть сопоставимы. Тем самым можно установить степень универсальности закономерности (глобальный или локальный характер, по: Phillips, 2002) и иерархический уровень ландшафтной организации, для которого действительна закономерность. Весьма обычна ситуация, когда связь хорошо проявляется в пределах ландшафта одного вида (например, дренированных моренных холмистых равнин), но «растворяется» при объединении в выборку ландшафтов разных видов (моренных, водноледниковых, структурно-эрозионных равнин).

Изменение тесноты связи при изменении территориального охвата может объясняться несколькими причинами. Во-первых, связь может существовать действительно только в определенных ландшафтных условиях. Например, уровень грунтовых вод будет зависеть от рельефа на суглинистых равнинах в большей степени, чем на песчаных. Во-вторых, в разных видах ландшафтов связь может иметь разный вид и знак, что при объединении данных в одну выборку приводит к взаимокомпенсации отклонений переменных от средних значений. Например, на плоском заболоченном междуречье обилие сосны растет по мере повышения уровня грунтовых вод, а на бугристой песчаной террасе — по мере его понижения, поскольку во влажных понижениях сосна может проигрывать конкуренцию ели. В третьих, может оказаться более адекватной математическая модель иного вида. Например, линейная связь может оказаться незначимой, в то время как параболическая зависимость значима. Иначе говоря**,** при малых и больших значениях аргумента достигаются одинаковые значения функции, но они резко отличаются при значении аргумента близком к среднему. Кажущееся «растворение» связи при увеличении территориального охвата может быть основанием для выдвижения гипотезы о существовании связи иного типа (рис. 4, А).

Характеризуя ОТЕ свойствами вмещающей ее гипотетической геосистемы более высокого ранга, мы тем самым абстрагируемся от некоторых локальных границ или, по крайней мере, на этапе выдвижения гипотезы не придаем им комплексного значения. Тогда, например, переход через бровку склона может трактоваться не как обязательная принципиальная смена всех свойств геосистемы, а лишь некоторое изменение по градиенту расчлененности и кривизны рельефа и, соответственно, некоторое ослабление или усиление потоков вещества, на которое одни компоненты среагируют, а другие — нет. Основная задача при этом подходе — построить серию моделей, которые связывают свойства конкретных ОТЕ с характеристиками окрестностей нескольких размеров. Такими характеристиками могут быть морфометрические свойства рельефа, пространственные характеристики растительного покрова, структура земельных угодий и т.п. Затем сравнивается качество и достоверность этих моделей. На выходе будет получена классификация свойств компонентов по чувствительности к свойствам окрестностей разного размера. Фактически это означает классификацию по принадлежности процессов, ответственных за варьирование данного свойства ландшафта, к иерархическим уровням вмещающих геосистем. Таким образом, появляются основания

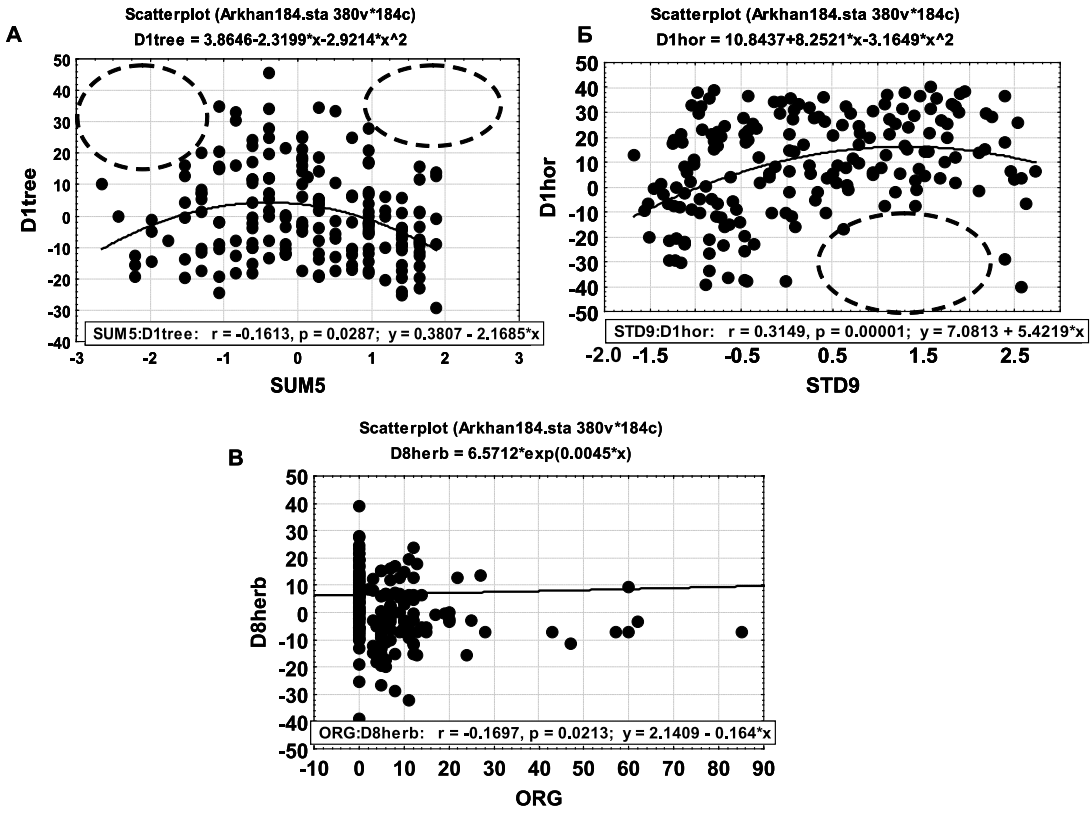

Рис. 4. Модели типов связей и их отсутствия. Пояснения см. в тексте.

для соотнесения характеристик ландшафта с иерархическими уровнями. Например, глубина оподзоливания в таежном ландшафте может через степень дренированности зависеть от свойств междуречья в целом (его размеров, выпуклости, расчлененности), а степень оглеения — от микрорельефа внутри этого междуречья. Если это доказано, тогда есть формальные основания характеризовать геосистему междуречья как «широкая выпуклая водораздельная поверхность с ельниками на сильноподзолистых почвах», а вложенную в нее геосистему — как «водосборное понижение на водораздельной поверхности с ельниками на сильноподзолистых глееватых почвах».

Итак, *для корректного определения необходимого набора характеристик геосистем на каждом иерархическом уровне необходимо создание полимасштабных моделей межкомпонентных внутриуровенных и межуровневых связей.* Встает вопрос, как при бесконечном множестве характеристик геосистем отобрать наиболее существенные из них и связать с факторами среды.

2.4. Вертикальная (компонентная) структура ландшафта и задача снижения размерности данных

Сложность исследования компонентной структуры ландшафта и процессов, ответственных за ее варьирование в пространстве, заключается в неизбежной многомерности данных. Ландшафт, по определению, сложная система, и предметом исследования являются не отдельные компоненты и их свойства, а эмерджентные свойства системы. Следовательно, чем больше свойств описано и измерено, тем больше возможностей приблизиться к пониманию общих для них механизмов взаимодействия и пространственной дифференциации. Трудность заключается не только в том, что таких свойств бесконечно много и волей-неволей приходится производить их отбор для анализа, но и в том, что значение каждого свойства отражает наложение результатов действия разных факторов (Крауклис, Евдокимова, 1975; Топчиев, 1988; Козловский, 1991; Myster et al., 1997; Burrough et al., 2001; Пузаченко, 2004). Поэтому единственным способом уйти от «дурной бесконечности» приходится признать применение методов снижения размерности, разработанные в математической статистике, но давно и успешно применяемые в географии, ландшафтоведении, ландшафтной экологии (Харвей, 1974; Крауклис, Евдокимова, 1975; Топчиев, 1988; Krnač, Krnačova, 1994; Borcard, Legendre, 2002; Пузаченко, 2004; King et al., 2004; Couteron et al., 2006; Cross, Perakis, 2011). В нашей работе используются метод главных компонент и многомерное шкалирование.

Результатом снижения размерности исходного массива данных является ограниченное количество новых независимых друг от друга переменных, именуемых *осями, или параметрами порядка*. Ниже мы пользуемся термином «*фактор*», когда речь идет о собственно экологических факторах — причинах пространственных различий. Термин «*ось*» применяется, когда рассматривается совокупность количественных показателей проявления экологического фактора в местах полевых наблюдений. Конкретное значение показателя отражает определенное соотношение свойств, чувствительных к этому фактору, в конкретном месте наблюдения. Каждая из осей интегрирует большой ряд исходных коррелирующих переменных и отражает соотношение экологически противоположных признаков и согласованную реакцию целого ряда свойств компонентов на какой-либо экологический градиент (Крауклис, Евдокимова, 1975; Топчиев, 1988; Krnač, Krnačova, 1994; Пузаченко, 2004; Кирюшин и др., 1996). «Факторы, видоизме-

няющие облик фации, могут образовывать пространство факторной ординации, в котором конкретная фация располагается по степени факторного влияния... Принципы расслоения требуют, чтобы факторные координаты были независимы (ортогональны)» (Черкашин, 2007). Значения новой интегральной переменной отражает положение ОТЕ на оси экологического градиента. Самыми большими и самыми малыми значениями характеризуются территориальные единицы, полярные по реакции на экологический фактор, средние значения характеризуют сосуществование в примерно равных пропорциях противоположных признаков либо отсутствие таковых. Таким образом, становится возможным представить диапазон возможных значений экологического градиента в виде трех интервалов, то есть, соблюдая правило триады Ф.Н. Милькова (1986). Например, если интегральная переменная интерпретирована как ось влажности, то самые большие значения будут присвоены тем территориальным единицам, где присутствуют исключительно растения-влаголюбы в максимально возможном обилии, а самые малые значения — где присутствуют только ксерофиты (рис. 5). Иначе говоря, в приведенном примере для каждой территориальной единицы косвенно определяется степень обеспеченности местообитания влагой. Однако получена информация не просто о количестве влаги, а уже о реакции компонента ландшафта на этот фактор, то есть уже о межкомпонентных отношениях (в данном случае между водами и фитоценозом). Методы снижения размерности позволяют определить степени чувствительности каждого исходно измеренного свойства к соответствующему экологическому

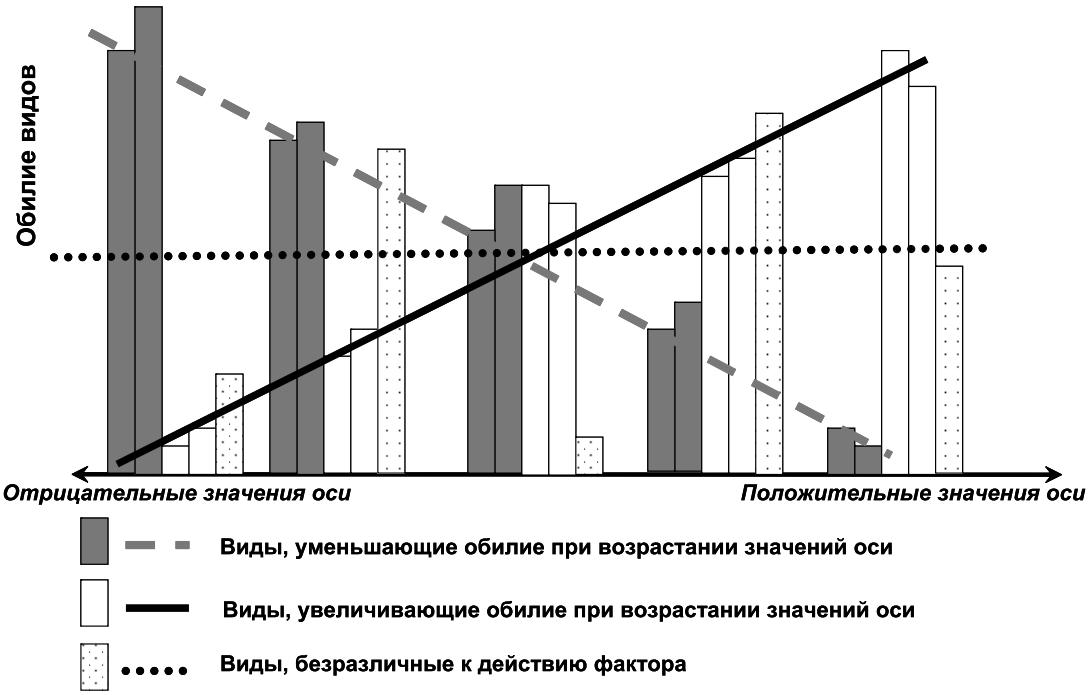

Рис. 5. Интерпретация значений оси дифференциации свойств компонентов ландшафта.

градиенту. Факторная нагрузка отражает степень корреляции исходной переменной с интегральной переменной. Свойства, безразличные к влажности, будут характеризоваться факторными нагрузками близкими к нулю. Свойства с высокой чувствительностью будут характеризоваться большими по модулю нагрузками. Нагрузки могут быть отрицательными или положительными в зависимости от того, какое из полярных состояний стимулирует развитие данного свойства, а какое — подавляет. Именно по набору свойств с полярными факторными нагрузками и осуществляется первичная интерпретация физического смысла оси, то есть определение собственно экологического фактора. Например, пусть противоположные факторные нагрузки имеют мощности элювиального и торфяного горизонтов. Тогда знание об условиях развития подзолообразования и торфонакопления в конкретной географической обстановке позволяет интерпретировать положение на оси как чувствительность почвенного профиля к степени дренированности. При застойном режиме (при прочих равных условиях) накапливается торф, а при промывном активизируется оподзоливание. Как правило, наиболее значимые оси интерпретируются таким способом достаточно легко. Интерпретация в неочевидных случаях требует более подробного изучения корреляций факторных значений с исходными данными.

Поскольку на каждое свойство влияет целый ряд независимых экологических факторов, то каждая ОТЕ будет охарактеризована положением на нескольких осях. Каждая ось характеризует какой-либо из независимых ландшафтоформирующих процессов, который либо происходит сейчас, либо проявлялся в прошлом, оставив вещественное наследие в современном ландшафте. Например, ось влажности может быть интерпретирована как результат процесса перераспределения влаги в ландшафте под действием латеральных и радиальных потоков. Ось трофности отражает наследие процессов седиментации разных эпох, в результате которых один сектор ландшафта сложен водноледниковыми песками, другой моренными суглинками, а третий — отпрепарированными современной эрозией коренными дочетвертичными породами. Совокупность значений факторных нагрузок позволяет отразить подчиненность каждого свойства (например, обилия ели) нескольким ландшафтоформирующим процессам (например, торфонакоплению и трансформации света под пологом леса) и понять какие еще свойства ведут себя таким же образом (например, обилие пихты), а какие — принципиально иначе (например, обилие крапивы и борщевика, для которых гораздо важнее миграция азота). Обратим внимание, что в ландшафте возможно сезонное и межгодовое варьирование видового состава фитоценозов, оглеения почв и ряда других признаков; поэтому полевое исследование в конкретный год может не дать исчерпывающую характеристику компонентов даже по точно измеренным признакам. Преимущество методов снижения размерности заключается в том, что они снижают вклад таких «случайностей» в получаемый результат, так как «разводят» на разные полюса оси не отдельные свойства (среди которых может быть присутствие случайно высокообильных в год наблюдения видов), а группы взаимосвязанных свойств. Если какой-то вид в год исследования выпал из фитоценоза, то другие со сходным поведением и более устойчивые к межгодовым колебаниям присутствуют. Поэтому группы свойств как бы «подстраховывают» друг друга при анализе их пространственного распределения. Современные технологии исследования пространственной структуры ландшафта с использованием совокупности разновременных космических снимков позволяют учесть диапазон варьирования свойств ландшафтного покрова во времени и добиться объективизации выделения

геосистем (Пузаченко и др., 2003, 2014; Солодянкина, Черкашин, 2004; Козлов и др., 2008; Кренке и др., 2011).

Сказанное выше показывает, что методы снижения размерности вполне адекватны задачам ландшафтного исследования, опирающегося на концепцию полиструктурности. Мы получаем возможность оценить степень проявления того или иного ландшафтоформирующего процесса на конкретном участке пространства. По пространственному распределению значений оси мы получаем возможность представить ареалы, в пределах которых не просто «работает» в той или иной степени процесс, но и уверенно утверждать, что этот процесс влияет на компоненты ландшафта и отражается в значениях точно известной группы свойств. Легко представить ситуацию, когда процесс имеет место, но не отражается на пространственной дифференциации свойств растительного или почвенного покрова (например, движение подземных вод или горно-долинная циркуляция воздуха). Таким образом, отталкиваясь от значений измеренных свойств ландшафта, мы выявляем совокупность основных процессов, которые *имеют ландшафтоформирующее значение, то есть отражаются в свойствах компонентов и могут служить причиной их пространственной дифференциации*. В зависимости от поставленных задач для расчета значений осей можно использовать данные, характеризующие: а) один компонент (например, множество характеристик почв), б) часть свойств компонента или геогоризонт (например, только виды древесного яруса или совокупность характеристик почвенного геогоризонта, включая как свойства собственно почв, так и почвенной флоры, фауны, вод и др.), в) множество компонентов с объединением в одном массиве свойств фитоценоза, почв, вод, горных пород и т.д.

В данной работе необходимо, с одной стороны, выявить пространственную дифференциацию отдельных свойств компонентов, подчиняющихся взаимонезависимым процессам, и на этой основе установить границы парциальных геосистем. Для этого значения осей дифференциации рассчитаны в первом из перечисленных вариантов — по группам свойств компонентов (почв, фитоценоза, почвообразующих пород). С другой стороны, для реализации задачи синтеза целостных ландшафтных структур, мы применяем третий способ из перечисленных и рассчитываем так называемые «суперфакторы», отражающие согласованное варьирование свойств разных компонентов ОТЕ и свойств рельефа вмещающих геосистем. Методика расчета описывается ниже в разделе 3.2.3.

Следующее достоинство методов снижения размерности — возможность ранжировать факторы дифференциации по значимости. Следовательно, эта группа методов адекватна такой важнейшей задаче ландшафтоведения вообще и данной работы в частности, как *выстраивание иерархии процессов по значимости для тех или иных свойств*. Первая по номеру ось вносит наибольший вклад в дисперсию свойств, вторая дает меньший, но независимый от первого вклад и так далее. Как показывает опыт, первые три–четыре оси в большинстве случаев описывают основную долю варьирования свойств и характеризуют устойчиво существующие или повторяющиеся во времени процессы и явления (Кирюшин и др., 1996; Пузаченко, 2004; Хорошев, 2001а). Малозначимые узколокальные или эпизодические процессы, а также случайное варьирование признака (например, присутствие экзотического вида в фитоценозе, случайно занесенного птицами или высаженного человеком) «выбрасывается» в оси с большими порядковыми номерами (т.е. с невысокой значимостью для пространственной дифференциации). Рассчитав значения осей дифференциации отдельно для компонентов, мы

получаем возможность сравнить степень их «участия» в тех или иных типах ландшафтных структур (например, геостационарных, геоциркуляционных или биоциркуляционных, по В.Н. Солнцеву, 1997). Очевидно, что не бывает территорий, где какая-либо из этих структур отсутствует вообще, но зависимость от одной из структур может быть замаскирована или нейтрализована мощным проявлением другой структуры. Как раз такие ситуации у В.Б. Сочавы (1978) получили название квазикоренных фаций. Например, группа нитрофильных влаголюбивых видов травостоя может менять обилие в зависимости от принадлежности к хорошо дренированным склонам или слабодренированным вогнутым днищам долин. Но в случае выхода водоносного пласта даже на крутом склоне обилие этой группы видов будет велико несмотря на то, что обычно на крутых склонах они отсутствуют. В этом примере чувствительность к фактору трофности имеет больший вес, чем чувствительность к фактору влажности, зависящему от условий дренированности.

Итак, *применив методы снижения размерности, мы получаем возможность перейти собственно к анализу причин пространственных различий вертикальной структуры ландшафта посредством построения моделей связей между группами свойств компонентов ландшафта.*

2.5. Способы и проблемы интерпретации межкомпонентных отношений

Выделяются четыре представления о взаимообусловленности компонентов ландшафта.

Первое утрированно можно выразить известной фразой «все связано со всем»: оно не оставляет исследователю шансов на сколько-нибудь достоверное выделение пространственных единиц хотя бы в силу бесконечности количества показателей, которыми можно описать ландшафт. Кроме того, как многократно отмечали экологи и географы, если природа была бы устроена на основе многочисленных жестких связей, то устойчивость ее к внешним воздействиям стремилась бы к нулю (May, 1972; Сочава, 1978).

Второе представление реализовано в классическом российском ландшафтоведении, особенно в концепции морфологической структуры ландшафта. По этой детерминистской концепции, некоторые компоненты жёстко связаны друг с другом на данном иерархическом уровне, а если полевые данные свидетельствуют о нарушении ожидаемых отношений, то причину следует искать в проявлении отношений другого иерархического уровня, на котором действует иной ведущий фактор дифференциации.

Третье представление реализует идею, что компоненты ландшафта связаны друг с другом не жестко. По сути, как было показано в разделе 1.2, это представление в начале XXI века можно считать уже преобладающим. Допускается многовариантность развития структуры и множественность возможных комбинаций свойств, что требует применения вероятностного подхода. Принимается, что на данном иерархическом уровне внутренняя дифференциация зависит от состояния какого-либо фактора (например, горной породы), но каждое сочетание свойств компонентов может соответствовать классам состояний этого фактора с той или иной вероятностью. Иначе говоря, некоторая часть свойств компонентов (например, группа видов травостоя) обычно более характерна для другого класса состояний фактора, но с определенной вероятностью

встречается и при данном классе. Такое нежесткое соответствие между свойствами компонентов может объясняться как разными характерными временами компонентов, так и широкими экологическими нишами видов живой природы и многочисленными случайными факторами. Для отражения неоднозначных отношений между компонентами ландшафта при картографировании структур применялась теория нечетких множеств, дискриминантный анализ, информационные меры разнообразия и другие подходы (Zhu et al., 2001; Burrough et al., 2001; Molenaar, Cheng, 2002; Бобра, 2005; Краак, Ормелинг, 2005; Хорошев, 2005б; Козлов, 2009; Milns et al., 2010; Кренке и др., 2011). Вместо одной карты ландшафтных единиц требуется серия карт, отражающих степень уверенности исследователя в отнесении каждого участка территории к тому или иному классу.

Четвертое представление основано на допущении, что на каждом иерархическом уровне ландшафтной организации возможно несколько ведущих факторов дифференциации, сила проявления которых неодинакова. Например, в одном случае внутри эрозионной равнины действует единый фактор дифференциации, связанный с положением грунтовых вод: чем больше расчлененность рельефа, тем меньше болот. В другом случае в пределах эрозионной равнины вид связи между рельефом и заболоченностью неодинаков: на высоких гипсометрических уровнях рост расчлененности способствует дренажу и снижению заболоченности, а на низких — увеличению заболоченности, поскольку в этом случае болота связаны с днищами долин. Таким образом, в этом примере на одном иерархическом уровне действуют разные виды связей между одними и теми же компонентами и за ними стоят разные процессы.

К настоящему времени разработан ряд взаимодополняющих концепций, на основе которых может выстраиваться исследование межкомпонентных связей в ландшафте (Хорошев, 2012а). В зависимости от целей и задач исследования может предпочитаться та или иная концепция.

1. Концепция ведущего фактора. Ярким примером является «принцип подчинения – принцип Н.А. Солнцева», выстраивающий компоненты ландшафта по относительной самостоятельности и силе воздействия на другие компоненты в соответствии с характерными временами (Николаев, 2006б). Наиболее сильный компонент — морфолитогенная основа. Мобильные компоненты отражают свойства морфолитогенной основы. Границы внутриландшафтных единиц однозначно заданы морфолитогенными границами. На каждом иерархическом уровне существует свой главный фактор дифференциации. Если существует морфолитогенная граница, то свойства компонентов и межкомпонентные отношения обязательно различны по разные стороны от этой границы (Видина, 1962). Недавно В.Н. Солнцев (2013) обосновал «ряд Н.А. Солнцева» как гравитационную парадигму ландшафтоведения.

2. Концепция полиструктурности. Ландшафт одновременно разными свойствами участвует в многоуровневой и многомасштабной системе отношений и представляет собой, по выражению В.Н. Солнцева (1997) «пучок шевелящихся во все стороны относительно самостоятельных структур». В.Н. Солнцев считает, что в едином пространстве сосуществуют геостационарные, геоциркуляционные, биоциркуляционные системы. При этом традиционные морфологические единицы ландшафта по способу обособления близки к геостационарным.

3. Концепция парциальных геокомплексов. «Конструировать» геосистему можно в зависимости от целей и масштаба исследования, опираясь на отношения группы

свойств, подчиняющихся единому фактору и согласованно варьирующих в пространстве и времени.

4. Концепция нуклеарных систем. Ландшафт представляет собой наложение многочисленных ядер и ареалов влияния тех или иных сил. Одна из возможностей реализации этой концепции связана с вероятностным («байезианским», в англоязычной терминологии) подходом к выделению геосистем, при котором определяется не принадлежность участка территории к какому-либо классу, а численные значения вероятностей принадлежности к каждому из возможных на территории классов. На одном участке могут проявляться отдельные свойства разных классов, обособление которых объясняется сферой преобладающего действия какого-либо тела, потока. Подход конструктивен для различения в пространстве областей устойчивых равновесных сочетаний компонентов, значения которых строго детерминированы диапазоном значений некоторого ведущего фактора, и областей переходных, с неустойчивыми, иногда противоречивыми сочетаниями свойств компонентов ландшафта, что может объясняться «конкуренцией» нескольких ядер.

5. Концепция «вертикальной структуры» ландшафта, в англоязычном толковании этого термина, при котором под таковой понимается система связей между смежными иерархическими рангами геосистем. Важная проблема — корректное определение пространства, которое оказывает реальное влияние на геосистему, то есть характерного размера вмещающей геосистемы.

6. Концепция связи между характерными пространственными и временными масштабами природных процессов и явлений. Взаимодействие возможно только при близких характерных масштабах; существуют устойчивые соотношения между размерами объектов, находящимися на смежных иерархических уровнях.

Как уже упоминалось, в ландшафтоведении принято различать «связи-отношения» и «связи-взаимодействия» (В.Н. Солнцев, 1977). Имеющиеся в распоряжении автора данные позволяют анализировать в основном «связи-отношения». Связи-отношения необязательно свидетельствуют о причинно-следственных связях. В дальнейшем тексте термин *«отношения»* применяется для обозначения теоретически закономерных комбинаций свойств, за которыми могут стоять физические взаимодействия. Термин «*связь*» употребляется, когда речь идет о статистической достоверности отношений, то есть в смысле, близком к термину «корреляция».

Наличие рассчитанной каким-либо статистическим способом достоверной корреляции между парой ландшафтных характеристик может интерпретироваться неоднозначно. Самый простой для интерпретации и желательный для исследователя случай — это обусловленность корреляции реальным физическим однонаправленным воздействием одного свойства на другое или их взаимодействием, которое объясняется наличием потока вещества или энергии. Например, если проективное покрытие травостоя достоверно связано с сомкнутостью крон, то есть основания предполагать регулирование поступления солнечной энергии к поверхности почвы кронами деревьев. Одна характеристика выступает как индикатор состояния другой. Возможность подобной интерпретации позволяет делать заключения о зависимости устойчивости состояния одной характеристики от состояния другой. Если разредить кроны, то увеличится сомкнутость травостоя. Этот случай имеет наибольшее практическое применение в сферах ландшафтного планирования и прогнозирования.

Второй случай корреляции двух характеристик связан с наличием третьей характеристики, которая попарно связана с двумя анализируемыми, при том, что последние

не взаимодействуют физически между собой. Например, для заболоченного лесного ландшафта может быть установлена достоверная связь обилия черной ольхи с мощностью перегнойного горизонта в почве при тесной связи обоих признаков с уровнем грунтовых вод. Отсюда необязательно следует, что ольха формирует перегной, или что перегной является обязательным условием произрастания ольхи. Как правило, наличие такой опосредованной связи хорошо отражается факторным анализом (или каким-либо близким по смыслу методом снижения размерности). Выявление опосредованной связи удобно тем, что позволяет делать суждения о трудноизмеримых свойствах. В приведенном примере мощность перегнойного горизонта и обилие черной ольхи в ландшафте измеряются легче и достовернее, чем уровень грунтовых вод. Простое знание экологических факторов произрастания ольхи и развития перегнойного процесса наводит на заключение о варьировании уровня грунтовых вод. Статистическими методами снижения размерности можно выявить целую группу характеристик ландшафта, которые меняются в пространстве сходным образом в зависимости от состояния одного и того же фактора дифференциации (например, уровня грунтовых вод), и сразу отделить нечувствительные к нему характеристики. Это дает право исследователю произвести отбор свойств, необходимых для объяснения ландшафтной дифференциации на том иерархическом уровне, на котором данный фактор является основным.

Имея статистически достоверную модель отношений между характеристиками компонентов ландшафта, можно высказывать гипотезы о наличии и сущности современного или существовавшего в прошлом процесса, через который изменение состояние одного компонента отражается на состоянии другого. Если речь идет о связи состояний во времени, то возможна постановка непосредственного эксперимента в природе с повторными наблюдениями. В результате можно установить цепочки связей-взаимодействий, пространственно-временные масштабы, в которых осуществимы взаимодействия, выстроить иерархию компонентов ландшафта по динамичности, инертности и чувствительности к тем или иным воздействиям. Эта задача решена, например, в ландшафтно-динамических исследованиях И.И. Мамай (1992), Н.Л. Беручашвили (1989), Института географии СО РАН (Нечаева и др., 1975; Географические..., 2007).

Сложнее интерпретировать статистически достоверные связи между свойствами компонентов, которые измерены единовременно в пространстве, но не обеспечены динамическим рядом наблюдений. Возникает целый ряд проблем (Хорошев, Алещенко, 2012).

1. Высокие показатели связи, выявленные статистическими методами, строго говоря, означают не связь, а высокую вероятность существования связи, поэтому за этим должна следовать «процессная» интерпретация количественных показателей.
2. Необходимо строго оговаривать, какой набор элементов системы и по какому правилу отобран для анализа, что позволяет обозначить границы системы, к которой применимы полученные результаты.
3. Оценка связи может оказаться ложной из-за неадекватного реальности математического вида зависимости. Требуется сопоставление качества большого количества линейных и нелинейных моделей связей между одними и теми же переменными, что резко повышает трудоемкость анализа.
4. Невозможность перебора всех возможных пар (сочетаний) свойств компонентов требует предварительной классификации свойств по характерным временам и пространствам их проявления. Наличие связи между свойствами позволяет вы-

двигать гипотезу о близких характерных временах процессов, порождающих их дифференциацию (которая, разумеется, не во всех случаях подтверждается).

5. Поскольку ландшафт несводим к совокупности парциальных систем, существует проблема определения пространства, в котором наблюдается согласованное варьирование всех (или большинства) компонентов, что может служить показателем однородности (одинакового происхождения вариабельности) на некотором иерархическом уровне организации территории.
6. Для каждого иерархического уровня организации территории должен быть определен ведущий фактор дифференциации. В классической концепции морфологии ландшафта, разработанной на примере довольно ограниченного диапазона ландшафтных условий, уровни строго заданы иерархией форм рельефа. Является ли это всеобщим правилом и могут ли существовать (по крайней мере, в некоторых регионах или типах ландшафтных условий) другие иерархические уровни, с другими ведущими компонентами — требует тщательного изучения.
7. Должен быть задан критерий однородности, при соблюдении которого может быть выделена целостная геосистема некоторого иерархического уровня. На конкретном иерархическом уровне одни компоненты могут характеризоваться одинаковыми величинами, другие — единым типом распределения, третьи — случайным варьированием. Поэтому необходимо ранжировать характеристики каждого компонента, для которых на разных иерархических уровнях выбираются разные критерии однородности. Эта задача на качественном уровне решается очень давно и реализована в системах классификации ландшафтов, почв, растительности и т.д. Однако, здесь велика доля субъективных решений на основе опыта исследователей. При ландшафтной классификации должно быть доказано количественно, что для каждого класса свойства, которое считается ведущим для данного иерархического уровня (например, типа почвообразующей породы) характерно относительно слабое варьирование свойств других компонентов. Иначе говоря, надо доказать, что на данном иерархическом уровне квантованным состояниям ведущего фактора соответствуют непересекающиеся (в идеальном случае) диапазоны свойств других компонентов. Только тогда классификация территории по некоторому ведущему компоненту, будет иметь однозначно комплексное «ландшафтное» содержание.
8. Технологическая проблема получения исходных данных состоит в доступности в основном точечных полевых описаний и невозможности получить континуальную картину пространственного варьирования почв, грунтовых вод, почвообразующих отложений. В лучшем случае исследователь имеет дело с интерполированными по точечным наблюдениям данными, или интерполяцией на основе моделей связи с рельефом или растительностью. Рельеф и растительность доступны для континуальной характеристики благодаря цифровым моделям рельефа и космическим и аэро- снимкам, однако пространственное разрешение этих данных (размер пиксела) будет оказывать решающее влияние на результаты оценки межкомпонентных связей. Поэтому проблема выбора и четкого обоснования мельчайшей операционной территориальной единицы (ОТЕ) становится ключевой для интерпретации результатов и привязки их к тому или иному иерархическому уровню. Снизить зависимость от такой вынужденной дискретности можно посредством использования характеристик не только самой операционной единицы, но и ее некоторой окрестности.

9. Каждая геосистема вложена в более крупную и состоит из более мелких геосистем. Поэтому возникает необходимость распознать, какие ее свойства меняются при пересечении границы и переходе в соседнюю геосистему того же ранга, то есть варьируют в некотором диапазоне на данном иерархическом уровне, а какие — безразличны к внутриранговым различиям и заданы состоянием вышестоящей геосистемы. Иными словами, необходимо определить константы, действующие на каждом иерархическом уровне и заданные вышестоящим уровнем. Это могут быть *константы свойств компонентов* (ограниченный диапазон варьирования) и *константы типов отношений* (ограниченный диапазон варьирования величины и знака связи).

Теснота межкомпонентных связей несет информацию о целостности природного комплекса и возможных проявлениях его резистентной и упругой устойчивости, а также о наиболее вероятных динамических тенденциях в геосистеме, обусловленных разбалансированием тех или иных геокомпонентов между собой (Коломыц, 1998). Хорошо известно, что система с абсолютно жесткими связями не может существовать в среде с сильными колебаниями параметров. Относительная «рыхлость» связей является одним из важных условий устойчивости геосистемы, позволяющим гасить разрушающий ее структуру сигнал из внешней среды (Сочава, 1978; Пузаченко, Скулкин, 1981; Г.А. Исаченко, 1998; Коломыц, 1998). Первоначальная уверенность ландшафтоведов 1940-1950-х гг. в жесткой взаимообусловленности свойств компонентов была впоследствии скорректирована в сторону предпочтения представления о вероятностных связях, в том числе по результатам исследований на ландшафтных стационарах (Г.А. Исаченко, 1997; А.Г. Исаченко, 2004; Чистяков, 2006) и исследований в смежных науках, например в геоботанике (Восточно-Европейские..., 2004). Проблема «слабых» связей может обескураживать исследователя межкомпонентных связей, применяющего количественные методы и впитавшего со студенческих лет одно из основных теоретических положений ландшафтоведения о строгой взаимообусловленности и взаимозависимости свойств компонентов ландшафта, особенно продиктованных морфолитогенной матрицей. Если не говорить о наиболее очевидном случае действительного отсутствия взаимодействия, то могут встречаются следующие варианты объяснения кажущихся «слабых» связей, которые обсуждаются в нижеследующих главах книги.

1. По мере эволюции геосистемы прочность межкомпонентных связей меняется, прежде всего — в силу стремления биотических компонентов достичь максимальной автономности от свойств абиотической среды и создать наиболее замкнутый биологический круговорот (Хильми, 1966; Коновалова, 2004). Поэтому необходимо поставить вопрос о сравнении тесноты внутрифитоценотических и почвенно-фитоценотических внутриуровенных связей, а также связей свойств почв и фитоценозов со свойствами рельефа собственно ПТК и вмещающей его геосистемы. Этот вопрос является одним из центральных в нашем исследовании и подробно рассматривается в разделе 4.4 на примере нескольких регионов. В то же время существует представление о сложных адаптивных системах, то есть о стремлении компонентов системы к максимальной взаимоадаптации в ходе эволюции. Следовательно, необходимо из всего набора свойств ландшафта определить такие, которые при увеличении возраста ландшафта увеличивают интенсивность взаимодействия и степень связанности, а также группы свойств с постепенно ослабевающим взаимодействием. При исследовании межкомпонентных отношений в ландшафте необходимо, поэтому, обеспечивать сопоставимость стадий развития

пространственных единиц, включаемых в анализ связей. В нашем исследовании в главе 4.7 проведено сравнение тесноты связей для разных сукцессионных стадий развития лесного фитоценоза.

2. Неодинаковые характерные времена развития компонентов ландшафта обусловливают наличие «памяти» ландшафта, иначе говоря, несоответствий между изменившимися, в том числе по естественным причинам, свойствами одного компонента и сохраняющимися свойствами другого компонента (Николаев, 2013).
3. Естественная динамика ландшафта (оконная, ветровальная, зоогенная и др.) приводит к формированию внешне хорошо заметных контрастов растительного и почвенного покрова, которые не обусловлены экологическими условиями и долго сохраняются в ландшафте (Бобровский, 2010). Поэтому особое значение приобретает исследование ненарушенных участков ландшафта, в которых внутреннюю мозаичность можно уверенно отнести за счет естественных факторов. В нашем исследовании этому требованию соответствуют никогда не рубленая часть ландшафта заповедника «Кологривский лес» (глава 3.1.3) и ландшафт террас Оби, который сформировался в результате естественного послепожарного развития в течение 150 лет (глава 3.1.2).
4. Свойства компонентов ландшафта формируются под действием разномасштабных процессов («одно свойство — несколько процессов разных масштабов», «разные свойства — процессы разных масштабов»). Несопоставимость масштабов процессов, которые контролируют предположительно взаимосвязанные свойства, может приводить к низким показателям связи. Частным случаем проблемы является несопоставимость шага описания компонентов. Показатель связи зависит от территориального охвата источников информации, иначе говоря, от того какой уровень ландшафтного разнообразия охвачен точками наблюдения. Появление или исчезновения значимых связей могут рассматриваться как индикатор существования того или иного иерархического уровня организации ландшафта внутри охваченной наблюдениями территории (рис. 6).
5. Неадекватность математической модели, которая по гипотезе описывает межкомпонентную связь, может завышать или занижать показатель связи. Особенно распространен случай, когда линейные показатели связи незначимы в то время как существует параболическая связь.
6. Статистические методы не всегда отражают факт ограничения разнообразия состояний зависимого компонента (значений функции) в том или ином диапазоне значений независимого компонента-предиктора (значений аргумента). Широко распространена ситуация, которая на точечном графике может быть обозначена как «эффект шипа» (рис. 4, В): при низких (или наоборот высоких) значениях предиктора значения зависимой переменной варьируют в широком диапазоне, а после превышения некоторого порогового значения предиктора допустимый диапазон значений зависимой переменной резко сужается в некотором интервале значений. Возможны варианты с несколькими интервалами высокого или низкого разнообразия состояний зависимой переменной. Налицо резкое изменение разнообразия состояний, то есть связь в буквальном смысле, однако обычные статистические методы покажут отсутствие связи как линейной, так и нелинейной. В таком случае предметом исследования становится не показатель связи как таковой, а степень вариабельности значений зависимой переменной в разных интервалах значений переменной-предиктора.

7. Наследие способов землепользования обычно наиболее ярко может проявляться в структуре растительного покрова и в свойствах почв. Разные способы и интенсивность рубок или выпаса, применявшиеся на смежных участках ландшафта могут обусловливать вариабельность состава ярусов фитоценоза, не находящую отклика в свойствах почв. Разные способы обработки почв при земледелии могут обусловливать структуру почвенного покрова, не отражаемую современным растительным покровом. Разумеется, землепользование прошлых эпох может оставлять след в виде наоборот унифицированной структуры почвенного или растительного покрова, не соответствующей в полной мере «требованиям» морфолитогенной матрицы. Исследование на смежных участках заповедника «Кологривский лес» (раздел 4.7), подвергавшихся рубкам в разные исторические эпохи при разной технической обеспеченности, позволило учесть наследие землепользования при характеристике специфики межкомпонентных связей.

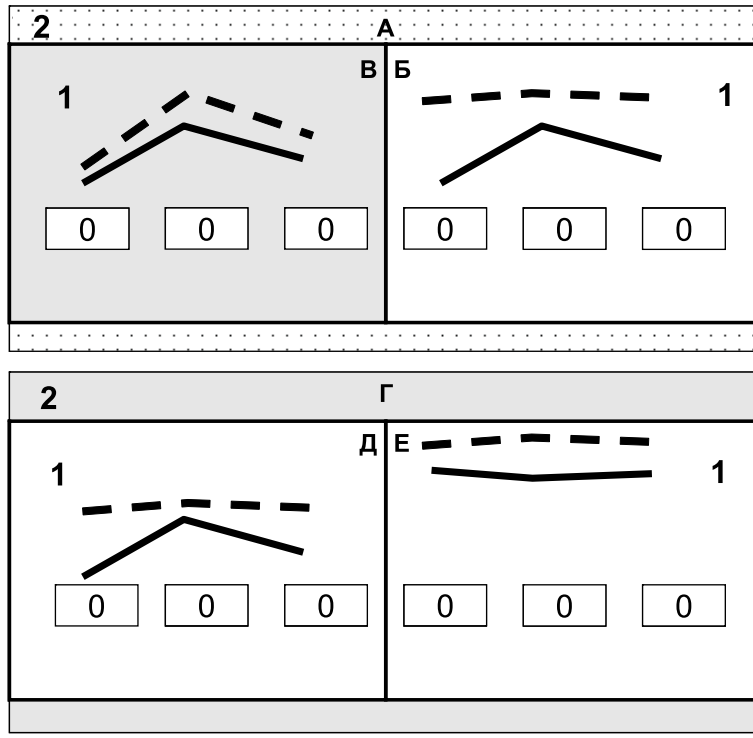

Рис. 6. Влияние уровня ландшафтного разнообразия, охваченного выборкой на результат оценки тесноты межкомпонентных связей. Сплошная и пунктирная линии – два свойства компонентов ландшафта, варьирующие между геосистемами уровня 0 в пространстве геосистемы уровня 1. На верхнем рисунке — связь слабая для уровня 2 (модель А, точечный фон); сильная — в одной из геосистем уровня 1, (модель В, серый фон); отсутствует в другой геосистеме уровня 1 (модель Б, белый фон). На нижнем рисунке внутри каждой из геосистем уровня 1 связь не выражена (модели Д, Е — белый фон). Две геосистемы уровня 1, формирующие вместе геосистему уровня 2, резко различаются по значениям обоих показателей, поэтому в модели Г связь сильная (серый фон). А–Д — виды моделей связей, пояснения см. в тексте.

Итак, адекватная оценка системообразующего значения межкомпонентных связей в большой степени зависит от выбора масштаба, который определяется размером операционной территориальной единицы, охвата территории, ее ландшафтного разнообразия. Необходимо определить размеры пространства, в котором межкомпонентные отношения подчиняются единому правилу.

2.6. Характерное пространство межкомпонентных отношений

В свое время предлагался термин «характерное пространство» геосистемы (Пащенко, 1990, 1993). В связи с поставленной задачей в нашей работе предлагается понятие х*арактерное пространство «внутриуровенных» межкомпонентных связей,* близкое англоязычному понятию «characteristic space scale». Оно определяется:

а) размером операционной территориальной единицы,

б) размером мозаичной территории, на которой значения группы свойств сопряженно варьируют в пространстве по единому правилу, то есть под действием единого фактора; иначе говоря — пространством единого правила варьирования свойств ландшафтных единиц одного иерархического уровня.

Опишем два способа установить масштаб и условия, при которых реализуется межкомпонентная связь.

Первый способ подразумевает варьирование выборки. Сформулируем вопрос следующим образом: при каких условиях свойства одного компонента зависят от свойств другого, а при каких — не зависят (то есть превалирует действие иных более сильных факторов). Во-первых, можно увеличить или уменьшить территориальный охват, исходя из гипотезы прямой связи между размером территории и ландшафтным разнообразием. После этого производится перерасчет модели и оценка приращения или падения ее качества. Во-вторых, можно включать или исключать из выборки наблюдения по тому или иному принципу, то есть сравнивать модели для разных типологических категорий ПТК. Этот путь применялся в исследованиях Института географии СО РАН в 1970-х гг. (Крауклис, Евдокимова, 1975). Высокие показатели тесноты межкомпонентных связей свидетельствуют о наличии внутренних различий состояния компонентов внутри массива данных. Исключение той или иной категории фаций из массива данных может показать либо увеличение, либо уменьшение качества модели. Повышение качества модели будет означать допустимость более дробного подразделения оставленной группы и выделения более низкого иерархического уровня.

Возьмем для примера таежный ландшафт, в котором оценивается сопряженность свойств древесного и травяного ярусов и почв. Пусть в группе ПТК ельников на основании высокого качества модели связи между свойствами фитоценоза и почв потребуется разделение редкостойных с травяным ярусом и сомкнутых мертвопокровных лесов, которые приурочены к контрастным почвенным разностям. Низкое качество первоначальной модели для высокого иерархического уровня 2 (рис. 6, А) свидетельствует об отсутствии единого правила, которое связывает два свойства в шести геосистемах уровня 0. Из этого следует, что геосистема уровня 2 фактически не существует, так как нет единого процесса, обусловливающего варьирование двух свойств. Если снизить разнообразие данных за счет исключения из выборки группы Б, то качество модели может повыситься, что свидетельствует о наличии такого правила в группе В, которая образует геосистему уровня 1 (рис. 6). Если же качество модели для уровня 2

было изначально высоким (рис. 6, Г), но из нее исключается группа Д, то качество модели Г снизится. Это будет означать, что исключенная группа Д представляла одну из двух контрастных геосистем уровня 1 (Д и Е), которые в совокупности образовывали геосистему уровня 2 с единым правилом дифференциации. В неисключенной группе геосистем уровня 0 (модель Е) строго взаимосоответствия компонентов нет. Применительно к ландшафтным объектам, а конкретнее — к модели почвенно-фитоценотических связей, это может означать, что в оставшейся группе объектов: а) при любых почвах может существовать широкий диапазон фитоценозов; б) существует широкий диапазон возможных сочетаний почв и фитоценозов; в) фитоценоз может находиться в разных сукцессионных состояниях на одной и той же почве. Причиной такой «слабой связи» может быть наличие на территории разных стадий развития ПТК, запаздывание реакции почв на изменения по сравнению с изменениями фитоценозов, разное характерное время почв и фитоценозов, случайные нарушения почв или фитоценозов и т.п.

Второй способ предусматривает расчет меры расхождения между значениями, предсказанными моделью связей, и значениями наблюдаемыми (так называемые «остатки от модели»). Разумеется, это имеет смысл только при общем высоком качестве модели. Остатки близкие к нулю соответствуют группе наблюдений, которые строго подчиняются выявленной закономерности, например — уменьшению доли теневыносливых трав по мере роста доли лиственных пород в таежном ландшафте. Далее производится перебор гипотез, позволяющий выявить условия, при которых модель «работает» наиболее четко. Закономерность может, например, четко проявляться только на водораздельных поверхностях; долинные наблюдения при этом имеют большие по модулю остатки, что свидетельствует о «вмешательстве» других факторов, в том числе приоритетном вкладе иной парциальной структуры (по В.Н. Солнцеву), наличии квазикоренных фаций (по В.Б. Сочаве, А.А. Крауклису), иного генетического ряда ПТК (по Ф.Н. Милькову). Например, обилие теневыносливых трав может в долинах зависеть не только от состава древостоя, как на водораздельной поверхности, но еще и от экспозиции склона, т.е. чисто биотическое взаимодействие корректируется дополнительным геофизическим абиотическим фактором.

При изменении размера анализируемой выборки появляется возможность и необходимость сравнить исходную и новую выборки по типам статистического распределения данных. С точки зрения изучения структуры ландшафтов это означает проверку гипотезы о наличии или отсутствии резко выраженного ведущего фактора, определяющего варьирование значений свойств компонентов между контрастными элементами пространственной структуры. Если значения анализируемого свойства подчиняются нормальному распределению, то это означает следующее. Внутри анализируемой территории есть внутренние различия, но преобладают значения свойств близкие к среднему, а отклонения от среднего в обе стороны более или менее строго уравновешены; чем больше отклонения, тем они менее вероятны. Действующие факторы более или менее уравновешивают друг друга, ни один из них не является ведущим. Исходная «большая» выборка, характеризующая обширную территорию, может по одному ряду свойств оказаться нормальной, а по другому ряду — не соответствовать нормальному распределению. Соответственно, в первом случае выявится равновесное действие множества процессов, во втором — наличие сильного неравновесного процесса, который рано или поздно приведет к изменениям в пространственной структуре. О возможном наличии связи между гипертрофированным действием какого-либо фактора и сниже-

нием устойчивости геосистемы было заявлено почти 40 лет назад (Михеев, Мадасова, 1977). *Появляется задача разделения свойств ландшафта на группы, отражающие подчиненность составляющих его парциальных геосистем разным одновременно протекающим процессам*.

2.7. Проблема разделения вкладов факторов

Большинство характеристик ландшафта, так или иначе, связано друг с другом. Конкретное измеренное значение свойства ландшафта (обилие вида, мощность почвенного горизонта и т.д.), как правило, является результатом суперпозиции множества факторов (В.Н. Солнцев, 1997). Поэтому наблюдаемое значение свойства (например, обилия вида растений) не дает однозначной информации об истинном положении точки на оси экологического фактора (например, влажности). Нужна уверенность, что вид появился не случайно, а в группе видов со сходными требованиями к фактору. Состав этой группы позволит понять, насколько сильно выражен фактор. Эту проблему позволяет решить отражение согласованного поведения свойств значениями осей многомерного шкалирования или факторного анализа. Эти методы выделяют оси, значение которых уже фактически является отражением межкомпонентных связей (а точнее — связей между некоторыми свойствами). Положение точки наблюдения на оси точно отражает силу действия одного из экологических факторов (влажности, трофности, освещенности и др.), причем не для одного показателя, а для целой их группы. Однако отклик компонента ландшафта на внешний фактор может быть не только прямой, но и косвенной. Проиллюстрируем это положение на примере восточноевропейской тайги, где, помимо бореальных, могут спорадически встречаться неморальные виды трав. Прямой отклик может формулироваться так: «если склон крутой, то обязательно растут копытень и медуница, а если пологий, то не растут». В этом случае подразумевается, что крутой склон лучше дренирован, чем пологий, причем крутой склон — признак принадлежности к геосистеме более высокого ранга — речной долине. Само наличие долины с крутыми склонами, в свою очередь, может быть признаком принадлежности к ландшафту возвышенной глубокорасчлененной равнины с восходящими неотектоническими движениями и выходами в долинах на поверхность плотных дочетвертичных горных пород. Но реакция компонента ландшафта на внешний фактор может быть и опосредована через другие свойства. Например: «копытень и медуница растут только на гумусированных почвах», но «гумус накапливается только на склонах долин». Тогда высокая статистическая связь с гумусированностью фактически отражает общую реакцию видового состава и гумусированности на условия дренированности, обеспеченные рельефом долины. Наконец, не исключено, что сами копытень и медуница могут, поселившись в силу каких-то причин на склоне, способствовать гумусонакоплению. Тогда «гумуса много, потому что много копытня и медуницы», то есть существует связь между фитоценозом им почвами, независимая от рельефа и отражающая саморазвитие природного комплекса.

Таким образом, возникает необходимость разделить *вклады нескольких составляющих в варьирование свойств компонентов* — одна из наиболее важных задач ландшафтоведения.

Во-первых, это *детерминированная составляющая* — варьирование, связанное с принадлежностью к той или иной геосистеме более высокого ранга. Рельеф (в приве-

денном выше примере — «крутой склон») рассматривается не только как собственная характеристика ПТК, но и как косвенная характеристика геосистемы более высокого ранга (долины), обусловливающая определенные константы в свойствах заключенных в ней ПТК. Важен при этом не сам рельеф как таковой, а процессы, ход которых определяется (или определялся в прошлом, но унаследован современными характеристиками ландшафта) его свойствами (дренированность крутого склона). Если ряд ПТК принадлежит геосистеме более высокого ранга, то всем им присущи некоторые общие свойства.

Во-вторых, это *составляющая саморазвития* - результат варьирования под действием свойств других компонентов. Однако сложность состоит в том, что и другие компоненты могут варьировать в пространстве не сами по себе, а под влиянием тех же характеристик рельефа вышестоящей геосистемы, что и интересующее нас свойство. Поэтому необходимо разделить: а) варьирование, зависимое от вышестоящей геосистемы, и б) независимое сопряженное варьирование двух свойств, отражающее их взаимовлияние (обратная связь) или одностороннее влияние (прямая связь).

Способом решения проблемы разделения результатов саморазвития и детерминированных свойств может быть построение единого факторного пространства для объединенного массива данных о свойствах всех компонентов и рельефа. Если объединить в один массив данных все измеренные свойства самой ОТЕ и вмещающих ее геосистем (то есть присущие также и ОТЕ), то можно попытаться установить, какие из измеренных свойств варьируют сопряженно с рельефом вышестоящих геосистем, а какие независимо от него. Подчеркнем, что вмещающая геосистема может характеризоваться не только рельефом, но и другими свойствами (см. главу 2.2); рельеф же используется в данной работе для примера — как один из возможных вариантов.

С этой целью можно применить метод главных компонент для массива, который объединяет оси дифференциации свойств, измеренных непосредственно в ОТЕ (растительность, почвы, отложения), и свойства рельефа в разных окрестностях каждой ОТЕ (свойства рельефа вмещающих геосистем). В результате должны быть выделены независимые интегральные «*суперфакторы*» двух групп. Объясним принцип разделения всех суперфакторов на две группы (рис. 7).

Первая группа суперфакторов (суперфакторы 1 и 2 на рис. 7) должна иметь высокие факторные нагрузки для морфометрических характеристик рельефа вмещающих геосистем и некоторых свойств ландшафта, зафиксированных в пределах ОТЕ. Она должна отражать их сопряженное варьирование, то есть отражать *межуровневые взаимодействия, зависимые от рельефа вмещающих геосистем и управляющие частью свойств ландшафта*. Вторая группа суперфакторов (суперфакторы 3 и 4 на рис. 7) должна иметь близкие к нулю факторные нагрузки для морфометрических характеристик рельефа и большие по модулю факторные нагрузки для свойств компонентов ландшафта, измеренных в ОТЕ, то есть отражать *внутриуровенные межкомпонентных взаимодействия*.

Некоторые свойства компонентов могут иметь высокие нагрузки по обеим группам суперфакторов, что должно отражать их участие как в межкомпонентных отношениях внутри фации, так и подчиненность процессам во вмещающих геосистемах. Другие свойства могут быть связаны лишь со свойствами других компонентов, но не участвовать в процессах вмещающих геосистем, то есть быть результатом исключительно локальных условий. Наконец, часть свойств может варьировать исключительно под

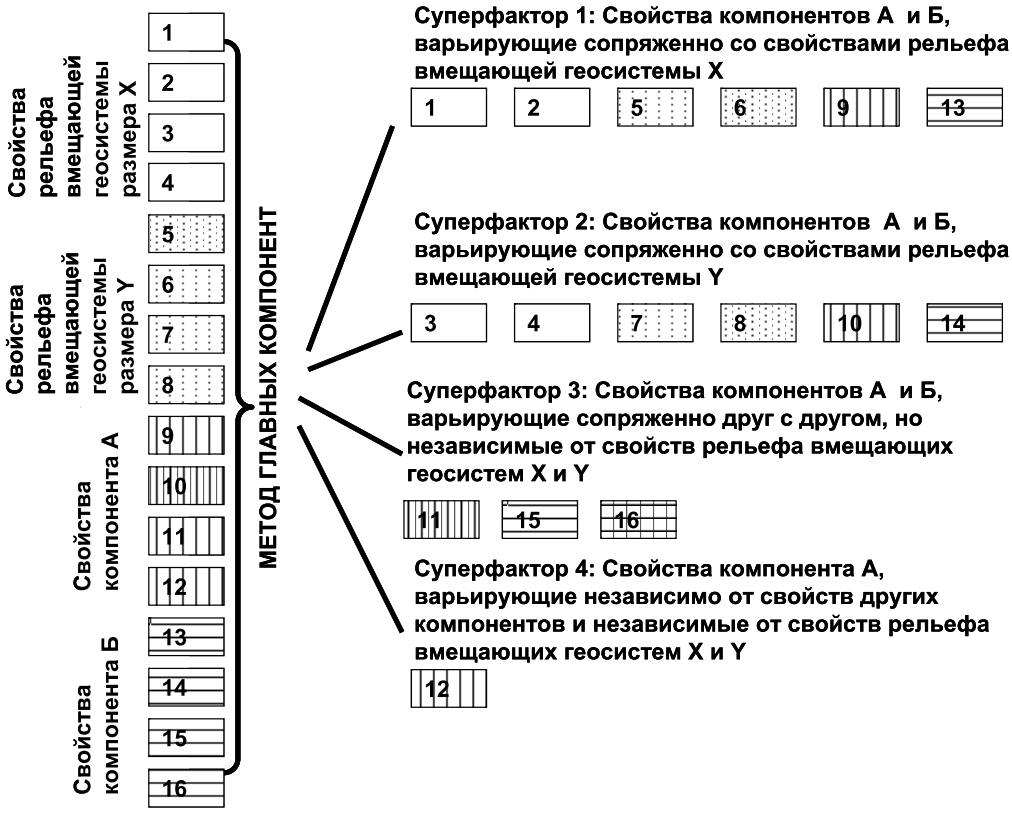

Рис. 7. Схема разделения вкладов факторов пространственного варьирования свойств компонентов

влиянием зависимых от рельефа процессов. Таким образом, мы можем разделить и количественно оценить часть варьирования каждого свойства, связанную с рельефом вмещающих геосистем, и часть, обусловленную собственно межкомпонентными (вертикальными) связями на уровне фации (почвенно-фитоценотические связи, внутрифитоценотические связи, почвенно-литологические связи и др.). Метод разделения вкладов факторов более подробно рассматривается в разделе 3.2.3, а реализация метода — в разделе 4.5.

Разделение вкладов внутриуровенных и межуровневых взаимодействий позволяет перейти к более подробному анализу каждого из этих типов взаимодействий. *Центральным предметом анализа межуровневых взаимодействий становятся вклады разных гипотетических иерархических уровней вмещающих геосистем и существование одного или нескольких иерархических уровней, контролирующих свойства ОТЕ. Центральным предметом анализа внутриуровенных взаимодействий становятся соотношение внутрифитоценотических и почвенно-фитоценотических связей, а также синергетические эффекты взаимодействия независимых парциальных ландшафтных структур.*

2.8. Синергетические эффекты внутриуровенного взаимодействия независимых парциальных геосистем

Построением моделей внутриуровенных межкомпонентных связей решается серия задач, связанных с выявлением региональной специфики вертикальных структур, возможных цепных реакций при внешних воздействиях, траекторий саморазвития ландшафта. Снижение размерности исходных данных позволяет оперировать интегральными переменными, отражающими чувствительность групп свойств к экологическим градиентам. Однако идеологии ландшафтоведения в большей степени соответствует исследование синергетических эффектов взаимодействия взаимонезависимых парциальных геосистем, что создает условия для синтеза целостных ландшафтных единиц. Поэтому необходимы модели, которые дают возможность исследовать зависимость одной группы свойств, чувствительной к некоторому градиенту, от всей совокупности свойств другого компонента, отражающих его чувствительность к нескольким факторам и градиентам. Таким способом можно не только проверить гипотезу, что разными компонентами управляют одни и те же факторы, но и исследовать «корректирующее» воздействие тех свойств, которые варьируют в пространстве согласованно с иными факторами. Следует учитывать, что свойство компонента (например, обилие видов травостоя) напрямую воспринимает не все сигналы от других компонентов (например, от почвы), но часть этих сигналов воспринимается косвенно через «передаточное звено» (например, через древостой, который воспринимает прямой сигнал от почвы) (рис. 8). Поэтому требуются модели, которые исследуют зависимость конкретного свойства компонента как реакции на положение на экологическом градиенте от всей совокупности свойств другого компонента, которая отражает совместное влияние на него множества независимых факторов.

Так, например, можно построить модель зависимости свойств травостоя, чувствительных к градиенту влажности, от всей совокупности свойств древостоя, который выступает как единое целое по отношению к отдельным видам травостоя. Безусловно, часть варьирования свойств обоих ярусов определяется влажностью почв (факторы A1 и A2 на рис. 8). Представим группу урочищ песчаных бугристых террас с елово-сосновыми лесами. В сухих гигротопах вершин песчаных эоловых бугров в травостое будет встречаться кошачья лапка, а в мокрых гигротопах межбугровых понижений — пушица влагалищная. В модели вида A1=f(A2) два этих вида трав будут иметь противоположные факторные нагрузки по оси влажности, а две названные фации — характеризоваться противоположными по модулю высокими факторными значениями. Среди факторов дифференциации видового состава древостоя наверняка окажется один, ответственный за варьирование в зависимости от влажности (A1), и он будет коррелировать с осью влажности травостоя A2: в более дренированных местообитаниях вместе с сосной встречается ель, а в менее дренированных - ива. Однако, обилие пушицы и кошачьей лапки в некоторых конкретных фациях может не соответствовать ожидаемому по модели A1=f(A2), если учитывать только фактор влажности. Причиной может быть варьирование механического состава почв, определяющее минеральное питание: например присутствие в некоторых фациях суглинистых линз на глубине порядка десятков сантиметров. Сама кошачья лапка может непосредственно «не чувствовать» суглинистого горизонта в силу мелкого залегания корневой системы, в то время как деревья своими более глубокими корнями получают питание из этого горизонта. Если в модель добавить в качестве предикторов все достоверные оси дифференциации дре-

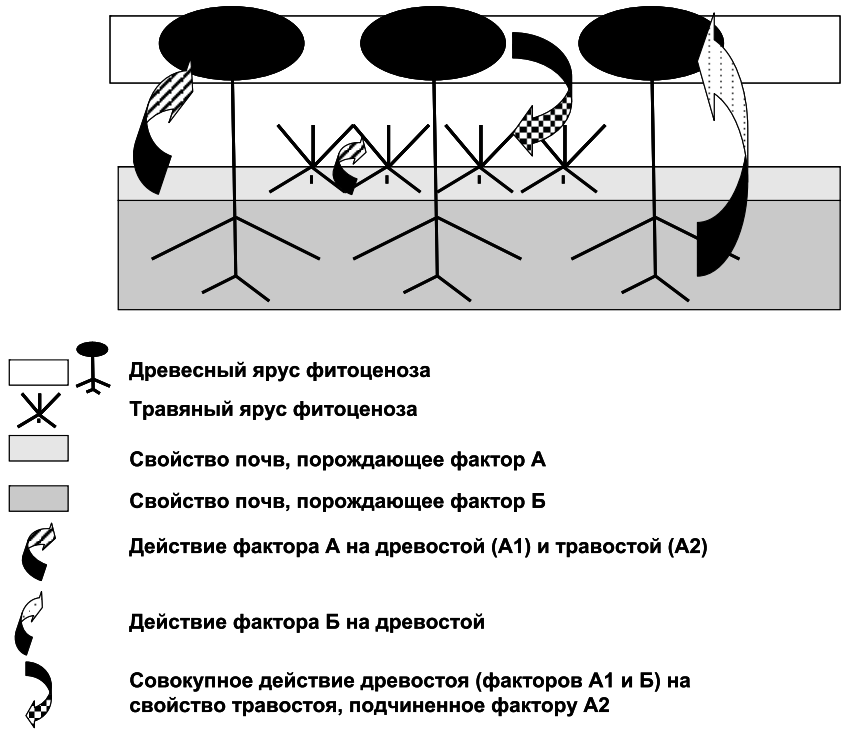

Рис. 8. Прямое и косвенное воздействие факторов на свойства компонентов ландшафта. Пояснения см. в тексте.

востоя (в том числе ось трофности Б), то мы можем получить более высокое качество описания обилия влагозависимых трав. Тогда фация, где обилие кошачьей лапки ниже ожидаемого при данном сухом или свежем гигротопе, станет подчиняться модели A1=f(A2, Б). Свой вклад в объяснение ее варьирования будет вносить фактор дифференциации древостоя, объясняющий, что на почвах, где пески подстилаются на некоторой глубине суглинком, в древостое присутствуют сосна и ель, а на чисто песчаных почвах — только сосна (фактор Б на рис. 8). Тогда вполне возможно, что в одинаково дренированных местообитаниях в чисто сосновом древостое кошачья лапка присутствует, а в елово-сосновом — исчезает, так как внедрение ели в древостой создает затенение. Этой моделью мы иллюстрируем влияние древостоя как единого целого всеми его эмерджентными свойствами на проявление чувствительности группы травянистых видов к влажности. Можно представить включение еще одного механизма коррекции чувствительности травостоя к влажности местообитания: в одинаково дренированных местообитаниях в молодом древостое кошачья лапка присутствует, а в более зрелом — исчезает, так как внедрение ели в древостой создает затенение и повышает запасы влаги и элементов питания в почве. Тогда обилие влагозависимых видов травостоя корректируется сукцессионным фактором (В), контролирующим видовой состав древостоя; модель приобретает вид A1=f(A2, Б, В).

Сравнивая модели, построенные для разных сочетаний свойств компонентов, мы можем установить:

1. какие свойства более тесно сопряжены с варьированием других компонентов и потому могут быть подвержены быстрой динамике при изменении их состояния, например, при пожаре, вырубке, заболачивании и др., а какие относительно независимы или толерантны к широкому диапазону их варьирования;
2. какие свойства фитоценоза подчиняются в большей степени внутрифитоценотическим связям (либо прямо зависят от свойств других ярусов, либо воспринимают сигнал абиотических и биокосных компонентов только косвенно через реакцию других ярусов), а какие строго связаны с варьированием свойств почв;
3. какие свойства компонентов ландшафта не связаны с большинством других свойств и поэтому могут рассматриваться как подчиняющиеся процессам с принципиально иными характерными временами;
4. какая группа свойств может считаться «узлом» (Коломыц, 1998) межкомпонентных внутриуровенных связей и в наилучшей степени служит «центральным звеном» наиболее совершенной «звездно-лучевой» формы связи (Михеев, Мадасова, 1977), индикатором либо эдификатором свойств других компонентов;
5. являются ли наиболее значимые факторы дифференциации каждого компонента одновременно наиболее тесно связанными со свойствами других компонентов (и, следовательно, существует единое для всех компонентов общее главное правило пространственной дифференциации) либо есть компоненты, которые в первую очередь подвержены саморазвитию и лишь на этом фоне второстепенное значение имеет влияние других компонентов.

Средства статистического анализа позволяют строить и сравнивать модели внутриуровенных межкомпонентных связей разного вида, прежде всего — линейные и нелинейные. Линейные модели, преобладавшие на раннем этапе исследования межкомпонентных связей (Крауклис, Евдокимова, 1975; Нечаева и др., 1975; Михеев, Мадасова, 1977; Кобелева и др., 1979; Геосистемы..., 1991), могут давать как завышенный результат при отклонении массива данных от нормального распределения, так и приводить к ложному заключению об отсутствии связи при параболическом типе зависимости, когда в одном диапазоне значений предиктора связь положительная, а в другом — отрицательная (Пузаченко, 2004). Рост доли описанной дисперсии какого-либо свойства при добавлении нелинейной составляющей в модель

$y=a+b1x1+b2x2+b3x1^2+b4x2^2+b5x1x2+\varepsilon$

вместо

$y=a+b1x1+b2x2+\varepsilon$

позволяет выявить (рис. 9):

- ✓ неаддитивные эффекты совместного действия двух факторов,
- ✓ эффекты самоусиления или самоингибирования,
- ✓ диапазоны значений свойств предиктора, при которых реакция зависимого свойства противоположна,
- ✓ критические пороги резкого изменения свойств при достижении некоторого состояния предиктора,
- ✓ количественные критерии оптимальных и стрессовых состояний свойства в зависимости от значений предиктора.

Перечисленные виды информации, которые можно извлечь из нелинейных моделей

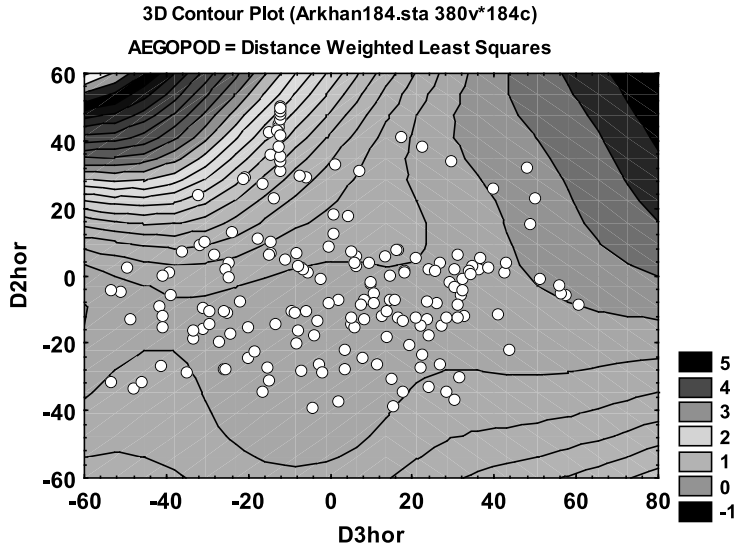

Рис. 9. Информативность нелинейных эффектов взаимодействия свойств компонентов. Повышенное обилие сныти (AEGOPOD) обусловлено эмерджентным эффектом совместного действия двух факторов — процессов, действующих в почвах: гумусонакопления благодаря повышенному количеству оснований (D2hor) и формированию вложенного субпрофиля альфегумусового подзола (D3hor). Простое регрессионное уравнение первой степени обеспечивает 29% описания варьирования обилия сныти. Введение 2-й степени позволяет учесть эффекты совместного действия факторов, что и обеспечивает рост качества описания: 43% описания обилия сныти. Среднетаежный полигон «Заячья».

межкомпонентных связей и сравнения их с линейными, важны для оценки устойчивости ландшафта к внешним природным или антропогенным воздействиям. Становится возможным разделить диапазоны нечувствительности к внешнему воздействию и уязвимости к нему.

Итак, моделирование внутриуровенных межкомпонентных связей позволяет оценить соотношение внутрифитоценотических и почвенно-фитоценотических связей, а также синергетические эффекты взаимодействия независимых парциальных ландшафтных структур. Теперь можно перейти к проверке гипотезы, что часть свойств ОТЕ зависят не только или не столько от свойств ее вертикальной структуры, сколько от рамочных условий (констант), заданных вмещающей геосистемой.

2.9. Резонансное пространство межуровневых связей

Набор характеристик вмещающей геосистемы, привлекаемых для объяснения вертикальной структуры ОТЕ зависит от приоритетного аспекта исследований. Приведем несколько возможных примеров характеристик вмещающей геосистемы.

1. Соотношения типов растительного покрова как фактор формирования микроклимата, водного и теплового режима.

2. Положение в водосборном бассейне (удельная площадь водосбора и удельная дисперсивная площадь) и в ландшафтно-геохимической системе как фактор рассеяния и аккумуляции загрязняющих веществ.
3. Степень типичности/уникальности ОТЕ для вмещающей геосистемы как фактор резистентной и упругой устойчивости к климатическим изменениям и потенциала триггерных эффектов.
4. Соотношение земельных угодий, характеристики расположения относительно хозяйственных объектов как фактор беспокойства для животных, инвазий видов, загрязнения компонентов ландшафта.

Каждая из перечисленных характеристик может быть рассчитана для разного территориального охвата и для окрестностей разной геометрической формы, что позволяет сравнивать результаты тестирования гипотез о значимом для состояния ОТЕ размере вмещающей геосистемы (надсистемы). В дальнейшем мы анализируем преимущественно морфометрические характеристики рельефа как значимые для ОТЕ рамочные условия. Они могут определять уровень и направление движения грунтовых вод или микроклимат, индицировать геологическое строение или неотектоническую тенденцию.

Для определения размера вмещающей геосистемы делается предположение, что если изменятся характеристики рельефа в некоторой окрестности ОТЕ, то должны измениться и характеристики самой ОТЕ. Это будет означать передачу информации с вышестоящего уровня геосистем на нижестоящий, то есть трансляцию информации от одного масштаба к другому. Разумеется, такой вывод можно будет делать только на основании исследования статистически значимого массива данных на предмет отношений операционных территориальных единиц и их окрестностей. Вмещающую геосистему (уровень «+1») со свойственным ей размером, свойства и процессы которой налагают ограничения на возможные состояния свойств ОТЕ (уровень «0»), назовем «*резонансным пространством межуровневых связей*». В корень «резонанс», по аналогии с техническим понятием о совпадении частот явлений, мы вкладываем *приоритет* данного размера окрестности перед другими размерами, установленный после сравнения серии статистических моделей. Образно говоря, ОТЕ как бы «выбирает» из множества возможных вышестоящих геосистем ту, которой она «согласна» подчиняться, информацию (рамочные условия) от которой «усваивает». Окрестность можно задать либо однозначно, исходя из полевых наблюдений за размерами ПТК (например, средние размеры урочища для операционной единицы ранга фации), либо производить предварительную серию экспериментов по расчету исследуемых связей, меняя размеры окрестности и подбирая «резонансный» уровень. В нашей работе осуществляется второй из этих способов. Так или иначе, относя характеристики окрестности к ОТЕ, мы характеризуем ее не только собственными свойствами (например, видовой состав, форма микрорельефа), но и свойствами, которые ей заданы «сверху». Например, характеристикой ОТЕ, сопоставимой по размерам с фацией (метры – десятки метров), является не только принадлежность к форме микрорельефа (согласно традиционному определению Н.А. Солнцева) — слабоврезанной ложбине стока (имеющей определенную степень вогнутости и уклон), но и к урочищу пологого (характеристика градиента высот) южного (характеристика солярной экспозиции, теплообеспеченности) склона, слабо расчлененного серией многочисленных (характеристика горизонтальной расчлененности рельефа) неглубоких (характеристика вертикальной расчлененности) ложбин, примыкающего к руслу реки (характеристика расстояния до водотока, которое может оказаться существенным для жизни фации во время весеннего

подтопления). Для соседней снизу фации той же ложбины ее собственные морфометрические характеристики (уклон и вогнутость) могут быть теми же самыми, но приближение ее к руслу разливающейся весной реки (т.е. изменение позиции в форме мезорельефа) может сделать ее более уязвимой к весеннему подъему грунтовых вод. Таким образом, соотнося с одним пикселом-фацией как его собственные характеристики, так и характеристики вышестоящей единицы, и оперируя включением в модель то первых, то вторых, мы получаем возможность оценить связи его со средой на нескольких иерархических уровнях. Если увеличить окрестность, то тем самым высказывается гипотеза о том, что наша фация зависит от геосистемы более крупной. Такая же последовательность рассуждений может быть применена для ОТЕ другого размера — например, зависимость свойств ОТЕ, сопоставимой по размерам с урочищем (сотни метров), от свойств вмещающей его местности.

Исходным пунктом авторского подхода служит положение, что изначально размеры возможных вмещающих геосистем неизвестны (рис. 10, А). Затем выдвигается и проверяется серия гипотез об их размерах (рис. 10, Б, уровни 1–5). Далее, составляются статистические модели, связывающих каждое свойство ОТЕ (серые кружки на рис. 10, Б) со свойствами окрестностей разного размера (уровни 1–5). Сравнение качества моделей позволяет принять решение о том, какие из гипотетических вмещающих геосистем реально создают рамочные условия на каждое свойство. В результате получаем классификацию свойств по отзывчивости к вмещающим геосистемам разных уровней (рис. 10, В, кружки с разными штриховками). В данной книге окрестность имеет квадратную форму с ОТЕ в качестве центрального пиксела и нечетным количеством пикселов по каждой стороне. В принципе в зависимости от специфики территории и возможностей используемой компьютерной программы может применяться и иная геометрическая форма окрестности (прямоугольник, круг). Та окрестность ОТЕ, при которой зависимость ее свойств от рельефа окрестностей максимальна, интерпретируется как «резонансное пространство» межуровневых межкомпонентных связей и как *характерное пространство процесса, ответственного за дифференциацию* того или иного свойства фитоценоза, почв или других компонентов. Размер окрестности, при котором достигается подобный «резонанс», трактуется как размер геосистемы более высокого ранга, чем ОТЕ. Разумеется, не исключается вариант, когда ОТЕ подчиняется нескольким иерархическим уровням вмещающих геосистем. Особые эмерджентные свойства ОТЕ возникают как результат совокупного воздействия форм рельефа и связанных с ними процессов в геосистеме более высокого ранга. Внутри такой мозаичной (иногда даже весьма контрастной по диапазону свойств) геосистемы действует единый фактор дифференциации ОТЕ. Поэтому такая система с единым типом связей между компонентами близка к понятию «парагенетическая система» Ф.Н. Милькова (1990) с той поправкой, что составляющие ее участки пространства необязательно образуют один компактный ареал (приводимые Мильковым примеры касаются компактных территорий с четко выраженным ядром типа заболоченной котловины, карстовой воронки, эрозионной формы). О необходимости переноса центра внимания ландшафтоведения на ландшафты-ареалы, однородные в буквальном смысле (одного рода, т.е. с общим эффектом сопряжения) системы писал также А.Ю. Ретеюм (2006).

На выходе анализа будет получена классификации свойств компонентов ландшафта по чувствительности к свойствам окрестностей разного размера, а, следовательно, и к процессам, ответственным за обособление вмещающих геосистем (рис. 10, В). Это

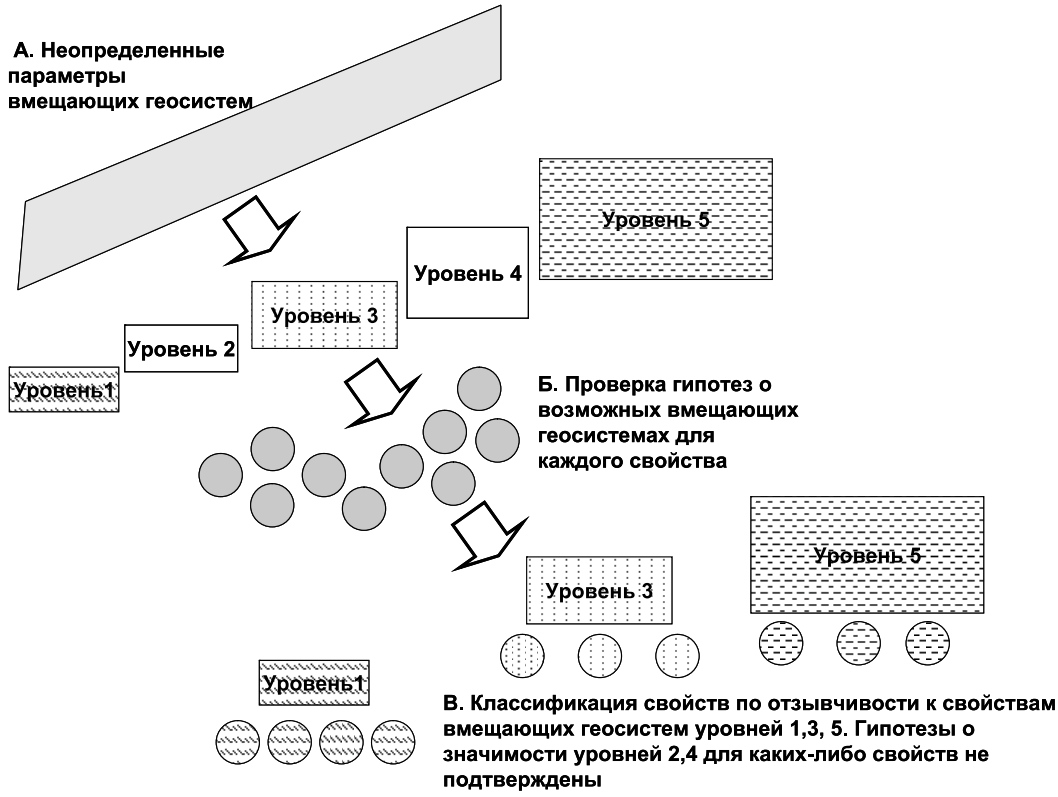

Рис. 10. Модель перебора гипотез о размерах вмещающей геосистемы и определения резонансного уровня для каждого свойства (пояснения см. в тексте).

дает основания для соотнесения характеристик ландшафта с иерархическими уровнями его организации. Совпадение характерного пространства реализации межкомпонентных связей у некоторого множества свойств может служить указанием на близость характерных времен процессов, которые лежат в основе связи. Это означает возможность реального физического взаимодействия тел, свойства которых варьируют в пространстве согласованно друг с другом.

Хотя окрестность характеризуется морфометрическими признаками рельефа, это не чисто геоморфологическая информация. Разные сочетания форм рельефа могут индицировать разное геологическое строение и, соответственно, разную водопроницаемость, трофность почв, подверженность экзогенным процессам и т.п. Разные структуры рельефа могут по-разному перераспределять влагу и тепло (например, стекание холодного воздуха в овраги с локальных водоразделов и застой на плоских поверхностях). Поэтому статистически выявленная связь между морфометрией окрестности и свойством ОТЕ — это не столько влияние рельефа как такового, сколько контролируемое им совокупное влияние множества вещественно-энергетических потоков и явлений, захватывающее все компоненты ландшафта.

Зная, к какому уровню организации рельефа чувствительна некоторая группа свойств компонентов, мы получаем основания для классификации рельефа по морфометрическим свойствам этого уровня и можем использовать полученные классы как основание для классификации геосистем. С одной стороны это классификации рельефа по строго геоморфологическим критериям. С другой — мы точно знаем, что именно к такому иерархическому уровню «привязано» варьирование в пространстве ряда свойств вертикальной структуры ландшафта. Таким образом, *классификация рельефа становится не только геоморфологическим результатом, но и приобретает комплексное ландшафтное содержание*. Применение разных способов формальных классификаций рельефа по цифровым моделям для распознавания ландшафтных единиц стало с 1990-е гг. перспективным направлением объективизации ландшафтного картографирования (Пузаченко и др., 1997, 2002; Гагаева и др., 2003; Сысуев, 2003а; Мкртчян, 2008; Ерофеев, 2012).

В идеальном случае пространственное варьирование всех характеристик компонентов ландшафта наилучшим образом описывается морфометрическими характеристиками рельефа в одной и той же окрестности. Тогда можно отождествлять эту окрестность с размерами вмещающей целостной геосистемы более высокого ранга, чем ОТЕ. Этот случай соответствовал бы модели строгой детерминированности свойств ОТЕ единственным фактором, действующим на уровне этой однозначно определяемой геосистемы.

Однако в силу разного характерного времени компонентов ландшафта не только возможен, но и более реален должен быть другой случай, когда разные компоненты (фитоценоз, почвы, почвообразующие отложения) и даже разные характеристики одного компонента (ярусы фитоценоза, разные морфологические и химические свойства почв) варьируют в пространстве не согласованно, а в зависимости от характеристик окрестностей (т.е. некоторых гипотетических геосистем) разного размера. Рисунок 11 схематически отражает следующие принципиальные положения авторского подхода:

1. Иерархические уровни организации заранее не постулируются, но выявляются на основе связей свойств геосистем со свойствами гипотетических надсистем.
2. Геосистемы разных иерархических уровней независимы друг от друга, так как формируются процессами с разными характерными временами и пространствами.
3. Компонент необязательно всеми свойствами реагирует на изменение иерархического уровня организации.
4. Свойство компонента может подчиняться нескольким иерархическим уровням надсистем.
5. Группа свойств, контролируемая одним и тем же уровнем надсистемы, образует парциальную геосистему.
6. Подчиненность группы свойств одному уровню надсистем трактуется как проявление единого процесса.

Если установлена окрестность, к которой чувствительно данное свойство (например, химические характеристики почв), то ее можно отождествлять с характерным пространством некоторого процесса, задающего варьирование как свойств рельефа (или строго подчиняющегося этим свойствам), так и исследуемого свойства компонента ландшафта. Наличие или отсутствие чувствительности можно достоверно определить только на основании достаточно объемной статистической выборки, состоящей из контрастных по проверяемым свойствам описаний ПТК. Природу и время проявления процесса (про-

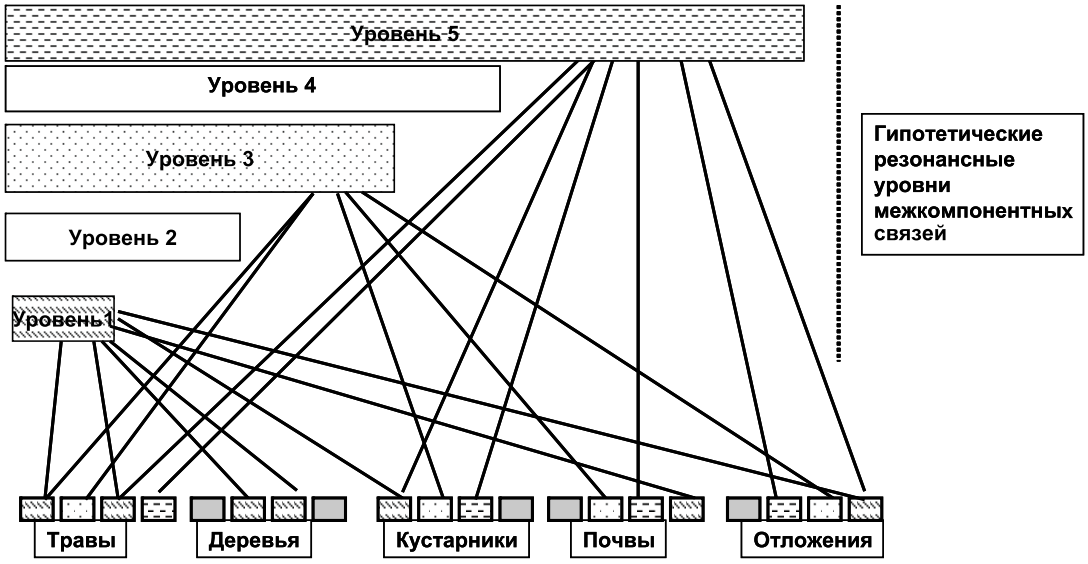

Рис. 11. Модель полимасштабности факторов дифференциации для свойств ландшафта и синтеза парциальных геосистем. Типы штриховок отражают подчиненность свойств иерархическим уровням вмещающих геосистем. Сплошная закраска означает независимость свойств от рамочных условий каких-либо вмещающих геосистем.

шлое или современность), связанного с варьированием рельефа в пространстве того или иного размера, в большинстве случаев можно выявить из анализа набора форм рельефа со свойственными морфометрическими характеристиками (рис. 12). Так, в пределах равнинного региона значимые для ландшафтной дифференциации амплитуды высот в несколько десятков метров и окрестности порядка нескольких километров в большинстве случаев соответствуют наследию неотектонических движений и разрывных нарушений высокого порядка. Амплитуды порядка метров и первых десятков метров и окрестности порядка сотен метров и первых километров адекватны наследию или современному воздействию эрозионных, карстовых, ледниково-аккумулятивных процессов. Амплитуды в пределах десятков сантиметров и первых метров и окрестности порядка десятков и первых сотен метров могут соответствовать современному развитию биогенного рельефа (на торфяных болотах, в ареале степных сурчин), аллювиального рельефа пойм малых рек. Важную дополнительную информацию для интерпретации процесса дает анализ меры согласованности характеристик рельефа и механического состава отложений, а также распространения гидрографических объектов.

В силу разных характерных времен компонентов ландшафта изменение свойств вертикальной структуры необязательно происходит согласованно по мере изменения основного фактора пространственной организации. Поэтому, определив основной фактор пространственной организации (например, рельеф), целесообразно оценить его парные связи с разными свойствами компонентов ландшафта (например, видовым составом фитоценоза). В качестве фактора организации может выступать рельеф через какое-либо сочетание его свойств, определенных по топографической карте. Его

влияние на растительность может реализовываться через процессы переноса поверхностных вод (застойный и проточный режимы), переноса грунтовых вод (медленная фильтрация в грунтовой толще и выход на поверхность), перераспределение солнечной радиации (солнечные и теневые склоны), перераспределение воздушных потоков (подветренные и наветренные склоны) и т.п. (Сысуев, 2003а).

Для определения сферы действия каждого системообразующего процесса необходимо знать в каком ареале пространственная мозаичность может быть описана единой функцией, связывающей свойства компонентов. В пределах геосистемы с единым типом связей реакция компонента ландшафта на количественное изменение организующего фактора должна выражаться одной и той же функцией. Под типом связей в математико-статистической интерпретации мы подразумеваем:

а) набор независимых переменных (например, морфометрических свойств урочища), которые влияют на состояние зависимой переменной (например, глубины грунтовых вод в пределах фации);

б) относительные вклады независимых переменных в состояние зависимой;

в) степень детерминации состояния зависимой переменной совокупностью независимых переменных.

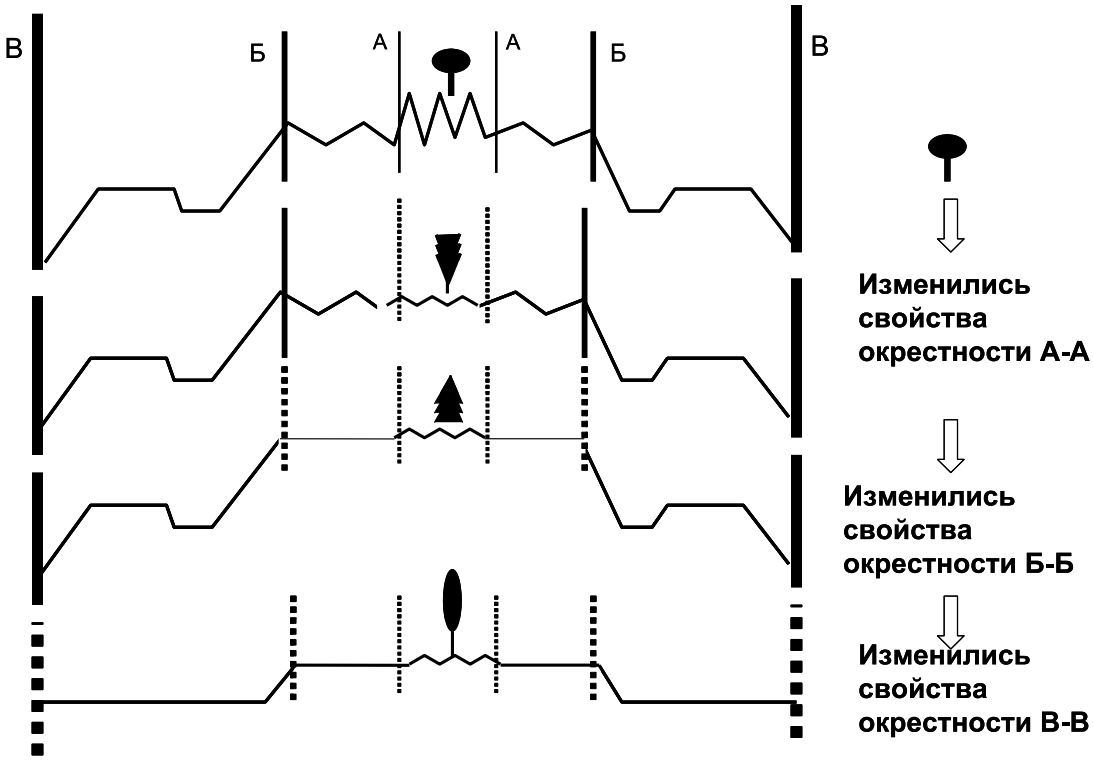

Рис. 12. Морфометрические характеристики окрестности как индикатор ландшафтоформирующего процесса.
Проверяется гипотеза, что свойство ПТК (показанное символическим изображением лесообразующей породы) меняется согласованно со свойствами некоторой окрестности.

Если на территории выделена такая система и найдена функция, отражающая связь фактора с исследуемым компонентом ландшафта, то становится возможным по виду функции представить физический процесс, отвечающий за пространственную дифференциацию. Например, если среди морфометрических параметров рельефа наибольший вклад в пространственную дифференциацию свойств фитоценоза вносят характеристики кривизны, то логично предположить реакцию фитоценотического разнообразия на рассеяние или аккумуляцию вещества в процессе плоскостного переноса (накопление элементов минерального питания у подножья склона, смыв гумусового горизонта на выпуклых крутых склонах, заболачивание в междуречной котловине, разгрузка грунтовых вод на контакте пластов и др.). Если более весом вклад характеристик вертикальной и горизонтальной расчлененности рельефа, то среди вероятных объяснений варьирования фитоценозов могут оказаться понижение уровня грунтовых вод от водораздела к дренирующим долинам, смена геологического строения или трещиноватости пород, наличие границы генетических типов рельефа (переход от холмистой моренной равнины к плоской водноледниковой) и т.д.

Частный случай задачи исследования типов межкомпонентных отношений возникает при работе с двумя массивами континуальных данных, например, при анализе отношений между свойствами рельефа по цифровой модели и свойствами растительного покрова по дистанционным материалам (Хорошев, Алещенко, 2005, 2008). Предметом сравнения могут быть типы отношений, формирующихся на разных участках территории. Вся территория представляется в виде квадратов, смещенных относительно друг друга на один пиксел. Тогда применяется способ расчета в «скользящем квадрате»: в массив данных включаются значения двух слоев из заданной окрестности каждого пиксела. Размер окрестности (окна) отражает гипотезу об иерархическом уровне мозаичной геосистемы с единым типом отношений между слоями, т.е. компонентами ландшафта. Результат расчета присваивается центральному пикселу окна. После получения результатов (например, регрессионного уравнения) окно смещается на одну ОТЕ (пиксел) и результат перерасчета присваивается соседнему пикселу. Таким образом, каждый пиксел характеризуется набором параметров модели его зависимости от окрестности (например, коэфициентов регрессионного уравнения и долей описанной дисперсии). Классификация пикселов (ОТЕ) по параметрам межуровневой модели позволяет выделить на территории ареалы с разнотипными межкомпонентными отношениями, то есть с разной теснотой связи и разными вкладами независимых переменных (например, характеристик расчлененности и кривизны рельефа) в варьирование зависимой переменной (например, какой-либо характеристики растительного покрова). В принципе такой подход применим и к точечным данным, но при условии достаточно репрезентативного массива и более или менее равномерного распределения точек наблюдений по территории.

Если не постулировать *a priori*, что на одном иерархическом уровне обязательно есть единственный ведущий фактор дифференциации, то эта задача означает выявление разнообразия факторов организующих территорию на заданном иерархическом уровне. Например, уровень грунтовых вод фации определяется степенью расчлененности урочища, и эта закономерность проявляется в пределах некоторой местности. При этом в соседней местности уровень грунтовых вод зависит не от расчлененности, а только от уклонов (преобладает плоскостной поверхностный сток), а в следующей местности — вообще не связан с рельефом, а контролируется механическим составом

отложений. Мы, естественно, можем менять размер скользящего квадрата, сравнивать результаты расчетов и определять оптимальный территориальный охват для адекватного отображения пространственной единицы, в пределах которой компоненты связаны по некоторому закону.

Необходимо отдавать себе отчет, что полученные результаты отражают процессы, для которых определен минимальный порог пространственных различий в виде размера операционной территориальной единицы (ОТЕ). Поэтому неизбежно возникает еще один сюжет исследования — сравнение вида моделей, которые получены для ОТЕ разных размеров. На примере традиционных морфологических единиц вопрос формулируется следующим образом: если фация по некоторому правилу (которое отражается видом уравнения) зависит от свойств урочища в пределах местности, то зависит ли урочище от свойств местности по такому же правилу или по другому? Повторяется ли такой тип зависимости в пределах всего ландшафта или только некоторой группы местностей? Иначе говоря, каков размер геосистемы (уровень «+2») с единым типом отношений между свойствами операционной территориальной единицы (уровень «0») и свойствами вмещающей геосистемы (уровень «+1»). Геосистема такого размера составляет *характерное пространство «межуровневых» связей.* Каждый пиксел, сопоставимый с урочищем как мельчайшая ОТЕ, можно представить как совокупность вложенных в него более мелких пикселов (операционных единиц более детального масштаба, например, сопоставимых с фацией). Предметом анализа становится совпадение или несовпадение правила пространственной дифференциации на уровне урочища и на уровне вложенных в него фаций. Совпадение правила означает самоподобие процесса, ответственного за пространственную дифференциацию. Так, по сходным законам происходит организация гидрографической сети крупного речного бассейна и водосбора временного ручья, образующегося после дождя или весеннего снеготаяния. Несовпадение законов межкомпонентных связей на разных уровнях означает смену фактора дифференциации. Таким образом, мы можем определить диапазон масштабов, в котором реализуется однотипный ландшафтоформирующий процесс, что определено как одна из важнейших задач современной ландшафтной экологии (Turner et al., 2001; Zurlini et al., 2007).

Опишем идеальный случай. Пусть внутри локального волнистого междуречья доказано, что варьирование состава древостоя, мощности почвенных горизонтов, уровня грунтовых вод с высокой достоверностью описывается соотношением выпуклых и вогнутых форм микрорельефа. Следовательно, в пределах геоморфологически единой поверхности примерно уровня урочища существует единый фактор внутриурочищной (фациальной) дифференциации — перераспределение влаги по микрорельефу. Если изменить территориальный охват анализа и включить в расчет не только волнистое междуречье, но и примыкающие склоны, то для всех пар связей между перечисленными компонентами и рельефом резко уменьшится качество связи и/или изменится набор достоверно влияющих на растительность, почвы и воды показателей рельефа (например, не выпуклость-вогнутость, а уклоны). Это будет означать, что для нового территориального охвата характерен иной фактор дифференциации всех компонентов и исследователь имеет дело с целостной ландшафтной единицей другого иерархического уровня, например — местностью. Таков идеальный случай, когда все компоненты меняются согласованно с единым (для каждого уровня — своим специфическим) фактором организации.

Возможны несколько вариантов выявления иерархической организации межкомпонентных отношений.

1. Один и тот же тип отношений проявляется при расчете модели для окрестностей нескольких размеров. Только один из масштабов, который можно отождествить с характерным пространством межкомпонентных отношений, является основным — тот, для которого получено наибольшее значение коэффициента детерминации регрессионного уравнения (или показатель «на выходе» какого-либо другого метода, например, кросстабуляции или канонического анализа) по сравнению с другими масштабами. Уменьшение значения коэффициента детерминации означает, что данное пространство охватывает либо лишь часть территории, в которой реально проявляется данный тип отношений, либо часть территории с принципиально другим типом отношений.
2. Связь «растворяется» при увеличении или уменьшении территориального охвата (размера скользящего квадрата), например, коэффициент детерминации регрессионного уравнения или какой-либо из парных коэффициентов корреляции стремится к 0. Для такого масштаба гипотеза о существовании парагенетической геосистемы с данным типом отношений должна быть отвергнута (но может существовать система с другим типом отношений). Частный случай — когда связь одного и того же типа проявляется для нескольких масштабов, разделенных некоторым диапазоном масштабов, в которых отношения данного типа не реализуются. В таком случае можно предполагать самоподобие межкомпонентных отношений в нескольких масштабах (на нескольких иерархических уровнях).
3. Вид связи меняется при переходе от одного масштаба к другому при высоком значении коэффициента детерминации в каждом из масштабов. Этот случай соответствует иерархической организации межкомпонентных отношений при наличии специфического ведущего фактора ландшафтной организации для каждого иерархического уровня. Такой вариант в целом соответствует традиционному пониманию иерархической организации ландшафта.

Итак, необходимо проверять гипотезу, что тип межуровневых связей может варьировать в пространстве. Выявление ареалов действия конкретных типов межкомпонентных связей может иметь конструктивное значение для решения ряда актуальных проблем географического прогнозирования и пространственной организации природопользования. С точки зрения планирования природопользования принципиальное значение имеет определение границ пространства, для которого применим единый тип управления ландшафтными процессами. Например, если доказано, что трофность почв зависит от микрорельефа, то бесполезно вносить удобрения одинаково по всему междуречному урочищу (оставляем за скобками вопрос о технической осуществимости внесения удобрений с учетом микрорельефа). Если трофность почв всего междуречья одинакова независимо от микрорельефа, то можно вносить удобрения единообразно. Приведем другие примеры. Допустим, установлено, что в пределах системы террас существует общая закономерность возрастания влажности по мере приближения к реке. Нижняя терраса в целом влажнее, чем верхняя, и является приемником грунтовых вод, разгружающихся с верхней террасы. Тогда нет смысла осушать какой-то отдельный участок нижней террасы: рано или поздно вода придет с верхней террасы и восстановит прежнее состояние. Если дренированность возрастает в краевой части абсолютно плоского междуречья, то это означает, что влажность фации можно выразить

через зависимость от степени расчлененности вмещающей геосистемы определенного размера (условного «урочища»), и эта закономерность проявляется одинаково на всей территории ландшафта. Тогда нельзя рассчитывать на единую продуктивность леса, единый тип возобновления, единый способ лесозаготовки и т.д. Надо четко определить на какое расстояние до бровки и на какие свойства склона почва и растительность реагируют снижением влажности, то есть окрестность какого размера существенна.

Таким образом, полимасштабная организация ландшафта может характеризоваться в нескольких аспектах.

1. Подчиненность разных свойств компонентов ландшафта процессам разного масштаба. Объективная привязка групп свойств к пространственным уровням – основа для соотнесения свойств с той или иной дробностью геоморфологических единиц и интерпретации их как ландшафтных единиц. Если доказано сходство резонансного характерного пространства, то, скорее всего, есть единый управляющий процесс, который и обусловливает закоррелированную реакцию свойств разных компонентов на этот процесс.
2. Подчиненность одного и того же свойства ПТК процессам, происходящим на нескольких вышестоящих уровнях пространственной организации. Совокупность резонансных уровней для группы свойств позволяет выделить вклады разномасштабных, но однотипных процессов.
3. Различие характера межкомпонентных связей и стоящих за ними процессов в геосистемах разных иерархических уровней. Каждый процесс имеет физические пределы проявления, т.е. характерное пространство. Размер пространства, при изменении свойств которого меняется группа взаимосвязанных свойств компонентов ландшафта, подсказывает процесс, ответственный за дифференциацию.

Итак, перечисленные этапы исследования обеспечивают выявление иерархических уровней рельефа вмещающих геосистем, контролирующие пространственное варьирование плеяд свойств ОТЕ. Теперь встает проблема отражения в картографической форме сочетания дискретных и континуальных свойств ландшафтных комплексов.

2.10. Устойчивые ядра и переходные зоны: синтез дискретного и континуального представления геосистем

Выявление резонансного пространства межуровневых связей позволяет установить характеристики ландшафта, наиболее отзывчивые к каждому уровню организации рельефа (а точнее к пространственным изменениям свойств рельефа на данном уровне, к переходам от одного класса рельефа к другому). Это позволяет нам разработать основания для ландшафтного картографирования, т.е. выделения таких сходных в геоморфологическом смысле территорий, которые монотонны и по почвенно-растительному покрову.

Обозначим компоненты ландшафта (почвы, растительность) буквами A, B, их отдельные свойства строчными буквами, например a — обилие видов древесного яруса, b — обилие видов кустарникового яруса, c — обилие видов травяного яруса и т.д. Каждый ярус управляется факторами дифференциации 1, 2, 3 (например, влажность, трофность, и освещенность). Пусть I — сочетание форм рельефа в квадратной окрестности со стороной 1200 м, II — в окрестности 2800 м, III — в окрестности 6000 м. Мы знаем с каким уровнем организации рельефа «находится в резонансе» каждый из

этих факторов. Допустим, один из факторов дифференциации древесного яруса подчиняется геосистемам уровня I (Aa1-I), другой — геосистемам уровн II (Aa2-II), а из факторов дифференциации кустарникового яруса один подчиняется геосистемам уровня III (Ab1-III), а два других — уровня I (Ab1-I, Ab2-I). Два фактора дифференциации мощности почвенных горизонтов подчиняются, соответственно, геосистемам уровня I (Bd1-I), и уровня III (Bd2-III). Тогда мы имеем три плеяды свойств, которые будут информативными признаками дифференциации геосистем на трех уровнях. На самом высоком уровне III каждому из классов рельефа, выделенных на основании сочетания форм в окрестности 6000 м, будут поставлены в соответствие некоторые диапазоны значений свойств Ab1-III и Bd2-III, именно по этим характеристикам и будут идентифицированы и названы некоторые крупные геосистемы. На среднем уровне II каждому из классов рельефа, выделенных на основании сочетания форм в окрестности 2800 м, будут поставлены в соответствие диапазоны значений свойств Aa2-II. На низком уровне I каждому из классов рельефа, выделенных на основании сочетания форм в окрестности 1200 м, будут поставлены в соответствие диапазоны значений свойств Aa1-I, Ab1-I, Ab2-I, Bd1-I. Нет необходимости давать длинное название геосистемы каждого из этих уровней, перечисляя свойства всех компонентов, ярусов растительности, геогоризонтов и т.д., если некоторые из них на конкретном уровне неразличимы. В название целесообразно включать только те признаки, которые реально информативны для ландшафтной дифференциации данного уровня.

Точная «вписанность» или «вложенность» геосистем уровня II в границы геосистем уровня III в принципе необязательна, так как они могут управляться взаимонезависимыми факторами. Легко представить, например, что на самом высоком уровне организации рельефа III информативным признаком ландшафтной дифференциации оказывается доминирующие породы древостоя, и на ландшафтной карте мы отделяем ельники на междуречьях от сосняков в долинах. На более низком уровне II отделяются локальные бугры и локальные депрессии; к этим контрастам отзывчив состав мохового яруса: формируются либо зеленомошники, либо долгомошники. Часть ареалов геосистем этого уровня заходит и на террасы, и на междуречья. Соответственно, бывают сосняки-зеленомошники и сосняки-долгомошники на террасах, ельники-зеленомошники и ельники-долгомошники на междуречьях. При этом единый ареал долгомошников в депрессиях может захватывать примыкающие друг к другу части долины и междуречья. В частности это могут быть разные отрезки балки, расчленяющей и краевую часть междуречья, и террасу в долине, и показанную единым контуром одного класса рельефа на карте уровня II.

Итак, мы знаем: а) сколько необходимо выделять иерархических уровней ландшафтной организации, б) каков средний размер геосистем каждого уровня, в) какие признаки компонентов ландшафта различимы на каждом из уровней. Остается определить способ разграничения конкретных геосистем каждого уровня и отразить это на карте.

Пространственную структуру ландшафта можно представить как сочетание двух типов пространственной вариабельности свойств почв и фитоценозов, ниже именуемых мобильными компонентами. Часть их свойств строго детерминирована геолого-геоморфологическими характеристиками, то есть инертными компонентами, или морфолитогенной основой (МЛО). Эта часть поддается количественной оценке, как будет показано в разделах 4.4 и 4.5. Допустим, нам уже известно по предшествующим этапам исследования, какому иерархическому уровню организации МЛО подчинены

основные плеяды свойств почв и растительности. Другая часть вариабельности этих свойств от МЛО независима — она оценивается как «остаток» от общей вариабельности, не описанный свойствами МЛО. В силу разного характерного времени компоненты ландшафта не могут развиваться абсолютно синхронно. Следовательно, их взаимная адаптация — процесс долгосрочный, «перманентный» (Керженцев, 2006). Если выявить интервалы значений свойств МЛО, при которых варьирование свойств почв и растительности минимально, то это будет означать строгую морфолитогенную детерминированность, сложившуюся в течение столетий. Если варьирование велико при однородной МЛО, то это может быть связано с антропогенной нарушенностью, разнообразием стадий развития одного и того же природно-территориального комплекса, а также — с возникновением новых пространственных единиц вследствие саморазвития. *Под саморазвитием понимается изменение свойств мобильных компонентов ландшафта и пространственной структуры, не детерминированное морфолитогенной основой, но являющееся результатом межкомпонентных отношений между фитоценозом, почвами, водами (возможно, также, животного мира)*. Возможны как конвергенция, так и дивергенция ландшафтных единиц внутри единого морфолитогенного ареала. В связи с этим необходимо остановиться на вопросе о степени взаимодетерминированности компонентов и возможности ее количественной оценки.

Начиная с 1980-х гг. в природоведческой литературе отмечается неудовлетворенность применением исключительно Булевой логики, когда принадлежность к классу определяется только понятиями «да» и «нет» (Robinson, 2002) и слабой разработанностью вопроса об оценке ошибок при проведении границ на карте (Fortin et al., 2000). В связи с этим на основе теории нечетких множеств разрабатывается так называемая fuzzy-логика, оперирующая континуальным представлением о принадлежности к классу. Показатель вероятности принадлежности комплекса к разным классам стал широко применяться в картографировании как средство избежать субъективности в классификации объектов с неопределенными границами (Burrough et al., 2001; Zhu et al., 2001; Molenaar, Cheng, 2002; Hlasny, 2003).

В отечественном ландшафтоведении по сложившейся традиции картографирование на основе генетико-морфологического подхода опирается на ряд положений: а) мобильные компоненты отражают свойства морфолитогенной основы; б) границы внутриландшафтных единиц однозначно заданы морфолитогенными границами; в) на каждом иерархическом уровне существует свой главный фактор дифференциации; г) если существует морфолитогенная граница, то свойства компонентов обязательно различны по разные стороны от этой границы (Видина, 1962). Однако в ходе эволюции ландшафта может возникать более сложная картина в соотношениях компонентов; свойства мобильных компонентов могут быть сходны по разные стороны от четкой морфолитогенной границы, например, похожие растительность и почвы на склоне долины и на междуречной поверхности. На территории могут «парадоксальным» образом сочетаться свойства ландшафтов, относящихся к разным классификационным группам. Тогда исследователь вынужден в большинстве случаев принимать волевое решение, какие факторы и признаки считать ведущими и информативными. Д.Л. Арманд (1975) считал, что, проводя границы ландшафтов, мы совершаем два волевых акта: выбираем классификационный признак и порог его неразличимости, чем вносим в районирование субъективность. Иногда предлагают вообще отказаться от поиска единственно оптимального способа выделения геосистем и опираться на понятие «парциальный

геокомплекс», «парциальная структура» (Haase, 1964; Раман, 1972), т.е. «конструировать» геосистему в зависимости от целей и масштаба исследования, опираясь на какой-либо компонент и его отношения с другими компонентами (Solon, 1999). Структура геокомплексов не должна быть представлена в чрезмерно жесткой, абсолютизированной форме; априорное преувеличение значения отдельных видов геокомплексов, их элементов или таксономических ступеней часто приводит к искажённым результатам (Solon, 1999). Оценка степени уверенности исследователя при проведении границ на карте становится необходимым атрибутом выделения геосистем на основе концепции полиструктурности (Fortin et al., 2000). Вероятностный характер отношений между компонентами признает и А.Г. Исаченко (2004).

Одновременное проявление в ландшафте и наложение трех типов парциальных структур (геостационарной, геоциркуляционной и биоциркуляционной, в терминологии В.Н. Солнцева, 1997) подводит нас к серьезной проблеме выбора между континуальной и дискретной моделями пространственной организации ландшафта. Ее обсуждение стимулируется, с одной стороны, широкой популярностью в англоязычной науке дискретной матричной модели ландшафта Р. Формана и понятия «пятнистость» (patchiness), с другой — мнением о большей приемлемости континуальных представлений и понятий «сеть» и «градиент» и привлечения для объяснения пространственной гетерогенности, тем более что восприятие среды как дискретной или континуальной зависит от масштаба и субъекта исследования (Moore et al., 2009).

Геостационарные структуры, как следует уже из названия, формируются наиболее инертными свойствами ландшафта. При ненарушенном климаксном состоянии ландшафта можно ожидать формирования резких границ в силу длительного периода адаптации мобильных компонентов. Однако для этого морфолитогенные границы должны быть резкими, что наблюдается далеко не всегда. Например, чехол рыхлых отложений, сформированных приледниковым озером, может постепенно выклиниваться в направлении от котловины к водоразделу, что естественным образом объясняется постепенным снижением уровня когда-то существовавшего озера. В таком случае логично ожидать постепенной смены в пространстве растительных сообществ и почв. На противоположных полюсах этого ряда различие может достигать уровня типа растительности (болото – лес) и типа почв (торфяно-глееземы – подзолистые). Если ландшафт достиг равновесного состояния, то в каждой точке компоненты строго адаптированы друг к другу, но ясных границ ожидать в большинстве случаев не приходится, если только не существует естественных критических значений (например, определяющих порог изоляции корневых систем растений рыхлым чехлом от подстилающих отложений или грунтовых вод). В еще большей степени проблема континуальности стоит для геоциркуляционных структур. С одной стороны они могут создаваться резкими перегибами рельефа (гребни, бровки, подошвы склонов, тальвеги), С другой стороны, потоки вещества могут зависеть от постепенных изменений уклонов, степени расчлененности рельефа, уровня грунтовых вод, подпорных явления на реках и т.д. В меньшей степени континуальной пространственной организации можно ожидать от биоциркуляционных структур, которые в основном определяются структурными линиями рельефа (в терминологии А.Н. Ласточкина, 2011), разделяющими поверхности контрастных солярных экспозиций. Однако в пределах единой экспозиции варьирование уклонов может также способствовать возникновению континуума свойств мобильных компонентов в зависимости от получаемой солнечной радиации. Кроме того, проявлением

структур такого типа является высотная поясность с постепенными границами между поясами в пределах одного склона (Авессаломова и др., 2002).

Прежде всего, необходимо идентифицировать классы морфолитогенной основы с непересекающимися сочетаниями свойств. Пространственные структуры можно считать дискретными и целостными, ландшафтными, только в том случае, когда каждому классу МЛО можно поставить в соответствие непересекающееся с другими классами сочетание свойств мобильных компонентов. Принципиально важно именно сочетание свойств, а не субъективно выбранные «информативные» или «доминантные» признаки. Так как на предыдущем этапе определено, какие именно свойства ландшафта чувствительны к данному уровню иерархической организации рельефа, то остается определить оптимальный уровень дробности классификации. Подобные целостные структуры будут соответствовать некоторым (но не всем!) выделам на традиционной ландшафтной карте. Дробность выделения классов на территории зависит от выбранного иерархического уровня исследования. Классы МЛО можно выделять на основании разных показателей; каждая из полученных классификаций при этом дает основу для получения информации о разных формах упорядоченности пространства. Основаниями для разграничения таких ареалов в зависимости от целей могут быть: границы форм мезорельефа или микрорельефа (если речь идет о классических урочищах или фациях) (Видина, 1962), линии нулевой кривизны (Степанов, 2003; Данько и др., 2004), структурные линии рельефа (Ласточкин, 2011; Глущенко, Лычак, 2005), смена совокупности морфометрических характеристик окрестностей, влекущей изменение группы характеристик почвенно-растительного покрова (Сысуев, 2003; Мкртчян, 2008; Козлов, 2009; Ерофеев, 2012). По В.В. Сысуеву (2003) необходимым условием для геофизического описания потенциальной дифференциации ПТК являются физико-математические уравнения теории поля и дифференциальной геометрии.

Классификация по свойствам отложений позволяет выявить мозаичную упорядоченность и геостационарные структуры. Классификация по напряженности латеральных потоков (например, по степени дренированности) выявляет векторную упорядоченность и геоциркуляционные структуры. Классификация на основе экспозиционных различий и уклонов поверхности позволяет выявить изопотенциальную упорядоченность и биоциркуляционные структуры. Поставив в соответствие генетической классификации геоморфологических поверхностей совокупность характеристик мобильных компонентов, можно оценить корректность выделения традиционных ландшафтных единиц. Если для каждого из классов удается выявить типичное, наиболее часто встречающееся сочетание свойств мобильных компонентов, не имеющее ничего общего с другими классами МЛО, то межкомпонентные связи можно считать равновесными, строго детерминированными морфолитогенной основой, а компоненты — максимально адаптированными друг к другу в ходе эволюции.

В реальности строго детерминированные отношения с непересекающимися между разными классами МЛО свойствами мобильных компонентов — лишь частный случай. Рассмотрим несколько вариантов на примере связей растительности с рельефом.

1. Существуют виды растений с широкой экологической амплитудой, которые встречаются на разнотипных мезоформах.
2. Существуют экотоны, где соседствуют виды, свойственные обоим граничащим классам.

3. Возможно смещение границы, когда виды из одного класса постепенно проникают в пределы другого класса МЛО, например, при заболачивании плоских междуречий, примыкающих к болотным междуречным котловинам.
4. В пределах одного класса могут возникать, например, при восстановительных сукцессиях, кратковременные сообщества, несущие свойства другого класса.
5. В силу разных характерных времен почвы могут быть унаследованы от совсем другой растительности, в настоящее время отсутствующей или присущей совершенно иным мезоформам рельефа.
6. Возможен процесс саморазвития, когда эволюция в зависимости от случайных событий может пойти по разным траекториям в разных частях данной мезоформы; в результате возникает несколько устойчивых равновероятностных вариантов ПТК.

Возможны и другие варианты, когда нельзя однозначно поставить мобильные компоненты в соответствие классам МЛО. На деле чаще всего исследователь абстрагируется от подобных «недостаточно детерминированных» свойств мобильных компонентов и субъективно выбирает небольшое количество «информативных», «индикационных» признаков.

Если ставится задача выявить в ландшафте неравновесные участки, подход к расчетам будет зависеть от предполагаемой степени континуальности или дискретности взаимоадаптированных комбинаций свойств компонентов (Couteron et al., 2006). При континуальности предпочтение отдается регрессионным методам, при дискретности — дискриминантному анализу. Существуют два пути оценки жесткости взаимосоответствия свойств почвенно-растительного покрова и морфолитогенной основы.

Первый путь применим, когда обе группы свойств обеспечены континуальными данными: например, цифровой моделью рельефа (лучше — в совокупности с геологической картой или картой четвертичных отложений) и многоканальной космической съемкой. Тогда осуществляется предварительная классификация операционных территориальных единиц по свойствам МЛО, а затем рассчитывается вероятность принадлежности растительного покрова (на основании совокупности значений спектральных яркости по каналам и/или по разным датам съемки) к каждому классу МЛО (A, B, C и т.д.). Оптимальное для отражения дифференциации почвенно-растительного покрова количество классов A, B, C и т.д. определяется отдельно (см. разделы 3.2.3 и 4.8.3). Для каждого класса определяются типичные значения характеристик растительного покрова (не пересекающиеся с диапазонами значений, характерными для других классов). ОТЕ с такими типичными значениями имеют высокую вероятность принадлежности к своему классу (A) и близкие к 0 вероятности принадлежности к иным классам — B, C и т.д. Соответственно, ОТЕ другой группы с близкими вероятностями могут быть отнесены к нескольким классам и интерпретируются как места проявления неравновесных отношений между МЛО и растительным покровом. Этот путь подробно охарактеризован, в ряде работ автора и его сотрудников (Хорошев, 2004, 2005; Мерекалова, 2006; Хорошев и др., 2010). Д.Н. Козловым (2009) сходный способ применен для целей почвенного картографирования.

Второй путь применим, когда морфолитогенную основу можно охарактеризовать континуальными данными (цифровой моделью рельефа), а почвенно-растительный покров – лишь точечными данными полевых описаний. Тогда процедура «переворачивается». ОТЕ, обеспеченные точечными описаниями, классифицируются по свойствам почвенно-растительного покрова. Но при этом в классификацию включается лишь те

свойства, для которых в процессе полимасштабного анализа доказана чувствительность к рельефу окрестностей того или иного размера, то есть доказана подконтрольность процессам в вышестоящей геосистеме соответствующего размера. Для каждого из классов определяются типичное для него сочетание морфометрических свойств рельефа той окрестности, к которому чувствительна включенная в классификацию группа свойств. ОТЕ с такими морфометрическими характеристиками имеют близкую к 1 вероятность соответствия классу X почвенно-растительных характеристик и близкую к 0 вероятность соответствия другим классам (Y, Z,…). Иными словами, есть уверенность, что при данных характеристиках рельефа почвы и растительный покров всегда принадлежат к классу X. Для каждой ОТЕ, отражаемой цифровой моделью рельефа, можно рассчитать вероятность того, что при данных характеристиках рельефа сформируется почвенно-растительный покров того или иного класса (X, Y, Z,…).

Если знать вероятности соответствия совокупности свойств почвенно-растительного покрова классам морфолитогенной основы (или наоборот, в зависимости от имеющихся данных и цели исследования), легко рассчитать по формуле Шеннона меру неопределенности классификационной принадлежности (НКП) (Хорошев и др., 2002). Низкая НКП индивидуального ПТК свидетельствует о том, что совокупность свойств морфолитогенной основы и мобильных компонентов четко отличается от ПТК, относимых к другим классам, т.е. данный ПТК возник вследствие дивергенции (расхождения всей совокупности свойств) с ПТК других классов. Высокая НКП, рассматривается как признак неравновесности межкомпонентных связей. С точки зрения эволюции структуры ландшафта, как вертикальной, так и пространственной, такие неравновесные сочетания представляют наибольший интерес, так как именно в таких комплексах может идти конвергенция свойств, «поиск» вариантов дальнейшего развития, которое может пойти по разным траекториям в зависимости от случайных импульсов, в том числе антропогенных. Такие территории, видимо, с наибольшими основаниями можно отнести к группе «пластичных», «триггерных» (Арманд, Ведюшкин, 1989; Арманд, 2006), способных переходить из одного устойчивого состояния в другое.

На основе серии вероятностных карт и карты НКП строится серия карт равновесности межкомпонентных отношений применительно к каждой плеяде взаимосвязанных единым ландшафтным процессом свойств. На них показываются:

1. ареалы детерминированных (тем или иным свойством морфолитогенной основы) равновесных отношений,
2. ареалы противоречивых межкомпонентных отношений, в которых свойства мобильных компонентов свидетельствуют о типе функционирования, близком к пространственно удаленному классу МЛО, и нетипичном для класса МЛО, с которым они сопряжены пространственно в реальности,
3. ареалы неравновесных отношений, где ни одна характеристика МЛО не накладывает строгих ограничений на вариабельность свойств мобильных компонентов.

Конкретные примеры реализации предложенного подхода приведены в разделе 4.8.3.

Степень универсальности или сферы применимости полученных результатов представляет особый интерес для ландшафтной географии. Поэтому целесообразно сравнить правила иерархической организации межкомпонентных связей для разных регионов, предпочтительно в разных ландшафтных зонах и на примере разных родов ландшафтов.

Сравнительный анализ *специфики межуровневых связей в разных регионах* требует выполнения следующей программы.

1. Порядок значений тесноты связей. Если исследование связей проводится методами регрессионного анализа, то коэффициент детерминации — доля описанного варьирования. Эта величина характеризует «давление» вышестоящих уровней на свойства ОТЕ. Так как невысокие показатели связи необязательно означают слабую физическую связь или ее отсутствие (см. раздел 2.5), то они могут быть интерпретированы в более общем виде: на данном иерархическом уровне не существует универсального правила межуровневых связей, но связь может существовать на отдельных участках территории. Тогда требуется строить локальные модели связей и выявлять ареалы их проявления.
2. Степень согласованности резонансных уровней межуровневых связей для групп свойств компонентов. Если большинство свойств меняется в пространстве согласованно с характеристиками рельефа вмещающих геосистем одного размера, то, скорее всего, этот размер определяется характерным пространством сформировавшего их процесса. Генезис определяет сочетание форм рельефа вмещающей геосистемы, которые вместе создают эмерджентный эффект (например, уровень дренированности) и задают допустимый диапазон значений свойств ОТЕ. В этом случае целесообразно при ландшафтном картографировании отдать приоритет генетическому принципу. Традиционно генезис ландшафта отождествляется с генезисом рельефа (Ласточкин, 2011). Если же единого для большинства свойств резонансного уровня не выделяется, то, генезис рельефа имеет лишь ограниченное выборочное «давление» на отдельные свойства, и тогда генетический принцип ландшафтного картографирования не может считаться основным. В таком случае больше оснований для ландшафтного картографирования на основе представления о полиструктурности.
3. Сложность иерархической организации факторов дифференциации, связанных с сочетанием форм рельефа вмещающих геосистем. Иначе говоря, проверяются гипотезы об уникальности или множественности резонансных уровней. Второй случай может свидетельствовать о самоподобии ландшафтоформирующего процесса. Например, эрозия может способствовать мозаичности богатых и бедных местообитаний за счет смыва и намыва поверхностных отложений как на уровне «долина – междуречье», так и на уровне «овраг – гребень» в пределах склона долины. Единственный резонансный уровень свидетельствует о масштабной специфичности процесса, ответственного за дифференциацию значений свойства.
4. Наличие и вклад в пространственное варьирование компонента свойств, не связанных с морфолитогенной основой ландшафта. Такие свойства невозможно описать достоверно ни характеристиками рельефа ни одного из гипотетических уровней, ни характеристиками почвообразующих отложений. Следовательно, такие свойства варьируют под влиянием сил иной природы: внутрифитоценотической, антропогенной, реликтовой и т. д.
5. Оптимальный размер ОТЕ для отображения зависимости свойств от рельефа вмещающих геосистем. Полное отсутствие зависимости свойства от рельефа может определяться не только причинами, перечисленными в предыдущем пункте, но и неадекватностью выбранного размера ОТЕ для отражения ряда ландшафтных процессов. Для проверки последней гипотезы можно провести эксперимент с изменением разрешения цифровой модели рельефа и попытаться объяснить неописанную при одном разрешении часть варьирования характеристиками рельефа

другого разрешения. Например, распределение мохового покрова может прямо зависеть от нанорельефа (бугор – западина), в то время как каждая из возможных в регионе форм мезорельефа (пойма, терраса, склон, водораздельная поверхность, водосборное понижение, балка и др.) может иметь одинаковый набор типов мохового покрова (зеленомошный, долгомошный, сфагновый).

На основании некоторого множества пикселов-объектов описания можно построить статистическую модель зависимости свойств фации от свойств урочища или какой-либо другой вышестоящей единицы, даже не обязательно вписывающейся в традиционную иерархию. Если множество ОТЕ рассматривается в пределах территории сопоставимой по размеру с рангом ландшафта, то модель будет отвечать на вопрос: существует ли в пределах всего ландшафта отношения данного вида между фациями и заключающими их урочищами.

Итак, реализация описанной программы полисмасштабного анализа, позволяет оценить вклады разномасштабных факторов в пространственную дифференциацию свойств ландшафта, выработать основания для картографирования разномасштабных парциальных геосистем и синтезировать целостные структуры на основании моделей межкомпонентных связей.

2.11. Межкомпонентные связи и устойчивость ландшафта

Компонентной структуре ландшафта должно придаваться ключевое значение при анализе устойчивости ландшафта. В ландшафтоведении сформировалось представление о зависимости устойчивости от жесткости связей между компонентами (Дьяконов, Иванов, 1991; Гродзинський, 1995). Степень взаимной адаптации компонентов, выраженная через критерии статистически достоверной связи рассматривается как один из возможных критериев устойчивости к внешним воздействиям.

Трактовка жестких (сильных) или рыхлых (слабых) связей может быть неоднозначной или даже противоположной применительно к разным видам устойчивости (Коломыц, 1998). Жесткие связи означают высокую степень взаимной адаптированности компонентов на каждом участке мозаичного ландшафта, для которого эта связь рассчитана. Компоненты за время эволюции системы влияли на свойства друг друга таким образом, чтобы обеспечить максимальную независимость от давления среды, в том числе от проникновения (экспансии) «конкурентов» на занятую территорию. Разумеется, это, прежде всего, относится к биотическому компоненту ландшафта. Он постепенно создает такие свойства почв и вод, которые максимально благоприятны для воспроизводства данного сообщества и в то же время неблагоприятны для экспансии других сообществ.

Например, кислый опад елового леса способствует прогрессирующему оподзоливанию почв, которое затрудняет экспансию широколиственных видов деревьев и неморальных видов травостоя, если таковые присутствуют в соседнем элементе ландшафта. В свою очередь широколиственный лес обогащает почву основаниями и благоприятствует гумусонакоплению, то есть создает такую среду, в которой он более конкурентоспособен по сравнению с хвойным лесом. Тогда в условиях климатического экотона, который в принципе позволяет делить территорию обоим перечисленным сообществам (например, в зоне смешанных лесов), при естественном или антропогенном нарушении (пожар, вырубка, ветровал, размножение вредителей и т.п.) наиболее высока

вероятность восстановления именно того же сообщества, которое и сформировало специфические почвенные и гидрологические условия местообитания. В данном примере речь идет о высокой эластичности ландшафта, то есть способности к восстановлению исходного состояния. Следует заметить, что условием восстановления является наличие инертных свойств почв и почвообразующих пород с характерным временем, превышающим время релаксации фитоценоза. Разница характерных времен — это гарантия от быстрой цепной реакции при нарушении. Цепная реакция может возникать именно благодаря жесткой связи между свойствами с сопоставимыми характерными временами: сигнал быстро передается от свойства к свойству и вызывает трансформацию структуры. Так, при нарушении древесного яруса могут быстро измениться влажность почвы, содержание некоторых химических элементов (прежде всего, интенсивно вовлекаемых в биологический круговорот), уровень грунтовых вод, биохимическая активность. Однако более инертные свойства (система почвенных горизонтов, механический состав почв и почвообразующих пород, структурность почв) сохраняют предпосылки восстановления исходного состояния ландшафта. Следовательно, в процедуру оценки устойчивости ландшафта должны обязательно входить: а) выявление наиболее инертных свойств компонентов с большими характерными временами; б) установление типичных сочетаний инертных и мобильных свойств; в) идентификация участков ландшафта, наиболее контрастных по комбинации этих свойств. Тесная связь между свойствами с малыми характерными временами указывает на низкую резистентную устойчивость (инертность), но, вполне возможно, высокую эластичность. Тесная связь между свойством с большим характерным временем и свойством с малым характерным временем, скорее всего, указывает на высокую способность к восстановлению мобильного свойства после нарушений (высокую эластичность). Однако тесная связь в этом случае необязательно означает низкую инертность, так как сигнал от мобильного свойства несущественен для инертного свойства, по крайней мере, в случае малой продолжительности сигнала.

Экстремальные значения характеристик природных систем, так называемые «выбросы», которые долгое время рассматривали как досадные помехи на пути выявления статистически значимых зависимостей и исключались из анализа, теперь оказываются в центре внимания исследователей, так как могут индицировать проявление на некоторых участках пространства неравновесных труднопрогнозируемых процессов (Пузаченко, 1998).

Слабая связь между инертными и мобильными свойствами компонентов может трактоваться неоднозначно. Низкий показатель связи (например, коэффициент детерминации регрессионного уравнения) необязательно означает отсутствие связи на всей территории исследования. О возможных причинах статистически слабых связей уже говорилось в разделе 2.5. Здесь важно заметить, что особый интерес с точки зрения оценки устойчивости представляют участки ландшафта с нетипичными комбинациями свойств компонентов, которые могут быть идентифицированы разными способами. Средствами дискриминантного анализа можно выявить незакономерные соотношения свойств на конкретных участках по равной вероятности принадлежности сразу к нескольким классам. Средствами кластерного анализа такие участки выявляются по большим дистанциям до центров классов, в регрессионном анализе — по большим по модулю остаткам уравнений. Если исключить такие участки из массива данных, то для оставшейся основной части территории показатель связи резко возрастает. Тог-

да следует проверять гипотезу о наличии типичных элементов ландшафта и переходных зон между ними, где сочетаются свойства сразу нескольких соседних элементов. Эта трактовка включает гипотезу о существовании нескольких возможных устойчивых состояний мобильного компонента (например, фитоценоза) при фиксированном свойстве инертного компонента (например, механического состава почвообразующих отложений). Связь в этом случае слаба или отсутствует, если растительный покров сильно варьирует при монотонном составе почвообразующих пород. Это может быть проявлением третьего вида устойчивости — пластичности, то есть наличия более или менее равноправных возможных комбинаций свойств (рис. 13). В частности, несколько устойчивых состояний с наибольшей уверенностью предполагаются для переходных зон, которые не имеют «собственной» специфики и могут заимствовать свойства структуры у соседних элементов, конкурирующим между собой за пространство, и прямо присоединяться к тому или иному из них (Gosz, Sharpe, 1989). Такие переходные участки следует считать наиболее неравновесными, с минимальной инертностью, низкой эластичностью, высокой пластичностью.

Разумеется, такая трактовка должна производиться с большой осторожностью, поскольку существует и другая причина слабой связи — различные динамические (се-

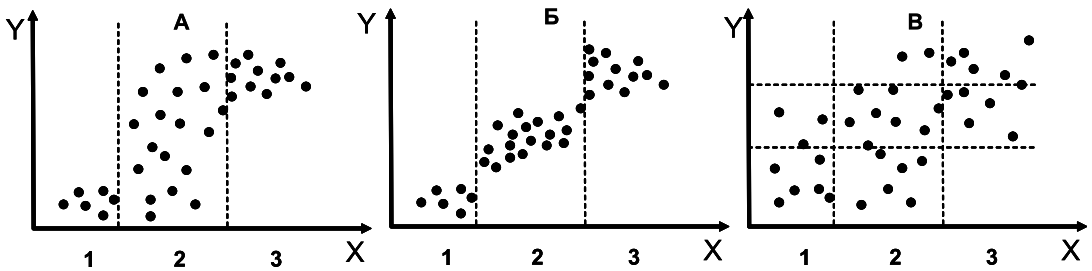

Рис. 13. Разнообразие сочетаний свойств компонентов и интерпретация их связи с точки зрения устойчивости.

А) 1, 3 — области строго детерминированных значений признака Y в интервалах низких и высоких значений признака X. Диапазон адаптированности. Высокая инертность, низкая пластичность признака Y по отношению к изменениям признака X . Ограниченное разнообразие допустимых вариантов признака Y при изменении признака X. 2 — область разнообразия возможных состояний, пластичности признака Y в интервале средних значений признака X. Низкая инертность, высокая пластичность признака Y по отношению к изменениям признака X. Высокая неопределенность классификационной принадлежности.

Б) 1, 2, 3 — области строго детерминированных значений признака Y в каждом из трех интервалов значений признака X. Сочетания значений признаков в каждом из диапазонов строго индивидуальны, диапазоны значений не пересекаются. Принадлежность Y к классам значений признака X определяется однозначно. Минимальная неопределенность классификационной принадлежности.

В) При наличии слабой связи существуют диапазоны значений признака Y, которые могут встречаться во всех диапазонах значений признака X. Принадлежность к классам значений признака X определяется неоднозначно. Повышенная неопределенность классификационной принадлежности в диапазонах 1, 2, 3. Низкая инертность, высокая пластичность признака Y по отношению к изменениям признака X.

рийные) состояния одного и того же ландшафта в пределах исследуемой территории. Наиболее очевидный случай — разнообразие стадий сукцессии растительности после каких-либо нарушений. Для различения разнообразия сукцессионных стадий и реального разнообразия природных комплексов необходимо проверять обе гипотезы на нескольких парах компонентов, например почв, почвообразующих пород и фитоценозов. Если при одинаковых почвообразующих породах и рельефе наблюдается согласованное варьирование свойств почв и фитоценозов, то более вероятен вариант наличия нескольких устойчивых состояний ландшафта, в каждом из которых почвы и фитоценозы адаптированы друг к другу. Если варьирование свойств фитоценоза никак не связано с инертными свойствами почв (прежде всего, набором и мощностью генетических горизонтов), то более вероятна гипотеза разнообразия сукцессионных стадий. Обсуждение этого вопроса на конкретном региональном примере заповедника «Кологривский лес» представлено в разделе 4.7.

Необходимый аспект анализа межкомпонентных связей — поправка на стадию развития, то есть временна́я составляющая структуры. В экологии уже почти столетие ведется дискуссия по вопросу о существовании единого климаксного состояния как состояния максимальной когерентности компонентов экосистемы, при котором темпы изменений замедляются, либо возможности нескольких климаксных состояний. Последнее представление согласуется с понятием бифуркаций. В любом случае есть согласие исследователей в том, что на разных стадиях развития экосистема меняется с разными скоростями и, следовательно, устойчивость тоже неодинакова (Пащенко, 1993; del Barrio et al., 1997; Salthe, 2002; Holling, 2004). В стадии молодости экосистема обладает упругостью, легко восстанавливается после нарушений, возвращаясь на прежнюю траекторию развития; в стадии старости — обладает повышенной восприимчивостью к нарушениям, так как ослабевает поток энергии, которая могла бы быть использована на восстановление; в стадии зрелости система обладает гомеостатическими свойствами (Salthe, 2002). Считается также, что устойчивость как способность к восстановлению, или скорость восстановления, снижается по мере приближения системы к точке бифуркации (O'Neill, 1988). При определенной высокой степени взаимоадаптации компонентов ландшафта, он может сохранять основные свойства своей структуры достаточно долго даже в условиях враждебной среды, например в изменившихся климатических условиях.

Ярким примером сохранения реликтовых свойств структуры являются ландшафты сосновых боров гранитных низкогорий Северного Казахстана, которые сохранили идентичность с плювиальных эпох голоцена, когда лесная зона была смещена на сотни километров южнее по сравнению с современным положением. Современные климатические условия обусловливают господство в регионе степных ландшафтов. Однако, особенность геологического строения относительно небольшой возвышенности на фоне равнинных степей — интрузии палеозойских гранитов, служащих почвообразующими породами, диктует сохранение экстразонального лесного ландшафта (Николаев, 1999). Исключительно высокая степень адаптации растительного покрова к особенностям циркуляции подземных вод в гранитах и почвам (вернее — создание сосняками «своих собственных» почв), способствовали сохранению высокой резистентной устойчивости при крайне низкой способности к восстановлению после нарушений во «враждебных» климатических условиях. Этот пример свидетельствует, что специфика абиотической среды может вносить существенные коррективы в показатели устойчи-

вости (повышать ее) даже на самых поздних стадиях эволюции ландшафта, когда он уже подготовлен к разрушению структуры неблагоприятными климатическими условиями.

С точки зрения планирования землепользования скорость развития структуры ландшафта определяет степень его надежности в долговременной или кратковременной перспективе. При больших скоростях изменения компонентной структуры, характерных для ранних (формирование) или поздних (распад) стадий эволюционного ряда, компоненты могут находиться в «рассогласованном» состоянии, прежде всего, в силу разных характерных времен. Мобильные компоненты — растительный покров, воды, воздух – на зарастающих вырубках и пашнях, селевых конусах, свежих лавовых покровах быстрее приспосабливаются к вновь формирующимся условиям, чем почвы, кора выветривания, рельеф. В таких обстоятельствах на еще не сформировавшихся или «старых» почвах могут наблюдаться свойства растительного покрова, с равной вероятностью встречающиеся и на зрелых почвах с хорошо сформированной системой горизонтов. Несогласованность свойств компонентов в этом примере указывает на стадию развития с быстрыми изменениями структуры (Мамай, 2005; Петрушина, 2013). Понимание этого варианта важно, так как тесноту связей часто оценить проще, чем точно определить возраст системы. Характеристика связи может быть использована как «суррогат» знания об эволюционной стадии или, по крайней мере, использоваться как индикатор одного из возможных процессов.

Таким образом, устойчивость оценивается в зависимости от тесноты связей между компонентами, которая варьирует на разных стадиях эволюции ландшафта и корректируется свойствами абиотической среды, в том числе рельефа и почвообразующих горных пород. В связи с этим автор сосредоточил внимание на следующих основных методических проблемах:

1. соотношение жестко детерминированной инертными компонентами составляющей пространственного варьирования и составляющей, связанной с саморазвитием мобильных компонентов,
2. соотношение между теснотой межкомпонентных связей и видами устойчивости к внешним воздействиям,
3. идентификация участков ландшафта с одновременной встречаемостью свойств, типичных для типологически разных ландшафтных единиц.

2.12. Место предлагаемой методологии среди подходов к объективизации выделения геосистем

Поиск объективных и формализованных методов выделения целостных геосистем занимает одно из центральных мест в проблематике современного ландшафтоведения и ландшафтной экологии. Современные технологии и материалы, обеспечивающие континуальное представление земной поверхности, предоставляют широкие возможности для многогранного описания рельефа с морфологической и функциональной точек зрения и изучения его связей с растительным покровом, описываемого по космическим снимкам. Достигнутый прогресс, в основном, касается формализованных методов выделения форм и типов рельефа и интерпретации их как факторов перераспределения вещества и энергии, что позволяет делать заключения об их свойствах как местообитаний, морфотопов, типов лесорастительных условий, факторов формирова-

ния почвенных комбинаций и т.п. (Пузаченко и др., 1997; Гагаева и др., 2003; Степанов, 2003; Сысуев, 2003а; Данько и др., 2004; Глущенко, Лычак, 2005; Мкртчян, 2008; Козлов, 2009; Ласточкин, 2011). По сути, получило развитие классическое представление ландшафтоведения о детерминирующей роли рельефа в функционировании компонентов ландшафта. С другой стороны растительный покров, также подробно и многогранно описываемый по космическим снимкам, используется для индикации структурной организации и динамических изменений в ландшафтах (Викторов, 1986, 2006; Пузаченко и др., 2003, 2014; Солодянкина, Черкашин, 2004; Кренке и др., 2011; Истомина, 2012; Сандлерский, 2013).

Тем не менее, хотя рельеф определяет и многое, но не всё в структуре и функционировании ландшафта. Прежде чем иметь основания для выделения ландшафтных единиц по объективно установленным геотопам, следует строго определить, *какие именно свойства компонентов ландшафта действительно обусловлены процессами, контролируемыми рельефом*. В отличие от большинства цитированных выше методик, автор предлагает на предварительном этапе реализовать *классификацию свойств по степени подчиненности рельефу*. Наиболее очевидные случаи «неподчинения» или неполного подчинения рельефу — это «подконтрольность» свойств ландшафта химическим и физическим свойствам почвообразующих пород, внутрифитоценотическим отношениям, сукцессионным трендам, антропогенным модификациям. Подчеркнем, что автор не выявляет заранее иерархические уровни организации рельефа, а перебирает гипотезы о возможных уровнях иерархической организации ландшафта только по критерию возможной связи характеристики рельефа со свойствами компонентов ландшафта. В предлагаемой методологии у нас нет априорной уверенности в детерминирующей роли рельефа, а его иерархическая организация как такового не является предметом исследования. Для тех свойств, для которых *будет строго установлена чувствительность к рельефу* (точнее, к процессам, контролируемым рельефом), можно реализовывать следующие этапы исследования и более глубоко *моделировать перенос вещества и энергии,* например по методикам В.В. Сысуева (2002) или И.Н. Степанова (2006). Именно для таких свойств оправдана проверка гипотез о «вписанности» их в геотопы А.Н. Ласточкина (2011), иерархические уровни рельефа по результатам фрактального анализа (Пузаченко и др., 2002) или в классические микроформы и мезоформы рельефа (Солнцев, 1948; Видина, 1962; Анненская и др., 1963). Для объяснения варьирования и связей свойств, которые к рельефу «безразличны», необходимо будет применять другие подходы, например биогеоценотические (Восточно-Европейские…, 2004; Бобровский, 2010; Смирнова, 2011) или литогеохимические. Таким образом, предлагаемая автором последовательность процедур *предваряет выбор корректной «траектории» углубленного анализа связей между пространственным разнообразием и процессами массоэнергопереноса*: для одних свойств — моделирование зависимости от рельефа, для других – сукцессионной динамики, для третьих — влияния условий фильтрации или литогеохимической обусловленности и т.д. Если не разделить вклады этих и других контролирующих факторов в формирование измеренной характеристики ландшафта, то существует риск принять эффект одного фактора за эффект другого. В этом заключается авторская трактовка полиструктурности ландшафта и суперпозиции независимых парциальных геосистем.

Ставя в центр внимания проблему трансляции информации между уровнями организации геосистем, автор большое значение придает количественной оценке влияния

вышестоящей по рангу геосистемы на нижестоящую. Пространственная структура вышестоящей геосистемы характеризуется рельефом (хотя для других задач могут использоваться и другие характеристики). Поэтому следует дать пояснение, чем набор используемых характеристик рельефа отличается от таковых в других методиках. Автор широко пользуется не только такими морфометрическими величинами как кривизны рельефа (занимающими центральное место в большинстве методик анализа рельефа для целей характеристики массоэнергопереноса), но и показателями вертикальной и горизонтальной расчлененности в разных окрестностях. Чтобы описать эмерджентные свойства мозаичной геосистемы, которая заключает в себе операционную территориальную единицу и создает для нее рамочные условия функционирования, нужен простой и емкий показатель, отражающий её внутреннее разнообразие. Когда выдвинута гипотеза о размере вмещающей геосистемы, то, чтобы описать ее форму кривизнами, приходится либо ограничиться расчетами, учитывающими высоты ее центра и краев, либо применять большой набор кривизн, рассчитанных для всех возможных вариантов окрестностей. В первом случае приходится игнорировать внутреннее устройство геосистемы (плотность и глубина эрозионных форм, совокупность бугров и западин, перегибов рельефа склонов и др.), а, следовательно, можно потерять информацию о влиянии пространственной структуры на свойства ОТЕ. Условно говоря, если вмещающая геосистема предстает как «купол» (при положительных кривизнах) с исследуемой ОТЕ на вершине, то остается неизвестным, есть ли на склонах этого «купола» какие-либо более мелкие формы, которые могут: отводить или задерживать влагу, создавать мозаику теневых и солнечных экспозиций, быть приемниками холодного воздуха, быть ловушками для растворенного вещества и твердых частиц, предоставлять важные убежища или точки обзора для животных и т.д. Все перечисленные процессы могут, так или иначе, оказывать влияния на состояние ОТЕ, расположенной в центре описываемой геосистемы. Во втором случае (большой набор кривизн) просто сильно возрастает трудоемкость анализа. Автор считает, что более оптимальный способ описания рельефа геосистемы состоит в сочетании кривизн с показателями вертикальной и горизонтальной расчлененности. Для предыдущего примера кривизны описывают при этом форму «купола», а характеристики расчлененности — внутреннее разнообразие рельефа «купола» и, следовательно, морфологическую структуру ландшафтной единицы.

Предлагаемые процедуры автор рассматривает как масштабно-инвариантные. Они могут быть применены при любом исходном размере операционных территориальных единиц и при любом размере окрестности кратном размеру ОТЕ. В этом есть сходство с масштабно-инвариантными методами выделения геотопов А.Н. Ласточкина (2011), хотя сам способ выделения пространственных единиц иной. Так же как и А.Н. Ласточкин, автор считает возможным применять предлагаемые методы к разным типам характеристик пространства. Используемые в этой работе характеристики рельефа окрестностей выступают лишь как частный случай.

Глава 3

Материалы и методы

3.1. Описание полигонов исследования

Исходным материалом для исследований послужили данные полевых описаний в трех ландшафтных зонах шести регионов России: Устьянский район Архангельской области (средняя тайга), Ханты-Мансийский район Ханты-Мансийского автономного округа (средняя тайга), Кологривский район Костромской области и Костромская область в целом (южная тайга), Кизнерский и Можгинский районы республики Удмуртия (хвойно-широколиственные леса), Зеленоградский район Калининградской области — Куршская коса (хвойно-широколиственные леса), Беляевский и Кувандыкский районы Оренбургской области (типичные степи) (табл. 2, рис. 14).

Таблица. 2.

Площади полигонов исследования и количество описаний

Номер на рис.	Полигон исследования	Расположение	Площадь, км^2	Количество комплексных ландшафтных описаний
1	Среднетаежный Архангельский	Архангельская область, Устьянский район	200	185
2	Среднетаежный Обский	Ханты-Мансийский автономный округ, Ханты-Мансийский район	12	201
3	Южнотаежный Кологривский	Костромская область, Кологривский район	270	165
4	Хвойно-широколиственно-лесной Удмуртский	Республика Удмуртия, Кизнерский и Можгинский районы	200	171
5	Хвойно-широколиственно-лесной, Куршская коса	Калининградская область, Зеленоградский район, Куршская коса	66	100
6	Степной Айтуарский	Оренбургская область, Кувандыкский район	64	202

Общим для трех основных полигонов — в Устьянском районе Архангельской области, Кологривском районе Костромской области, в Кизнерском и Можгинском районах республики Удмуртия — является наличие глубокорасчлененного рельефа, близость коренных карбонатных пород и выходы их на поверхность в речных долинах, наличие чехла рыхлых четвертичных отложений с максимальной мощностью на

междуречьях. Абсолютные высоты в каждом регионе варьируют в диапазоне 100–230 м. Во всех случаях рельеф может быть охарактеризован как структурно-эрозионный, но в Костромской и Архангельской областях с участием моренных, водно-ледниковых и озерно-ледниковых отложений, реже — лессовидных (Хорошев, 2005а), а на пластовых равнинах Удмуртии — древнеаллювиальных и покровных лёссовидных (Хорошев, 2010а). Во всех исследованных регионах короткие глубокорасчлененные крутые склоны, соседствующие с относительно плоскими междуречьями, свидетельствуют о ведущей роли неотектонического фактора ландшафтной дифференциации. Неотектонические поднятия сопровождается формированием глубоких разрывных

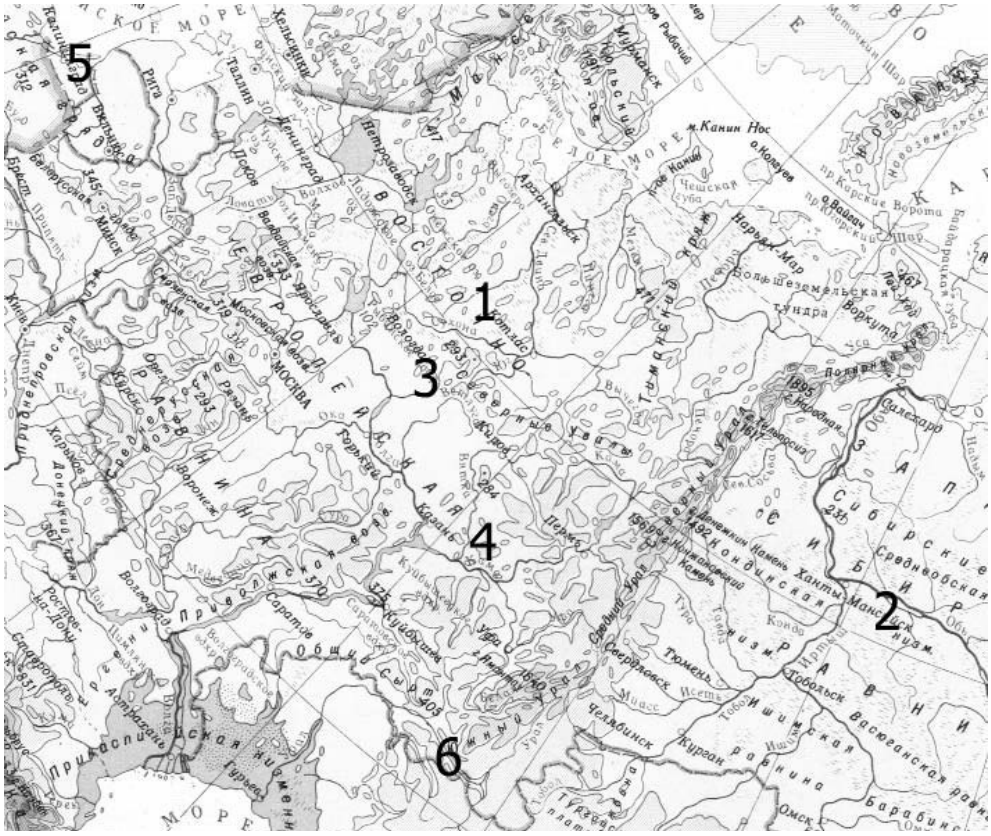

Рис. 14. Расположение полигонов исследования. 1 — среднетаежный ландшафт в Устьянском районе Архангельской области (полигоны «Заячья», «Трансект», «Козловка», «Становская балка», «Медвежий»), 2 — среднетаежный ландшафт в Ханты-Мансийском автономном округе (Обский полигон), 3 — южнотаежные ландшафты в Костромской области (полигоны «Костромская область», «Кологривский район», в том числе заповедник «Кологривский лес»), 4 — смешаннолесной ландшафт в Кизнерском и Можгинском районах Удмуртии, 5 — смешаннолесной ландшафт в Зеленоградском районе Калининградской области (национальный парк «Куршская коса»), 6 — типичностепные ландшафты в Беляевском и Кувандыкском районах Оренбургской области (заповедник «Оренбургский»).

нарушений, вскрывающих по бортам пласты коренных пород пермского (в Архангельской области и Удмуртии), юрского или триасового (в Костромской области) возраста и способствующих современной разгрузке грунтовых вод (Пузаченко и др., 2003; Хорошев, 2003а). Этот процесс формирует местности с большой вертикальной и горизонтальной расчлененностью рельефа. Более пологие слаборасчлененные длинные склоны, как правило, соответствуют ареалам проявления процессов ледниковой или водноледниковой аккумуляции по бортам долин, нивелирующей контрасты доледникового рельефа и ослабляющей современные миграционные процессы. Густая сеть равномерно распределенных в пространстве слабоврезанных ложбин стока с пологим продольным профилем (большая горизонтальная и малая вертикальная расчлененность) в пределах небольшой окрестности индицирует господствующую роль для ландшафтной дифференциации современной эрозии с самоорганизацией гидрографической сети.

Количество полевых описаний составляет около 175 в каждом регионе и охватывает водораздельные, придолинные, склоновые позиции и днища долин. Дополнительно для исследования влияния ландшафтного разнообразия на тесноту межкомпонентных связей проведен аналогичный анализ для такого же количества измерений, охватывающих относительно равномерно все физико-географические районы Костромской области в пределах трех физико-географических провинций — Верхневолжской, Ветлужско-Унжинской и Северных Увалов (полигон «Костромская область»).

Кроме того на полигоне в Архангельской области проведены разномасштабные исследования. Ландшафтный уровень представлен полигоном «Заячья» (184 точки описания в пределах 4 местностей), местностной уровень — полигоном «Трансект» (поперек одной местности, всего 309 точек через 25 м, расположенных на одной линии северо-восточного простирания; для анализа использовано 184 точки со средним шагом 50 м), фациально-урочищный — полигоном «Медвежий» (9,5 км^2, 181 точка в пределах той же местности, что и полигон «Трансект», но компактно расположенных на Заячье-Пукомском междуречье; полевые описания и основные расчеты проведены К.А. Мерекаловой), фациальный — полигоном «Козловка» (0,8 км^2, 100 точек по почти регулярной сетке, из которых 81 точка расположена в пределах двух урочищ, отличающихся только смежными градациями дренированности). Проведено также крупномасштабное исследование балочного урочища (полигон «Становская балка»), обеспеченное 100 описаниями по почти регулярной сетке.

3.1.1. Среднетаежный полигон: Архангельская область, бассейн р. Заячья

Среднетаежный полигон в Устьянском районе Архангельской области изучается сотрудниками географиического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова более 20 лет, что позволило составить подробную комплексную физико-географическую характеристику, снабженную серией тематических и ландшафтных карт (Авессаломова, 1997, 2003; Пузаченко и др., 1997, 1998; Дьяконов, Пузаченко, 1997, 2000; Мяло и др., 1998; Емельянова и др., 1999, 2001; Прозоров, 1999; Хорошев, 1999, 2000, 2001, 2005; Khoroshev, 2000, 2001б, 2004, 2010; Горбунова, Гаврилова, 2002; Флора и фауна..., 2003; Мерекалова, 2006; Khoroshev, Merekalova, 2006; Khoroshev et al., 2007; Безделова, 2008; Беляков, 2009; Хорошев и др., 2013). Автор участвовал в этих исследованиях с самого раннего этапа.

К основным факторам формирования ландшафтов территории относятся:

1. близкое залегание коренных пермских карбонатных пород, местами выходящих на поверхность на склонах долин;
2. повсеместное (за исключением некоторых участков долин) наличие моренных валунных карбонатных суглинков московского возраста в качестве нижней водоупорной части почвообразующеё толщи;
3. наличие песчано-супесчаного плаща озёрно-ледникового происхождения позднемосковского и поздневалдайского времени в качестве верхней водопроницаемой части почвообразующей толщи;
4. неравномерная выщелоченность от карбонатов верхней толщи моренного суглинка, унаследованная от условий бореального периода;
5. трогообразная форма речных долин в западной части полигона, унаследованная от локализации ледниковых языков в позднемосковское время при бронированности склонов пермскими мергелями;
6. заболоченность территории, возникновение которой обусловлено климатическими колебаниями голоцена и поддерживается современным избыточным увлажнением.

Территория полигона принадлежит к северо-западному борту Московской синеклизы и северо-восточной части Чадромской депрессии, расположенной между Онежским выступом Балтийского щита на северо-западе и Сухонским поднятием на юго-востоке. Чадромская депрессия ограничена глубинными разломами северо-восточного простирания (Крутиков и др., 1987). Структурные элементы фундамента унаследованы при блоковых движениях в процессе образования осадочного чехла. Блоковые движения вдоль разломов в фундаменте влияют на образование ослабленных зон трещиноватости — линеаментов, которые контролируют рисунок гидрографической сети. Осадочные породы палеозоя имеют пологое моноклинальное падение на юго-восток по направлению к оси Тарногско-Илезского прогиба (Крутиков и др., 1987). Образование Тарногско-Илезского прогиба происходило сопряжённо с развитием Сухонского вала одновременно с оживлением тектонической деятельности Уральской геосинклинали (Ванчуров и др., 1971). Поверхность дочетвертичных пород имеет резкий уступ с перепадом высот 50–60 м, к которому приурочен широтный отрезок долины р.Устья в районе пос. Октябрьский и с. Шангалы. Севернее уступа абсолютные высоты достигают 235 м при огромной мощности четвертичных отложений (до 170 м), представленных ледниковыми и озёрно-ледниковыми отложениями окского, днепровского и московского времени. Кровля коренных пород располагается на абсолютных высотах 60–70 м. Этот участок представляет собой купол со звездообразно расходящимися правыми притоками Устьи (Верюга, Волюга, Васильевка, Солица, Яманиха и др.), а в северной части — правыми притоками Ваги (Шереньга, Сельменьга, Шеньга). Южнее уступа расположено междуречье Устьи и Кокшеньги с малой мощностью (преимущественно 10–20 м) четвертичных отложений, представленных моренными валунными карбонатными суглинками московского времени с чехлом озёрно-ледниковых отложений позднемосковского времени. Кровля коренных пород занимает высокие позиции — 130–140 м — и полого понижается к северу (Крутиков и др., 1987).

Неотектонические движения на территории Устьянского и соседних районов характеризуются разнонаправленностью с преобладанием восходящих движений в

восточном и северном секторах и опусканий в западном и южном, где расположена долина р. Кокшеньги. Неотектоническое поднятие обусловило возникновение возвышенного Устьянского плато, разделённого на три части отрезками долины Устьи, трижды меняющей направление течения: с юго-западного на северо-западное у г. Кизема, вновь на юго-западное у с. Бестужево и опять на северо-западное у с. Шангалы. Из трёх секторов Устьянского плато максимальной высоты 244 м достигает западный сектор к северу от Шангал, чуть ниже центральный (235 м), самый низкий (150–180 м) — восточный сектор. Преобладание линеаментов этих перепендикулярных друг другу направлений давно отмечено для всего Европейского Севера (Геренчук, 1960; Фёдоров, 1983; Бабак и др., 1984). К ним в частности приурочены долины Северной Двины, Ваги и Сухоны, междуречье которых имеет треугольную форму. В неё вложен геометрически подобный рисунок течения Устьи, разные участки течения которой параллельны то Ваге, то Северной Двине. При количественном анализе космического снимка на эту территорию с применением расчётов фрактальной размерности чётко выявляется самоподобная блоковая структура (Пузаченко и др., 2003). В центральном секторе Устьянского плато вал-поднятие между верхним и средним отрезками Устьи заставляет речную сеть расходиться в субширотном направлении (Кочкурга, Мехреньга). В Устью большинство ее крупных притоков при этом впадает не под прямым, а под острым углом, нередко даже против ее течения, что рассматривается как одни из признаков разрывных нарушений (Малаховский, 2000).

Рисунок гидрографической сети, характерный для Устьи, с преобладанием линеаментов северо-западного и северо-восточного простираний повторяется для пространств более низкого порядка (Хорошев, 2003а, б). Главные каналы стока в пределах полигона исследования Кокшеньга, Заячья и Соденьга (притоки, соответственно, Кокшеньги и Устьи) ориентированы на северо-запад, а ручьи более низкого порядка — на северо-восток. И те, и другие неоднократно меняют направление под углом, близким к прямому. Полигон исследования приурочен к юго-западному краю Устьянского плато (рис. 15, А, Б). Здесь ось поднятий северо-западного направления приходится на междуречье Заячьей (правый приток Кокшеньги) и Соденьги (левый приток Устьи) и имеет максимальную высоту 173,3 м. Узкая междуречная поверхность шириной не более 2 км представляет собой часть дальний юго-западный сегмент обширного заболоченного плоского междуречья (уровень 165–175 м) двух левых притоков Устьи — рек Соденьги и Мяткурги (рис. 15, А). Она отделена ступенью от меридионально вытянутого поднятия центрального сектора Устьянского плато (высоты 190 м и более), ось которого южнее г. Илезы продолжается полосой Тарногско-Илезского прогиба. К последнему приурочены долины рек Илезы и Уфтюги, имеющие почти строго меридиональное направление (Крутиков и др., 1987).

В юго-западной части Устьянского плато хорошо выражены три яруса обширных плоских поверхностей: на высотах 160–170, 145–150 и 120–125 м. Плоские междуречья, соответствующие этим уровням простираются в согласии с общим северо-западным направлением тектонических структур. Поверхность среднего уровня (145–150 м) резко меняет направление на меридиональное в восточной части Устьянско-Кокшеньгского плато, приходя в согласие с главным направлением структурных элементов Тарногско-Илезского прогиба. Приток Кокшеньги р. Печеньга в верхнем течении течет с северо-запада на юго-восток, а в среднем входит в пределы Тарногско-Илезского про-

гиба и поворачивает строго на юг. Эти смены направлений указывают на принципиальную смену неотектонической обстановки и ландшафтную границу регионального уровня. Поверхность среднего уровня во многих местах заболочена; у ее бровки находятся истоки многих крупных притоков Кокшеньги. Близость болотных котловин к бровкам также считается признаком блокового строения (Малаховский, 2000). Поверхность уровня 120–125 м местами подходит вплотную к долине Кокшеньги в среднем течении. Близость коренных пород — главным образом, мергелей верхнепермского возраста — в ее пределах сказывается в резких поворотах долин, огибающих жесткие блоки. Например, долина р. Лебеденьги делает длинный крюк, течет около 4 км параллельно Кокшеньге, чтобы затем резко повернуть под прямым углом на юго-запад и пересечь этот блок по разрывному нарушению. В пределах полигона исследования три уровня разделены короткими пологими и покатыми склонами, маркирующими полосу разрывных нарушений. В результате создаётся ступенчатый блоковый рельеф (Хорошев, 2003б).

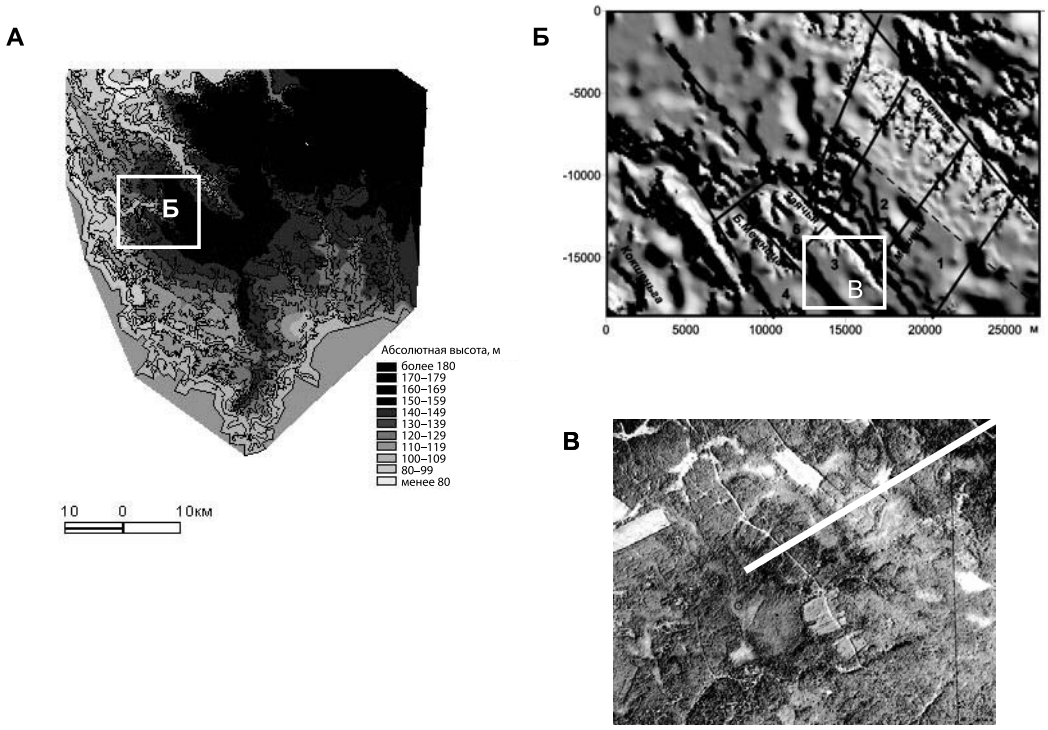

Рис. 15. Положение среднетаежного полигона в Устьянском районе Архангельской области. А — южная часть Устьянского плато, цифровая модель рельефа, масштаб 1 : 200000. Б — полигон «Заячья», цифровая модель рельефа, масштаб 1 : 50000; линиями показаны основные разрывные нарушения, цифрами — номера неотектонических блоков (Хорошев, 2003). В — полигоны «Трансект» (юго-западная часть, белая линия) и «Медвежий», аэрофотоснимок.

Итак, полигон исследования находится в пределах блока, границами которого являются: на севере — р. Устья ниже впадения Мяткурги, на западе и юге — р. Кокшеньга, на востоке — р. Печеньга в нижнем течении, на северо-востоке — р. Мяткурга (рис. 15, А). Для ясности иерархии условно назовем его макроблоком. В пределах этого макроблока строго соблюдается преобладание северо-западного простирания основных линеаментов, представленных как долинами, так и цепочками приводораздельных болотных котловин. Макроблок разделен долинами на вытянутые в северо-западном направлении мезоблоки, разделенных линиями А, Б, В (рис. 16). Северо-восточный мезоблок заключен между линеаментами долин Соденьги (рис. 16, линия А) и Печеньги. Восточный мезоблок соответствует междуречью Соденьги и Заячьей (рис. 16, линия Б). В его пределах московская морена перекрыта озерно-ледниковыми отложениями того же возраста. Мощность четвертичных отложений более 20 м, кровля коренных пород находится на абсолютной высоте 140–145 м. Центральный и юго-западный мезоблоки заключены между Заячьей и Кокшеньгой. Центральный мезоблок опущен по сравнению с восточным и северо-восточным. Кровля коренных пород находится на высоте 117–135 м с понижением в северном (к Заячьей) и западном (к Пукоме) направлениях. В их пределах помимо московских моренных суглинков на поверхности встречаются отложения приледниковых озер валдайского возраста. Мощность четвертичных отложений от 5 до 17 м. Центральный и юго-западный мезоблоки разделяются линеаментом, по которому вытянуты строго в линию притоки Заячьей, Сарбалки, Пукомы и Лебеденьги (рис. 16, линия В). Их долины четко отделяют высотный уровень 120–125 м от вышележащих уровней. Линеамент образовался при неотектоническом опускании долины Кокшеньги и отделил глыбу мергелей от основного массива, расположенного в бассейнах Соденьги и Заячьей. Юго-западный мезоблок соответствует зоне неотектонических опусканий с наибольшей мощностью четвертичных отложений более 20 м, по которому заложена долина Кокшеньги с высотными уровнями террас 90–100 м. Кровля коренных пермских отложений находится в пределах юго-западного мезоблока на абсолютной высоте от 69 м (устье Пукомы) до 101 м (террасы Кокшеньги). Таким образом, перепад высот кровли коренных верхнемермских отложений сухонского яруса составляет около 80 м на широтном отрезке протяжённостью 15 км.

Юго-восточная граница мезоблоков на местности маркируется линеаментом, с которым связаны верхние отрезки Заячьей и Лебеденьги (рис. 16, линия Г). Параллельно ему простираются три линеамента (рис. 16, линии Д, Е, Ж), к которым приурочены долины притоков Заячьей (М. Межница, верховье Стругницы, Межница Заячерецкая) и Соденьги (Похмелька, Глубокая, Цеблевка). Они рассматриваются как границы микроблоков. Следует отметить, что при пересечении водораздела Соденьги и Заячьей первые два из этих линеаментов изгибаются, как бы обходя жесткие массивы. Судя по рисунку речной сети на этом участке, даже чехол четвертичных ледниковых и озерно-ледниковых отложений мощностью более 20 м не смог замаскировать жесткое коренное основание. В результате две вершинные поверхности, разделенные невысокой ступенью в 2–3 м, оказались недоступны для освоения эрозией. Об этом свидетельствует наличие двух истоков как у М. Межницы, так и у Заячьей; сами реки образуются при слиянии ручьев под тупым углом. В то же время жесткий водораздельный массив разбит продольным разрывным нарушением (рис. 16, линия З), в результате чего образовалась цепочка приводораздельных депрессий (рис. 15, Б, В). К настоящему времени они заполнены органогенными отложениями мощностью свыше 3 м с образованием

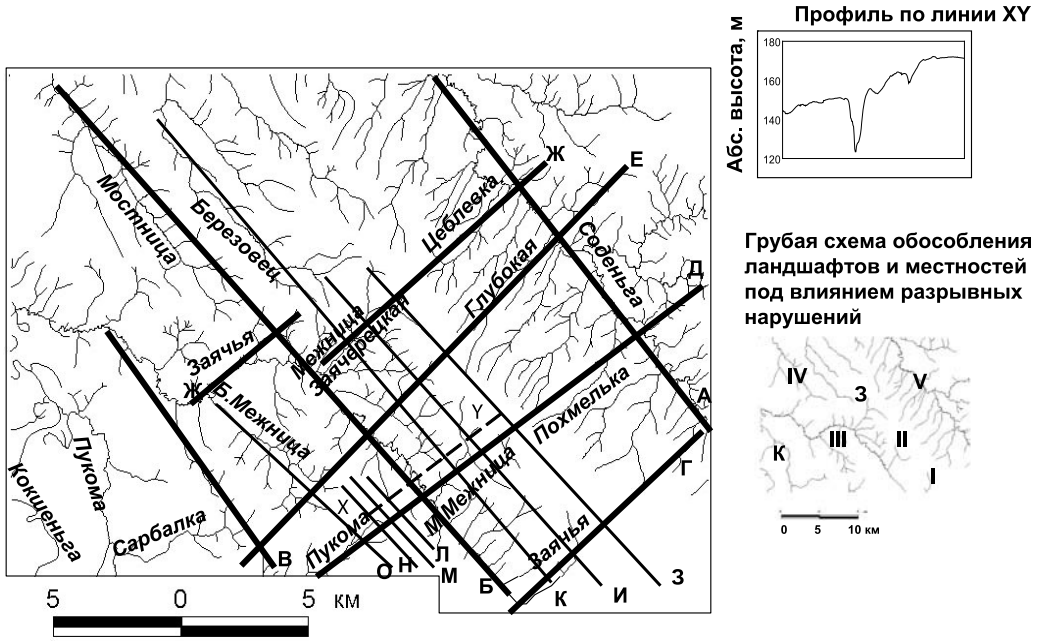

Рис. 16. Система неотектонических мезоблоков и микроблоков в пределах среднетаежного полигона «Заячья» в Архангельской области.
К — Кокшеньгский ландшафт, З — Заячерицкий ландшафт, I–V — местности. Остальные пояснения см. в тексте.

выпуклых верховых болот. Резкие границы между болотами и суходолами и быстрое нарастание глубин минеральной поверхности доказывает именно тектоническое происхождение приводораздельных депрессий. Показательно, что болотный массив состоит из трех изолированных болот, каждое из которых сформировалось на пересечении продольного разрывного нарушения с поперечными, освоенными притоками Заячьей и Соденьги.

Склон междуречья, обращённый к Соденьге, расчленён густой сетью разрывных нарушений северо-восточного простирания на узкие наноблоки средней шириной около 1 км, причем по примерно по 500 м приходится на пологонаклонные междуречья и склоны долин. Днища долин, как правило, узкие, без выраженной системы пойм и террас. В отличие от вышеупомянутых долин Цеблевки, Глубокой и Похмельки, эти долины не имеют на противоположном склоне междуречья продолжения в виде равновеликих симметричных долин, продолжающих линию разрывного нарушения. По этой причине долины рек Осельницы, Камешницы, Вишковой трактуются как границы блоков более низкого порядка, т.е. наноблоков. Длина наноблоков, измеренная от уровня начала эрозионного расчленения водораздельной поверхности до русла Соденьги колеблется от 3,5 до 4 км. Чередование узких пологонаклонных междуречий и глубоковрезанных долин притоков Соденьги составляет характерный каркас ландшафтной структуры этой части территории.

Иначе организована структура склона междуречья, обращенного на юго-запад к долине Заячьей и междуречья Заячьей и Пукомы. Здесь ведущую роль играют разрывные нарушения северо-западного простирания, создающие ступенчатость и ярко выраженную систему долин и ложбин параллельного по отношению к Заячьей простирания. К ним относятся среднее и нижнее течение р. Стругницы, притоки р. Малой и М. Межницы, р. Б. Межница, истоки р. Пукомы и р. Сарбалки. В результате обособляются разноуровенные наноблоки северо-западного простирания шириной 900–1400 м. Наиболее высокая группа наноблоков ограничена цепочкой заболоченных водораздельных котловин сверху (рис. 16, линия З) и сходящимися навстречу друг другу истоками М. Межницы снизу (рис. 16, линия И). На уровне сходящихся истоков М. Межницы расположено слияние двух истоков Заячьей на болоте Заячерицком. Вторая нижележащая группа наноблоков снизу ограничена долиной Стругницы, притоками р. Малой и М. Межницы (рис. 16, линия К). На продолжении этой линии к юго-востоку находится уровень слияния водотоков 1-го порядка и резкое врезание образующихся водотоков 2-го порядка (правых притоков Заячьей в верхнем течении). Третья группа наноблоков ограничена снизу долиной Заячьей (рис. 16, линия Б), которая имеет резко асимметричную форму с покатым правым и крутым, местами почти отвесным левым бортом. По левому борту многочисленны выходы коренных мергелей. Асимметричность долины указывает на моноклинальное залегание кровли пермских пород с падением к юго-западу. На междуречье Заячьей и Пукомы сформировалась система более коротких разрывных нарушений, разделяющих разноуровенные наноблоки шириной около 600 м, которым соответствуют параллельные цепочки заболоченных ложбин, являющихся водосборами руч. Харин Лог и Логоватый, притоков Межницы и Пукомы (рис. 16, линии Л, М, Н). Характерно изгибание ложбин под прямым углом при пересечении разрывных нарушений противоположного простирания, что особенно характерно для истоков Межницы (рис. 15, В). При переходе от междуречного уровня 145–150 к уровню 120–125 м глубина расчленения нарастает, разрывные нарушения выражены в виде глубоковрезанных долин Межницы и ручья Дубровского (рис. 16 линии О, В). Ширина наноблоков на этом участке возрастает до 2000–2500 м.

Выявленные правила пространственной организации междуречий Соденьга-Заячья и Заячья-Пукома соблюдаются в центральной и северо-восточной частях полигона, отличаясь в основном размерами разрывных нарушений и соотношением площадей междуречий и долин. В центральном секторе интенсивность дробления, видимо, была наибольшей вследствие положения на границе зон с противоположными неотектоническими тенденциями. Долина Заячьей делает несколько резких изгибов под прямым углом, но направление ее на всех участках согласуется с одним из двух основных направлений разрывных нарушений — северо-западным или северо-восточным. При каждом изгибе долины хорошо прослеживается продолжение разрывного нарушения на северо-запад в виде долин, принадлежащей к другому бассейну (руч. Березовец, р. Мостница — притоки Соденьги и Кокшеньги соответственно). Ширина долины Заячьей достигает в среднем 2000 м, в то время как ширина междуречных поверхностей варьирует от 600 до 1000 м. Характерны резко выраженные перегибы рельефа и крутые склоны с многочисленными выходами на поверхность коренных пермских мергелей. Для северо-западного сектора территории характерно резкое преобладание разрывных нарушений северо-западного простирания с относительно слаборезанными долинами рр. Мостница, Березовец и их притоками, которые большей частью параллельны

основным долинам и лишь на коротком нижнем участке совершают резкий поворот к основной долине. Междуречья имеют ширину 1000–1700 м, что существенно больше ширины долин (400–700 м) северо-западного простирания. Разрывные нарушения ортогонального северо-восточного простирания существенно короче и образуют более слабоврезанные долины и ложбины.

Гидрографическая сеть долины Кокшеньги, соответствующая юго-западному сектору территории исследования, в меньшей степени подчиняется типичному для региона рисунку разрывных нарушений в силу повышенной мощности четвертичных отложений и погружённости коренного основания. При общем северо-западном направлении течения Кокшеньги часть притоков имеет субширотное и субмеридиональное простирание. Тем не менее, резкие повороты течения Пукомы и Заячьей в пределах долины Кокшеньги указывают на контролирующую роль коренного основания.

Таким образом, система разрывных нарушений самоподобна на нескольких уровнях ландшафтной организации, примерно соответствующих диапазону от физико-географического района до урочищ (Хорошев, 2005б). Она формирует каркас территории и вызывает обособление территорий, отличающихся по целому ряду признаков. В число этих признаков входят:

– рисунок гидрографической сети;
– густота и глубина эрозионного расчленения;
– соотношение площадей междуречий и долин;
– положение кровли коренного основания и мощность четвертичного покрова;
– соотношение и взаиморасположение высотных уровней рельефа.

Территория полигона находится в зоне избыточного увлажнения. Норма осадков не обеспечена энергетическими ресурсами для испарения, что в условиях плоских или слабовогнутых водораздельных поверхностей создаёт предпосылки для заболачивания (Дьяконов, Пузаченко, 2000). Такие условия реализуются на плоском междуречье Заячьей и Соденьги, Заячьей и Пукомы, на террасах Кокшеньги, а также в северо-западной части полигона (бассейн р. Мостница). При возрастании амплитуды высот в центральной части полигона избыток влаги реализуется в виде усиленного поверхностного стока, что в период весеннего снеготаяния приводит к плоскостной эрозии, смыву тонкого слоя четвертичных отложений и обнажению пластов пермских мергелей, накоплению смытого материала у подножий склонов. Реки в пределах расширенных участков долин активно меандрируют, что способствует высокой динамичности ландшафтной структуры пойм вследствие прорыва шеек меандр и образованию стариц. Старичные озёра и староречные заболоченные понижения представляют характерные элементы урочищ пойм Заячьей, Соденьги и Кокшеньги.

Литогенная основа современных ландшафтов сформировалась в течение двух основных этапов. В верхнепермское время в мелководных морских бассейнах откладывались карбонатные породы татарского яруса, в обилии выходящие на поверхность на крутых склонах долин Заячьей, Соденьги и их притоков. Обычно к кровле пермских отложений приурочены истоки ручьёв, имеющих высокую минерализацию и жёсткость.

Второй этап формирования литогенной основы связан с плейстоценом и с первую очередь — со временем московского оледенения, полностью покрывавшего территорию полигона исследования. Ледниковые среднесуглинистые и тяжелосуглинистые отложения карбонатны вследствие длительного контакта с подстилающими коренными карбонатными породами, в изобилии распространённых на Европейском Севере.

Обычны дресвянистые и щебнистые включения карбонатных пород в теле морены, наряду с обломками кристаллических пород скандинавского происхождения. В бассейне Ваги в целом в московской морене от 65 до 96% включений составляют обломки местных пород — известняков, доломитов, песчаников, мергелей, алевролитов (Останин и др., 1979). Изначально, видимо, московские моренные суглинки были полностью карбонатны. К настоящему времени верхняя их часть выщелочена в среднем до глубины 67 см, считая от кровли моренного суглинка (обычно в интервале глубин 75–120 см от поверхности), что позволяет чётко разделять почвенный горизонт BC от неизменённого почвообразованием горизонта C карбонатной морены. Суглинистые моренные отложения служат водоупором и основной литологической предпосылкой формирования болотных массивов.

Важную роль в обособлении современных ландшафтов сыграла не только аккумулятивная, но и экзарационная деятельность ледника. Расширенная часть долины Заячьей в центральной части полигона обладает чертами, которые позволяют геологам трактовать её как троговую долину времени деградации московского оледенения. К их числу относятся: 1) симметричность крутых склонов с резкими перегибами на бровке, несмотря на моноклинальное залегание пластов пермских отложений; 2) положение подошвы позднемосковской морены на склонах долины ниже кровли более древнего пермского горизонта; 3) залегание морены непосредственно в днище долины (Крутиков и др., 1987). Авторы цитированной работы считают, что остатки ледника в предсреднемосковское время сползали с Илезско-Кокшеньгского водораздела в сторону регионального базиса эрозии на северо-запад, т.е. в Важскую низину по ослабленным зонам разрывных нарушений; в позднемосковское время обломки ледника использовали уже подготовленные троговые долины. Непропорциональность современного стока Заячьей огромным размерам долины заставляют соглашаться со значительным участием как ледниково-экзарационных процессов, так и более поздних процессов озёрно-ледниковой абразии в моделировании рельефа долины.

Есть сведения, что позднемосковская арктическая морская трансгрессия достигала уровня 150 м, а микулинская бореальная — уровня 110 м, достигая среднего течения Устьи в районе с. Шангалы (Смирнова, 1986), что могло оказать определённое влияние на современную геоморфологическую обстановку в районе исследования.

При отступании московского ледника территория заливалась водами приледниковых подпрудных озёр, что привело к переработке в мелководных условиях поверхностного слоя морены и образованию песчано-супесчаного чехла средней мощностью около 30 см. Литологические различия верхней и нижней части почвообразующей толщи практически отсутствуют на большей части территории Архангельской области, что позволяет расценивать двучленные отложения как продукт преобразования исходно единой моренной толщи (Апарин, 1982). Таким образом, сформировалась характерная для района двучленная почвообразующая толща, в которой процессы элювиирования сконцентрированы в песчано-супесчаном плаще, а процессы иллювиирования растворов, илистых и песчаных частиц охватывают верхнюю выщелоченную от карбонатов часть суглинистой толщи (рис. 17). За счёт вмывания песчаных частиц образуются хорошо выраженные скелетаны по граням структурных отдельностей, что переводит верхнюю часть моренной толщи в категорию среднего опесчаненного суглинка, в то время как нижележащая толща определяется как тяжёлый суглинок. Водоупорная роль суглинка по отношению к атмосферным осадкам, свободно просачивающимся через

песчано-супесчаный плащ, обусловливает возникновение верховодки, контактного оглеения, контактного оподзоливания, образования ортштейнового горизонта на кислородном барьере. Уровень верховодки и её химические свойства колеблются по годам и сезонам с тенденцией к подщелачиванию в сухие годы и подкислению — во влажные (Хорошев, Прозоров, 2000). По данным десятилетних сезонных наблюдений на участке трансекта (тт. –5 …64 с шагом наблюдения 25 м) среднее положение верховодки в осенний сезон выше, чем в летний, что вызывает сезонную смену окислительно-восстановительной обстановки

Мнения о положении края ледника в регионе в максимальную стадию валдайского оледенения расходятся. Указываются подножье Северных Увалов (Савинов, 1971), среднее течение Ваги в 150 км к северо-северо-западу от территории исследования (Останин и др., 1979; Крутиков и др., 1987), с. Шангалы в 30 км к северу от полигона (Кожевников, 1984). Большинство источников (кроме Ю.А. Савинова) показывает территорию полигона вне зоны, захваченной валдайским оледенением. Его наследие для современных ландшафтов сказалось, прежде всего, в подпруживании стока Ваги на север и формировании обширной системы приледниковых озер, занимавших долину Кокшеньги, в том числе западную часть полигона, где сформировались толщи песчаных отложений, мощность которых убывает в восточном направлении. Система подпрудных озёр вообще составляла характерную особенность приледниковых районов (Квасов, 1975; Гугалинская, Алифанов, 1995). Важское приледниковое озеро имело связь с Сухонским через район современной долины Уфтюги на юго-восточном крае

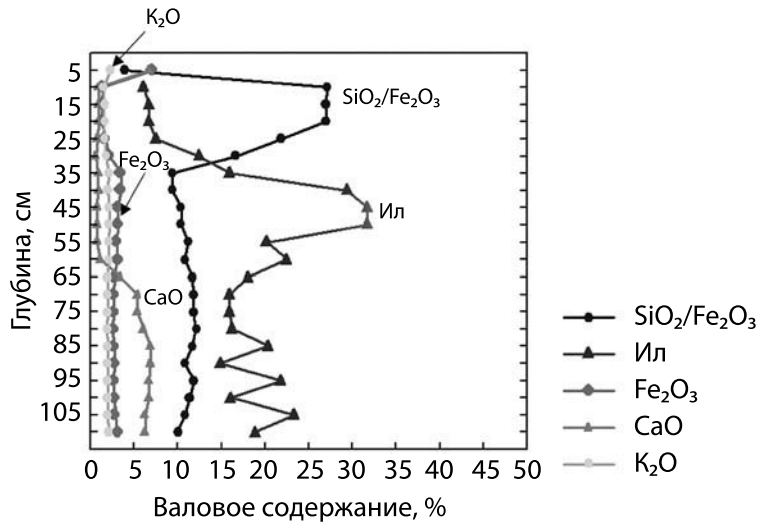

Рис. 17. Распределение илистых частиц и валовой химический состав агродерново-подзолистой почвы (на месте подзолистой почвы) на озёрно-ледниковых супесях, подстилаемых с глубины 40 см средними моренными суглинками. Среднетаежный полигон «Заячья» в Архангельской области.

Устьянско-Кокшеньгского плато (Квасов, 1975). Мнения о положении уровня Сухонского приледникового озера 21–15 тыс. л.н. расходятся от 145 до 150–169 м, причём для уровня 145 м отмечается перемыв московской морены с образованием песчаного плаща 20–50 см (Гугалинская, Алифанов, 1995). По мнению этих авторов, мелководное озеро могло существовать на уровне 120 м до периода 3 тыс. лет назад. Мощность песчано-супесчаного плаща, возникновение которого связывается с наследием приледниковых подпрудных озёр московского и валдайского времени, варьирует в пределах полигона. Плоская поверхность на левобережье Заячьей с высотой 145–150 м резко выделяется маломощностью песчано-супесчаного плаща (15–20 см), что может объясняться положением этого уровня в зоне абразии и преимущественного сноса легкого по механическому составу материала во время стояния приледникового озера. При этом песчано-супесчаный плащ максимально заилен по сравнению с другими участками. При близости суглинистого водоупора это способствует заболачиванию. Преобладают березово-елово-сосновые долгомошные леса. В пределах высотного уровня ниже 145–150 м, моренные суглинки перекрыты более мощным песчано-супесчаным плащом (35–45 см), что указывает на принципиально иные соотношения денудации и аккумуляции. Наиболее сильно опущенные части междуречий, примыкающие к долине Кокшеньги, отличаются максимальной мощностью песчано-супесчаного плаща (до 60–80 см) и наибольшей распространенностью боровых местообитаний с преобладанием сосновых зеленомошных и лишайниковых лесов, высокой встречаемостью можжевельника, вереска, плаунов. Отложения валдайского приледникового озера слагают высокие террасы Кокшеньги в западной части полигона. За пределы долины Кокшеньги они выходят в виде маломощного песчано-супесчаного чехла на междуречьях Пукомы и Заячьей, Заячьей и Мостницы, который почти выклинивается на уровнях 145–150 м. В суженной части долины Заячьей на склонах местами выражена валунная отмостка, видимо, маркирующая береговую линию озера. На более высоких уровнях песчано-супесчаный чехол относится к наследию позднемосковского приледникового озера.

Палеогеографическая реконструкция условий голоцена показала циклические изменения подзональных условий (Абрамова, 2002; Дьяконов, 2002). По результатам спорово-пыльцевого анализа образца погребённой почвы с глубины 53 см на склоне короткого лога, врезанного в левый борт долины Заячьей, лесотундрово-северотаёжные условия с берёзово-сосновыми лесами господствовали в пребореальном и начале бореального периода 9800 лет назад. В это время важнейшим почвенным процессом, повлиявшим на современные ландшафтные условия, был активный вынос карбонатов из моренных суглинков, что фиксируется по скоплениям карбонатов в озёрных отложениях Европейского Севера (Гагарина, 1994). Статистические модели отношения современного положения карбонатов в почвенном профиле к морфологическим признакам оподзоливания, положению уровня грунтовых вод, характеристикам рельефа показывают отсутствие достоверной связи (Хорошев, 2003а). Иначе говоря, уровень карбонатов в современных почвах обусловлен не современными ландшафтными условиями, а, скорее всего, условиями бореального времени, на которое приходится наиболее активное выщелачивание моренных суглинков. В литературе по южнотаёжным районам Восточно-Европейской равнины есть указания на относительно хорошую сохранность карбонатов в лёссовидных суглинках в условиях гидроморфизма, в то время как по мере развития эрозионной сети карбонатность уменьшается (Русаков и др., 2000). В

самых общих чертах эта закономерность соблюдается и для моренных суглинков района исследования.

Климатический оптимум голоцена характеризовался для территории полигона возникновением среднетаежно-южнотаёжных условий с увеличением доли ельников папоротниковых зеленомошно-сфагновых и эпизодическим участием широколиственных ценозов в растительном покрове. Подобные фитоценозы с преобладанием ели и активным возобновление ели на вырубках в настоящее время (но без участия широколиственных деревьев) присутствуют в восточной части полигона, наиболее удалённой от хорошо дренированных и густорасчлененных местностей. Рост увлажнения и температур в среднеатлантическое время 6500 лет назад дал толчок развитию заболачивания (Дьяконов, Пузаченко, 2000). Второй этап заболачивания приходится на период похолодания и соответствующего снижения испарения в первую половину суббореала, когда южнотаёжные элементы уступают место господству средней тайги и начинает возрастать доля сосны в древостое. Следует отметить, что в настоящее время восстановление леса после вырубок в западной более дренированной части полигона, в отличие от восточной, идёт через сосну. Третий этап заболачивания соответствует рубежу суббореального и субатлантического времени, что также обусловлено похолоданием, а четвертый — малому ледниковому периоду 450 лет назад, когда начал формироваться торфянистый горизонт современных почв (Дьяконов, Пузаченко, 2000). На суббореальный период приходится развитие подзолистого процесса (Гагарина, 1994), который наряду с торфонакоплением формирует профиль современных почв.

Территория полигона расположена на границе двух ландшафтов, обособление которых связано с различиями в генезисе, составе отложений, типах рельефа. Граница ландшафтов является одновременно границей физико-географических районов. Юго-западная часть полигона (14% площади) принадлежит ***ландшафту долины Кокшеньги, сложенной мощными аллювиальными и озёрно-ледниковыми отложениями с сосновыми лесами на песчаных подзолах по террасам и пойменными лугами, ивняками и ольшанниками на аллювиальных почвах***. Кокшеньгский ландшафт имеет линейную форму и простирается как в юго-восточном, так и в северо-западном направлении относительно участка, включённого в исследование. Остальная часть территории (86% площади) принадлежит Заячерицкому ***ландшафту структурно-эрозионно-моренной волнистой равнины с неглубоким залеганием пермских мергелей с сочетанием мелкоколиственно-еловых лесов на подзолистых почвах и болот, частично распаханной в дренированных местностях***. Обособление ландшафтов объясняется различной функциональной ролью территорий во время московской и валдайской ледниковых эпох. Роль водноледникового стока и озёрно-ледниковых режимов наиболее ярко проявлялась в долине Кокшеньги, которая в силу положения в зоне ослабленного неотектонического поднятия или опускания являлась зоной аккумуляции вещества преимущественно лёгкого механического состава и преимущественно боковой эрозии. Результатом стало формирование широкой долины с типичной для равнинных регионов хорошо развитой системой аккумулятивных террас с господством боровых местообитаний и пойм. Восточная и северо-восточная границы ландшафта с Заячерицким соответствуют линии резкого погружения кровли коренных пород под озёрно-аллювиальные и зандровые отложения к западу от деревень Мозоловская, Ульяновская и Дуброво, которая хорошо выражена в рельефе как контакт подножья узкого длинного коренного увала к бугристой песчаной террасе Кокшеньги. К северу от долины Заячьей

увал не выражен, но существует ясный перегиб от плоской междуречной поверхности к крутому склоны долины, бронированному мергелями с прислонёнными озёрно-ледниковыми песчаными отложениями. Для Заячерицкого ландшафта ведущую роль сыграло сочетание процессов аккумуляции моренных суглинков при подчинённом значении озёрно-ледниковой переработки на фоне активных неотектонических поднятий, сформировавших систему разрывных нарушений и определивших ортогональную структуру речной сети, а также обусловивших высокое положение коренного карбонатного основания при малой мощности четвертичных отложений. Для Заячерицкого ландшафта, в отличие от Кокшеньгского, характерно господство местообитаний бореальной и болотных эколого-ценотических групп растений на междуречьях и неморальной — на склонах долин. В ландшафтно-геохимическом отношении отличительной особенностью Заячерицкого ландшафта является широкое распространение не только зонального кислого, но и переходного и даже кальциевого классов водной миграции, что обусловлено значительным влиянием карбонатных отложений (Авессаломова и др., 2013). Заячерицкий ландшафт является юго-западным сектором более обширного ландшафта междуречья Соденьги, Мяткурги и ряда притоков Кокшеньги (Печеньги, В. и Н. Майги, Иваса, Лебеденьги).

Контрастные условия дренированности и минерального питания вследствие разной густоты и конфигурации неотектонических разрывных нарушений способствовали обособлению пяти местностей в пределах Заячерицкого ландшафта. Для них при существенных количественных различиях свойственно качественное сходство основных факторов формирования, принципиально иных по сравнению с Кокшеньгским ландшафтом. Все местности охвачены ландшафтными описаниями, включенными в основной массив данных (ниже — полигон «Заячья»)

Ростовская местность — *сильнорасчленённая структурно-эрозионная хорошо дренированная равнина, сложенная пермскими мергелями, перекрытыми маломощным чехлом озерно-ледниковых валдайских и моренных московских отложений с сельскохозяйственными угодьями и вторичными елово-березово-сосновыми лесами на агродерново-подзолистых почвах по междуречьям и сочетанием агроабразёмов и рендзинов по склонам*. Названа по историческому топониму «урочище Ростово», известному с XV века, в настоящее время сохранившемуся в названии Ростовского сельского поселения. В пределах Ростовской местности расположены два вышеупомянутых участка крупномасштабных исследований на уровне урочищ (ниже — участки «Козловка» и «Становская балка»).

Местность занимает среднюю часть бассейна р. Заячьей, находящуюся на границе зон с разнонаправленными неотектоническими движениями, что обусловило раздробленность рельефа. Долина Заячьей несколько раз резко меняет направление почти под прямыми углами, подчиняясь густой системе разрывных нарушений и формируя вместе с долинами притоков характерные узкие вытянутые плоские междуречья с фестончатыми границами (рис. 16). Долинные комплексы крупных разрывных нарушений преобладают по площади над междуречными. Доминантные элементы ландшафтной структуры — распаханные урочища коренных склонов долин, террас и узких хорошо дренированных междуречий свежих гигротопов с маломощным чехлом четвертичных отложений. Большинство урочищ имеет вытянутую форму и ориентировано в северо-западном или северо-восточном направлении в согласии с системой разрывных нарушений. Ландшафтно-геохимические катены укорочены вследствие высокой крутиз-

ны склонов. Характерная особенность склоновых урочищ — выходы на поверхность пермских мергелей, в основном - в результате плоскостной эрозии пахотных угодий. Активное врезание рек в толщу карбонатных пород сообщает водам необычно высокую для зоны тайги минерализацию, которая колеблется по сезонам и по годам в пределах 500–800 мг/л, причем в подавляющей степени за счет трех ионов - кальция, магния и гидрокарбонат-иона, сульфат-ион отсутствует. Дренированность и богатство почв основаниями в придолинных частях междуречий и долинах обусловливают повсеместное сельскохозяйственное использование территории и замену коренных субнеморальных еловых лесов пахотными и пастбищными угодьями. В естественном состоянии в ландшафте преобладали субнеморальные лесные урочища и лишь по песчаным террасам — боровые. Болотные урочища относятся к категории редких, невелики по размерам и встречаются в поймах и в междуречных водосборных понижениях. Границы Ростовской местности с Мостницкой и Гридинской проводятся по критерию смены соотношения междуречных и долинных комплексов в сторону первых, перехода доминирующей роли к урочищам влажных и сырых гигротопов, что соответствует и смене типов землепользования с сельскохозяйственного на преимущественно лесохозяйственное.

Мостницкая местность — *слаборасчлененная волнистая озёрно-ледниковая слабодренированная равнина, сложенная маломощными валдайскими песками и суглинками, подстилаемыми пермскими мергелями, с вторичными елово-березово-сосновыми лесами на подзолистых почвах, оксиломезофитными лугами на агродерново-подзолистых почвах и верховыми болотами на торфяниках и торфяно-глеезёмах*. Названа по крупнейшему водотоку — р. Мостница.

Обособление местности обусловлено, с одной стороны, её положением в краевой зоне подпрудного приледникового озера поздневалдайского времени. С другой стороны, местность обладает своеобразной полосчатой пространственной структурой, контролируемой строго однонаправленной системой разрывных нарушений. Северные и западные границы местности находятся за пределами полигона. Урочища плоских и пологонаклонных междуречий преобладают по площади над долинными. Склоновые урочища имеют существенно меньшие уклоны, а урочища днищ меньшую ширину, по сравнению с Ростовской местностью. Преобладающее северо-западное направление долин рек и ручьев (Мостница, Березовец и их притоки) при редуцированных эрозионных формах ортогонального направления создаёт однонаправленный поток переноса вещества. Размеры ландшафтно-геохимических катен резко отличаются в зависимости от их ориентации. Минерализация поверхностных вод снижена, по сравнению с Ростовской местностью. Мощность чехла лёгких по механическому составу озерно-ледниковых отложений нарастает к северо-западу, т.е. по направлению к долине Кокшеньги — основному каналу водноледникового стока. Согласованно с мощностью четвертичных отложений происходит смена условий минерального питания. Субнеморальные местообитания, фрагментарно встречающиеся в юго-восточном секторе местности, вытесняются бореальными и боровыми к северо-западу. Неглубокое расчленение местности в пределах полигона способствует широкому распространению влажных и сырых гигротопов, что снижает качество сельскохозяйственных угодий. Распашке в прошлом подвергались лишь юго-восточные сектора вследствие относительно близкого залегания коренных карбонатных пород. Основная площадь занята лесными урочищами в сочетании с болотными по водосборным понижениям и между-

речным котловинам. Северные и западные границы местности находятся за пределами полигона. Восточная граница (с Гридинской местностью) соответствует восточному краю ареала распространения валдайских озерно-ледниковых отложений и смене преобладающей ориентации разрывных нарушений и долин с северо-восточной (в Гридинской местности) на северо-западную.

Гридинская местность — *слаборасчленённая ступенчатая эрозионно-моренная слабодренированная равнина, сложенная относительно мощными московскими моренными суглинками с чехлом озерно-ледниковых отложений, подстилаемыми пермскими мергелями, с елово-осиново-березовыми и елово-березово-сосновыми лесами на торфяно-подзолисто-глееватых почвах в сочетании с верховыми и переходными болотами на торфяниках и торфяно-глееземах*. Названа по местному топониму, относящемуся к междуречному болотному массиву, популярному и ближайшему к большинству деревень месту ягодного промысла. В пределах Гридинской местности проведено вышеупомянутое крупномасштабное трансектное исследование (полигон «Трансект»).

Местность выделяется в пределах ландшафта по характерной ступенчатости, связанной с блоковым строением. Междуречья состоят из серии блоков, уровни которых понижаются по направлению на юго-запад к зоне неотектонических опусканий долины Кокшеньги. Границами блоков являются гидроморфные урочища вытянутой формы, ориентированные в северо-западном направлении и представленные долинами ручьёв или болотами. Наиболее крупное разрывное нарушение соответствует суженному крутосклонному, местами почти каньонообразному, отрезку долины Заячьей с многочисленными выходами мергелей. Ортогональная система разрывных нарушений северо-восточного простирания также развита, но более разрежена. В совокупности разрывные нарушения двух ортогональных направлений создают характерный решетчатый пространственный рисунок. Плоские поверхности блоков характеризуются, как правило, слабой дренированностью и преобладанием влажных гигротопов, занятых лесными комплексами. Характерная особенность почвообразующих отложений — двучленность, что создает предпосылки для временного или постоянного оглеения на контакте песчано-супесчаной озерно-ледниковой (мощностью 20–40 см) и валунно-суглинистой моренной толщ и развития мохового яруса растительности. Вследствие переувлажнённости сельскохозяйственное освоение в настоящее время отсутствует. Площадь субгоризонтальных переувлажненных поверхностей блоков сопоставима с площадью, занимаемой пологими и покатыми склонами блоков, обращенными к нижележащим блокам с преобладанием свежих гигротопов. Ландшафтно-геохимические катены удлинённые и многоступенчатые с частыми сменами направления переноса вещества, местами с бифуркациями стока из заболоченных межблоковых понижений. Геохимическая структура отличается высокой контрастностью, обусловленной «конкурирующим» геохимическим влиянием на почвенный и растительный покров кислой верховодки, формирующейся в песчано-супесчаном чехле, сильнокислых болотных вод, и щелочных грунтовых вод, формирующихся в карбонатных моренных суглинках и на контакте их с коренными мергелями (Хорошев, 1999; Хорошев, Прозоров, 2001; Прозоров, 2003). Геохимическая контрастность отражается в распределении господствующих лесообразующих пород и характере восстановительных сукцессий на месте вырубок. Относительно богатые местообитания склонов и поверхностей блоков заняты преимущественно лесами с господством осины, а бедные — с господством сосны и березы. Под пологом перечисленных пород повсеместно активно возобновляется ель.

В настоящее время наиболее типичны 40–60-летние леса с березой, сосной и/или осиной в первом ярусе и вторым ярусом и/или подростом из ели. Границы Гридинской местности проведены по ареалу распространения блоковой ступенчатой структуры с полигональным рисунком и преобладанием линеаментов северо-западного простирания. Ее северо-восточная граница с Соденьгской местностью проведена по окраинам плоского междуречья, где рисунок разрывных нарушений меняется по направлению и густоте, что создает резко отличную пространственную структуру Соденьгской местности, выделяющейся более густой сетью линеаментов с ярко выраженным преобладанием северо-восточного простирания.

Болванская местность — *слаборасчленённая моренная пологонаклонная слабодренированная равнина, сложенная относительно мощными московскими моренными суглинками с чехлом озерно-ледниковых отложений, с еловыми и елово-осиново-березовыми лесами на подзолистых иллювиально-железистых почвах и торфяно-подзолисто-глееватых почвах в сочетании с верховыми и переходными болотами на мощных торфяниках.* Названа по топониму, относящемуся к крупнейшему на Устьянско-Кокшеньгском междуречье болотному массиву — месту истока р. Заячьей.

Местность расположена на максимальном удалении от контакта зон противоположных неотектонических тенденций. Дробление коренного основания здесь выражено в минимальной степени по сравнению с другими местностями. Коренные пермские породы не вскрываются даже в долине Заячьей, что сообщает последней более пологосклонный характер и способствует формированию расширенного днища. Болванская местность отличается от Гридинской отсутствием ступенчатости междуречий, меньшей амплитудой высот и расчлененностью, преобладанием разрывных нарушений северо-восточного простирания в виде слабоврезанных долин притоков Заячьей. Состав почвообразующих отложений при сохранении двучленности отличается повышенной мощностью песчано-супесчаного чехла, в котором почти повсеместно развивается вложенный субпрофиль альфегумусового подзола, и преобладанием безвалунных суглинков. Доля болотных урочищ, их размеры, разнообразие, мощность торфяной залежи увеличены по сравнению с Гридинской местностью. Рисунок ландшафта отличается крупноконтурностью. Ландшафтно-геохимические катены длинные, но малоконтрастные ввиду почти повсеместного преобладания кислой и слабокислой среды. Мощность выщелоченного от карбонатов суглинка здесь достоверно меньше, чем в Гридинской местности (соответственно, в среднем 55 и 70 см). Вероятно, в этом проявляется прямое соотношение между степенью эрозионной переработки рельефа и степенью выщелоченности моренного суглинка. Однако доля урочищ с видами неморальной группы сокращена ввиду глубокого положения кровли коренных пород и слабой эрозионной расчленённости. В вертикальной структуре ландшафта в наибольшей степени, по сравнению с другими частями полигона, выражены зональные среднетаёжные черты, в частности относительно высокая доля условно коренных еловых лесов влажных и сырых гигротопов. В то же время постоянно расширяется площадь вырубок и замены темнохвойных лесов зарослями вторичных мелколиственных пород. Восстановление леса идёт, как правило, без участия сосны, через березу и осину. На узких лесосеках и просеках бурно возобновляется ель наряду или даже без участия мелколиственных пород. Северо-восточная граница Болванской местности с Соденьгской местностью, так же, как и для Гридинской местности, проведена по окраинам плоского междуречья, где меняется густота разрывных нарушений. Восточная граница расположена за предела-

ми полигона исследования. Дальний выступ Болванской местности на правобережном междуречье Соденьги захватывается на восточном краю полигона исследования.

Соденьгская местность — *сильнорасчленённая структурно-моренно-эрозионная хорошо дренированная равнина, сложенная пермскими мергелями, перекрытыми маломощным чехлом московских озерно-ледниковых и моренных отложений с вторичными елово-березово-сосновыми лесами и сельскохозяйственными землями на агродерново-подзолистых почвах, агроабраземах и рендзинах*. Названа по р. Соденьге, долина которой образует ось местности.

Главным фактором обособления местности служит крупное разрывное нарушение, соответствующее долине Соденьги, которая, в отличие от долины Заячьей, строго вытянута в северо-западном направлении. Система ортогональных разрывных нарушений очень густая, особенно на левобережье Соденьги, но имеет более низкий порядок, по ним заложились глубоковрезанные долины притоков Соденьги. В целом набор урочищ однотипен с Ростовской местностью. Отличие заключается в большей доле лесных урочищ, занимающих покатые и пологие склоны, обращенные к долине Соденьги. Мощность лёгких по механическому составу отложений здесь обычно выше, чем в Ростовской местности, что способствует большей доле боровых местообитаний и меньшей доле лесов с субнеморальными элементами. Рисунок ландшафта очень мелкоконтурный и носит полосчатый характер в связи с чередованием глубоковрезанных долин северо-восточного простирания и узких пологонаклонных междуречий. Ландшафтно-геохимические катены длинные и контрастные в связи с пестрым сочетанием кислых условий междуречий и щелочных условий склонов долин с выходами мергелей. Северо-западные и юго-восточные границы местности выходят за пределы полигона исследования.

3.1.2. Среднетаежный полигон: Ханты-Мансийский автономный округ, террасы р. Обь

Полигон расположен в среднетаежном ландшафте в пределах левой террасы Оби (озерно-аллювиальной равнины), примыкающей к Малой Салымской протоке на площади 12 км^2.

Территория расположена на левом берегу реки Оби, в ее среднем течении, на третьей террасе позднеплейстоценового возраста. Глубина расчленения рельефа на этом участке долины Оби составляет 10–25 м, густота расчленения менее 1 км (Природные условия…, 1980). Средняя абсолютная высота составляет 40–50 м. Средняя ширина террасы около 16 км. Средняя глубина оврагов составляет от 2 до 7 м, ширина от 2 до 15–10 м по бровкам, склоны в среднем 15° крутизной. Средние размеры межгрядовых понижения составляют 40–150 м, превышение 1–1,5 м. Средняя крутизна мысов составляет 2–5°, ширина около 20 м, то есть это расстояние между эрозионными врезами.

На формирование современной ландшафтной структуры оказали влияние следующие факторы:

1. минимальные для Западной Сибири скорости неотектонических поднятий (2,4–3,1 мм/год) (Лисс и др., 2001), способствовавшие аккумулятивной деятельности р. Обь в огромной по размерам долине;
2. наследие перигляциальных эпох плейстоцена, сформировавших основную массу почвообразующих отложений;
3. прогресирующее заболачивание.

Территория полигона исследования расположена в наиболее пониженной части восточного борта Мансийской синеклизы Западно-Сибирской плиты. В геоморфологическом отношении это Среднеобская низменность, ядро которой составляют Ханты-Мансийская и Сургутская низины. В среднем плейстоцене территория была захвачена краевой зоной самаровского оледенения (170–230 тыс. л.н.). В более поздние эпохи оледенений в Среднем Приобье из-за подпруды стока — по разным версиям — ледником или морским басейном сформировалась озерно-аллювиальная равнина с ландшафтами холодных пустынь. В условиях холодного континентального климата из супесей и суглинков сформировался покров лессовидных суглинков элювиального происхождения. В пределах зандровых равнин, окаймляющих конечно-моренные гряды тазовской стадии, интенсивно развивались эоловые процессы: дефляция и эоловая аккумуляция (Лазуков, 1971). В позднеледниковье в умеренно-арктическом поясе Северного полушария существовала обширная область с ландшафтами холодных пустынь, но с возможным сохранением древесной растительности по долинам крупных рек (Величко и др., 2007). В южной части равнины, к югу от впадения Иртыша ландшафты холодной пустыни сменялись областью аккумуляции лессов. К этому времени относится эоловая переработка озерно-аллювиальных отложений (Орлов, 1968), в результате которой сформировался характерный ныне грядовый рельеф. Высота серповидно изогнутых гряд достигает 1–5 м, ширина вершины 10–15 м, склоны короткие покатые и пологие, длина гряд около 100–300 м. Гряды сложены среднесуглинистыми пылеватыми и, в меньшей доле, легкосуглинистыми отложениями.

Наиболее ранние фазы торфообразования относятся к интервалу 12–11,5 тыс. л.н. (Нейштадт, 1977; Величко и др., 2007). По районированию болотных комплексов изучаемая территория относится к зоне олиготрофных грядово-мочажинных и сосново-кустарничково-сфагновых болот (Атлас ХМАО, 2004). Линейная скорость торфонакопления в настоящее время составляет 0,57 мм/год, вертикальная около 0,56 мм/год (Инишева, Лисс, 2006). Заболоченность территории около 40% (Атлас ХМАО, 2004). Ширина заболоченных понижений на исследованной третьей террасе, как правило, не превышает 100–130 м. Чаще всего они бывают округлой или вытянутой формы. На территории полигона преобладают крупно- и мелкокочковатые болота практически без четко выраженных гряд и мочажин. Средняя мощность торфяной залежи составляет 2–2,5 м. Характерное для современного ландшафта сочетание групп болотных и суходольных урочищ можно рассматривать как следствие дивергенции палеоэолового бугристого ландшафта вследствие постепенного заполнения понижений органогенными отложениями. Часть понижений, вероятно, имеет палеотермокарстовое происхождение (Западная Сибирь, 1963).

После морских регрессий в позднем плестоцене началась сильная эрозионная деятельность в результате чего стала формироваться эрозионная сеть (Лисс и др., 2001). К основным рельефообразующим процессам в настоящее время относятся озерно-болотная и аллювиальная аккумуляция и эрозионное расчленение придолинных участков (Лазуков, 1971; Геоморфологическое районирование..., 1980).

Почвообразующими породами повсеместно являются озерно-аллювиальные крупнопылеватые средние суглинки с преобладанием фракции крупной пыли без существенных различий механического состава по территории (табл. 3). В обнажении по левому берегу р. Елыково наблюдается чередование слоев с большей и меньшей степенью опесчаненности, причем с глубины 5–6 м опесчаненность возрастает.

Таблица. 3

Механический состав типичного светлозема среднетаежного ландшафта Обской террасы, %.

Повторность	>250 мкм	250–50 мкм	50–10 мкм	10–5 мкм	5–1 мкм	<1 мкм	<0,01 мкм
	Средний песок	Мелкий песок	Крупная пыль	Средняя пыль	Мелкая пыль	Ил	Физ. глина
1	0	6,5	59,9	11,5	17,4	4,7	33,6
2	0	3,8	61,2	11,9	18,3	4,8	35
3	0	6,9	58,7	11,4	18,1	4,9	34,4
Среднее	0	5,7	59,9	11,6	17,9	4,8	34,3

Почвы района исследования по действующей классификации почв (Классификация и диагностика почв России, 2004) относятся к типу светлоземов. В классификации 1977 г. данный тип почв не выделялся, на мелкомасштабных картах их относили к подзолистым, элювиально-глеевым почвам, или глееземам дифференцированным. Ранее такие почвы называли также таежно-поверхностно-глеевыми (Долгова, Гаврилова, 1971). Основными факторами, влияющими на своеобразие этих почв, являются избыточное увлажнение территории, суглинистый механический состав, длительное сезонное промерзание. Характерно оглеение в нижней части профиля, кислая реакция, низкое содержание гумуса. Обычен слабо развитый и укороченный профиль с двумя осветленными оглеенными горизонтами. На глубине 20–40 см осветленный оглеенный горизонт с творожистой структурой маркирует положение постепенно отступающего вниз сезонно-мерзлого слоя, способного находиться в мерзлом состоянии в течение значительной части вегетационного периода, когда в вышележащих горизонтах происходит элювиально-иллювиальное перераспределение вещества. Верхний осветленный горизонт с признаками оподзоливания с плитчатой структурой формируется на глубине 5–10 см, но выражен не во всех почвенных профилях. Блокирующий элювиально-иллювиальное перераспределение мерзлый водоупорный горизонт в новой классификации называется криометаморфическим и располагается под элювиальным горизонтом. Его кровля располагается примерно на глубине 12–16 см от поверхности. Типичный профиль светлоземов: О – EL – CRM – С. Помимо типичных светлоземов встречаются светлоземы грубогумусированные. Они отличаются только тем, что под подстилкой расположен дерновый горизонт с грубым гумусом. Средняя глубина сезонного промерзания грунтов на большинстве форм рельефа составляет 1–2 м (Природные условия…, 1971). Вторым доминирующим типом почв являются торфяники и торфяно-глееземы.

Доминирующим видом растительных сообществ являются полидоминантные елово-кедровые с пихтой и кедрово-еловые мелкотравно-зеленомошные леса, типичные для дренированных местностей среднетаежной зоны. Основными лесообразующими породами являются: осина (*Populus tremula*), сосна сибирская, или кедр (*Pinus sibirica*), ель сибирская (*Picea obovata*), сосна (*Pinus sylvestris*), береза бородавчатая (*Betula verrucosa*), пихта сибирская (*Abies sibirica*). Пихта и сосна бывают только в примеси в небольших количествах, иногда во втором ярусе. В 1860-х гг. огромную территорию в Среднем Приобье охватили лесные пожары (Россия..., 1907). Наблюдаемые ныне древостои в основном находятся на поздней стадии восстановительной послепожарной

сукцессии. Крупные промышленные рубки в данном районе не ведутся за исключением вырубок для нужд нефтедобычи и прокладки дорог-зимников. Возраст насаждений составляет около 130–150 лет в первом ярусе и 70–80 лет во втором. Однако встречаются отдельные деревья кедра и ели возрастом до 150–160 и изредка даже до 250 лет, видимо пережившие пожар 1860-х гг. В большинстве фитоценозов кустарниковый ярус из рябины и шиповника развит слабо. Во всех фитоценозах, включая болотные, развит кустарничковый ярус. В относительно хорошо дренируемых позициях это брусника (*Vaccinium vitis-idaea*) и черника (*Vaccinium myrtillus*), в приболотье багульник болотный (*Ledum palustre*), на болотах — типичные болотные виды: багульник, мирт болотный (*Chamaedaphne calyculata*), подбел обыкновенный (*Andromeda polifolia*), клюква обыкновенная (*Oxycoccus palustris*). В травяном ярусе на площадке 20 × 20 м присутствуют в среднем 7–10 видов, почти все из бореальной эколого-ценотической группы. Типичны майник двулистный (*Majanthemum bifolium*), линнея северная (*Linnaea borealis*), кислица обыкновенная (*Oxalis acetosella*), голокучник Линнея (*Gymnocarpium dryopteris*). В склоновых местообитаниях встречаются представители неморального разнотравья, например, герань лесная (*Geranium sylvaticum*), звездчатка Бунге (*Stellaria bungeana*), фиалка собачья (*Viola canina*). Практически везде развит моховый ярус. В лесных сообществах среди зеленых мхов доминируют *Pleurozium schreberi* и *Hylocomium splendens*, изредка встречаются долгие мхи, на болотах преобладают сфагновые.

Территория исследования принадлежит ***ландшафту волнистой третьей террасы Оби, сложенной озерно-аллювиальными суглинками с прослоями песков, с кедрово-осиновыми лесами на светлоземах на дренированных поверхностях в сочетании с верховыми кустарничково-осоково-сфагновыми болотами с сосновым редколесьем на торфяниках***.

В ландшафте выделено четыре местности (Khoroshev, Brusilovskaya, 2010, Хорошев, 2012в).

Вдоль долины р. Елыково представлена *местность пологих и покатых склонов глубоко расчлененных, выполненных лессовидными аллювиальными и озерно-аллювиальными отложениями, хорошо дренированных, с елово-пихтово-кедровыми с большой долей неморального мелкотравья зеленомошными лесами на дерново-подзолистых, гумусированных пылеватых среднесуглинистых почвах*. Субдоминантные урочища представлены крутосклонными оврагами глубиной до 15 м, врезанными в многометровую толщу лессовидных средних суглинков с хорошо выраженными свежими эрозионными врезами в днищах. Придолинные поверхности междуречий бугристые с амплитудами 2–4 м, по направлению к долине становятся ступенчатыми. Доминируют полидоминантные елово-осиново-кедровые бореально-мелкотравные с примесью неморального разнотравья зеленомошные леса на среднесуглинистых слабодифференцированных светлоземах. Кедр представлен деревьями двух классов возраста: 140–150 и 90–110 лет. Возраст осины — 110–120 лет, реже — до 130; ели и пихты (всегда в подчиненном положении во втором ярусе) — 80–90 лет. Обильны линнея, плауны годичный и сплюснутый, хвощ лесной, майник, седмичник, княженика, костяника, черника, брусника. В микропонижениях возрастает обилие березы, в кустарничковом ярусе — черники; лучше выражено оподзоливание. Гумусовый горизонт присутствует редко, мощностью до 4 см. В почвах пологих придолинных склонов на глубине 30–40 см в середине июня встречался неоттаявший горизонт, который служит водоупором и причиной оглеения

вышележащих горизонтов (Хорошев, 2012в). Верхняя граница горизонта Bcg маркирует кровлю поздно оттаивающего горизонта. При положении кровли неоттаявшего горизонта на глубине около 30 см горизонт EL может полностью отсутствовать, так как выше кровли мерзлого горизонта железо-гумусовые соединения осаждаются сразу под торфяным горизонтом, формируя горизонт BF. При более глубоком положении кровли поздно оттаивающего горизонта (45 см и более) над ним формируется нормальный подзолистый профиль. Однако в растительном покрове такие поздно оттаивающие почвы явно не отражаются. На вогнутых участках склонов лучше выражено оглеение и творожистая структура в горизонтах B и BC; при этом в древесном ярусе возрастает доля сосны. На крутых склонах оврагов и долины р. Елыково подзолистый горизонт выражен неповсеместно, почвенный профиль слабодифференцированный; возрастает обилие пихты, волчьеягодника среднего, жимолости Палласа, грушанки, костяники. В местах разгрузки грунтовых вод в нижних частях склонов могут формироваться сообщества с доминированием черники и багульника. Отличительными особенностями ландшафтной структуры этой местности является хорошая дренированность территории и наличие в травостое склоновых местообитаний неморальных видов (вороний глаз, воронец колосистый). Почвенный покров придолинных склонов и склонов долин значительно осложнен последствиями вывалов и выбросами барсучьих нор.

Доминирующие позиции занимает *местность волнистых поверхностей междуречья с грядовым эоловым мезорельефом, сложенных озерно-аллювиальными отложениями, с нормальным увлажнением, с кедрово-осиновыми бореальномелкотравными зеленомошными лесами на среднесуглинистых светлоземах на грядах в сочетании с верховыми сосново-кустарничково-осоково-сфагновыми болотами на торфяниках в межгрядовых понижениях*. Для вершин эоловых серповидно изогнутых гряд характерны кедрово-осиновые леса с обильным подростом кедра, реже — ели, бореальномелкотравные. Осина может доминировать до возраста 130 лет, позже вытесняется из первого яруса кедром. Почвенный профиль, как правило, имеет строение: EL (2–5 см) – Bgf (5–20 см) – Bcg (20–60 см) – Cg (60–90 см). По склонам бугров крутизной 5–15° в напочвенном покрове велико обилие плаунов годичного и сплюснутого, у подножий и в нижней части склонов доминирует черника, иногда — багульник. Северо-западные склоны гряд чаще более крутые, чем юго-восточные. В межбугровых понижениях развиваются болота и заболоченные леса, преимущественно — березово-сосновые с примесью кедра, осоково-сфагновые на торфяно-глееземах с мощностью торфа 40–50 см. Глей в пределах верхней части профиля окисленный с многочисленными тонкими железистыми прослоями, извилистость которых, видимо, связана с криотурбациями. Хорошо выражен кочковато-мочажинный нанорельеф; на кочках сочетаются болотные (мирт, багульник, морошка) и бореальные (черника, брусника) кустарнички. В пределах заболоченных понижений pH вод около 4,0.

По мере удаления от реки, межгрядовые понижения с заболоченными лесами или болотной растительностью занимают все большую долю. Местами они окаймлены грядами со всех сторон. Группа урочищ переходной приболотной полосы сменяется *местностью слабовогнутых поверхностей террасы, сложенных озерными лессовидными суглинками, перекрытыми торфами, с избыточным застойным увлажнением, с кустарничково-осоково-сфагновыми и пушицево-кустарничково-сфагновыми болотами на среднемощных торфяниках в сочетании с грядовыми повышениями, занятыми сосново-осиново-березовыми бореальномелкотравными лесами на среднесуглинистых*

светлоземах. Мощность торфа достигает 120–150 см, быстро нарастая от краев к центру понижений. В зависимости от мощности торфа болота могут быть безлесными либо (при мощности до 0,5 м) покрыты угнетенным сосновым мелколесьем высотой до 5–10 м. При мощности торфа около 1,5 м и высоте кочек 0,5–0,7 м сосны имеют высоту 1–2 м. Эта местность наиболее удалена от водотоков и не подвержена их влиянию. Доминирующими видами являются мирт, подбел, багульник, клюква, пушица, осоки, сфагнум. На окраинах болот у подножья склонов гряд переходную полосу образуют фации с равными долями низкорослой березы и сосны и господством багульниково-хвощово-осоковых сообществ. В этих урочищах развиты почвы с преобладанием торфяного или перегнойного горизонтов, кислые, с pH 3–4.

К пойме Оби (точнее — Малой Салымской протоки) примыкает *местность краевого сектора пологоволнистой террасы, сложенной лессовидными аллювиальными и озерно-аллювиальными отложениями, с повышенным увлажнением, с кедрово-осиновыми и сосновыми бореальномелкотравными зеленомошными влажными лесами на среднесуглинистых светлоземах в сочетании с сосново-осоково-сфагновыми болотами по понижениям*. Отличительная особенность местности — повышеная гумусированность почв по сравнению с внутренними секторами террасы. Лесные сообщества имеют более южные черты по сравнению с внутренними секторами террасы. Хорошо выражен кустарниковый ярус (жимолость, черемуха, волчьеягодник, рябина), обильны папоротники, а также представитель неморальной эколого-ценотической группы вороний глаз. К пойме Малой Салымской протоки Оби спускаются многочисленные короткие крутосклонные овраги. В обнажении на берегу до глубины 2 м вскрывается слоистая толща с чередованием песчаных и среднесуглинистых слоев, мощность которых возрастате в интервале глубин 2–4 м. Ниже 4 м на фоне сизоватой тяжелосуглинистой толщи многочисленны темно-охристые сильно изогнутые песчаные прослои с ортзандами.

3.1.3. Южнотаежный полигон: Костромская область, Кологривский район, бассейн р.Унжа

Полигон расположен на территории Кологривского района Костромской области, почти целиком к западу от р. Унжи и охватывает площадь 270 км^2. Территория расположена в западной части физико-географической провинции Северные Увалы.

Отличительные черты южнотаежной физико-географической провинции Северных Увалов — возвышенный пологохолмистый рельеф с высотами 180–200 м, густое эрозионное расчленение, относительно близкое залегание коренных карбонатных пород при малой мощности четвертичных (моренных и моренно-водноледниковых) отложений московского и днепровского (в южной части) возраста, присутствие сибирских видов в древостое и травянистом ярусе. Залесенность провинции сильно варьирует. На территории Кологривского участка заповедника «Кологривский лес» сохранились коренные липово-пихтово-еловые леса на дерново-подзолистых почвах. На большей части территории вследствие активных рубок второй половины XX века преобладают березово-осиновые леса с активным возобновлением пихты и ели.

Кологривский район приурочен к Московской синеклизе, осевая часть которой расположена вблизи северных и западных границ Костромской области. На неотектоническом этапе развития для неё была характерна инверсия тектонического режима, в

результате чего наибольшие высоты поверхности на территории области соответствуют именно осевой части синеклизы, в том числе в пределах возвышенности Северные Увалы, а на территории заповедника «Кологривский лес» — более 220 м. Участок с такими отметками соответствует на территории заповедника водоразделу между бассейнами Понги, Вонюха и Нельши (последняя принадлежит бассейну р.Нея, также впадающей в южной части области в Унжу).

Западный и северный секторы Костромской области находились в зоне ледниковой аккумуляции в среднем плейстоцене (московское оледенение). Мнения относительно возраста оледенения, которое захватывало возвышенность Северные Увалы, расходятся. По В.В. Писаревой и И.Н. Лобачеву (1982) московские отложения доходят до Унжи по линии Юрьевец-Парфеньево-Кологрив, а далее к востоку присутствуют только днепровские. На карте физико-географических районов Нечерноземного центра (Физико-географическое..., 1960) провинция Северные Увалы (т.е. вся территория к востоку от долины Виги) целиком отнесена к области днепровского оледенения. В Атласе Костромской области (1975), в работе А.В. Кожевникова (1984) ареал московского оледенения заведен далеко на восток вдоль северных границ Костромской области вплоть до севера Вохомского района. На междуречье Унжи и Виги, которое захватывалось ранней кологривской стадией московского оледенения, камовые холмы из разнозернистых гравийных и валунных песков встречаются реже, чем в западной части Костромской области, разобщены в пространстве и не столько крутосклонны, что указывает на пассивность ледника максимальной стадии и широкое распространение участков мертвого льда, что затрудняет определение точной границы стояния ледника (Бреслав, 1971). В ландшафтной структуре относительно слабая выраженность камовых форм приводит к господству плоских и слабонаклонных поверхностей с затрудненным дренажом.

На территории Кологривского района включенные в анализ описания охватили следующие основные виды лесных ландшафтов (Хорошев и др., 2013в):

1) Пологохолмистые моренные равнины, сложенные тяжелыми валунными суглинками с чехлом лессовидных суглинков с пихтово-елово-осиновыми с участием липы и клена лесами на дерново-подзолистых почвах. Доминантные урочища, как правило, находятся на стадии формирования второго яруса или подроста темнохвойных пород под пологом мелколиственных. Фрагмент ненарушенных лесов данного вида составляет ядро заповедника «Кологривский лес» (Хорошев и др., 2013б). Эти ландшафты преобладают в южной части района к югу от долины р. Н. Варзенга. Характерны повышенная уязвимость к эрозии, высокое видовое разнообразие травостоя за счет присутствия как бореальных (седмичник, линнея, кислица, майник, ожика и др.), так и неморальных (копытень, сныть, медуница, вороний глаз) видов, а также присутствие в подлеске видов деревьев — представителей зоны широколиственных лесов (липа, клен, вяз). Ландшафты этого вида носят экстразональные черты.

Детальные крупномасштабные исследования соотношения морфолитогенных и сукцессионных факторов дифференциации ландшафта и межкомпонентных связей охватили часть этого ландшафта площадью 3 км^2 на территории заповедника «Кологривский лес». Именно на этом участке заповедника сохранились уникальные коренные южнотаёжные массивы, не подвергавшиеся антропогенным изменениям на протяжении 3–4 столетий и служащие эталоном южнотаёжной природы центра Европейской России (Коренные…, 1988; Структура и динамика…, 1989; Кологривский лес, 1986;

Письмеров, 1987; Проект…, 2002; Восточноевропейские леса…, 2004; Немчинова, 2005; Хорошев и др., 2013в). Территория принадлежит ландшафту моренной холмистой лессово-суглинистой равнины с пихтово-еловыми бореальными травяно-зеленомошными лесами на дерново-подзолистых типичных неглубокоосветленных почвах (Хорошев, 2007; Хорошев и др., 2013). Ландшафтная структура исследованной территории формируется в условиях практически однородного состава почвообразующих пород — легких пылеватых покровных суглинков на моренных тяжелых суглинках, что позволяет не придавать решающего значения литологическому фактору при анализе причин пространственной дифференциации. Мощность лессовидного чехла рассматривалась как один из гипотетических факторов дифференциации фитоценозов и почв.

Ландшафт делится на две местности, различные по степени расчлененности рельефа, дренированности местообитаний, и обладающие разным набором сочетанием характерных урочищ. Территория представляет собой возвышенную куполообразную поверхность междуречья р. Вонюх и р. Ухта, полого опускающуюся в северном и южном направлениях. Наиболее высокая плоская часть междуречья изгибается синусоидально, меняя направления с юго-восточного в верховьях Вонюха на северо-восточное и затем вновь на юго-восточное, в целом повторяя направление долины р. Вонюх. Ненарушенные участки заняты доминирующими преимущественно липово-пихтово-еловыми лесами с обильным подростом ели, а также подростом клена, пихты, и липы на легкосуглинистых, местами близких к супесчаным, дерново-подзолистых почвах. Почвенный профиль характеризуется элювиально-иллювиальным профилем, мощность которого, включая переходные горизонты (AEl-El-ElB), может варьировать от 20 до 40 см. В подстилающем тяжелом моренном суглинке формируется горизонт BEL мощностью 10–20 см с хорошо выраженными скелетанами осветленного вмытого материала. Водораздельная поверхность разделена на два сектора седловиной, на которой находятся водосборные понижения, с одной стороны, притоков Вонюха северо-восточного простирания, с другой стороны — долины р. Ухты южного простирания. В пределах водораздельной поверхности имеются водосборные понижения более низкого порядка, отличающиеся от фоновых свежих гигротопов повышенной влажностью с проявлениями оглеения и торфонакопления в почвах. На слабодренированных вогнутых участках междуречья встречаются участки ивово-березово-елового леса чернично-сфагнового с ивой в подросте на торфянисто-подзолистых глееватых почвах. Сочетание относительно слабодренированных урочищ плоских поверхностей, заболоченных седловин и водосборных понижений, очень пологих приводораздельных склонов обусловило выделение особой *приводораздельной местности*. По линии приводораздельной седловины и долины Ухты в меридиональном направлении севернее расположен крупный выступ междуречья, «полуостров» который вынуждена огибать долина Вонюха, имеющий более низкие абсолютные отметки (195–200 м), чем основная водораздельная поверхность (205–208 м). Причины формирования «полуострова» неясны: учитывая довольно строгое соответствие линии меридиональной долины Ухты и продолжающего ее «полуострова», в условиях современного воздымания Северных Увалов есть основания предполагать неотектоническую предопределенность. От линии «седловина – полуостров» в северо-западном и северо-восточном направлении расходятся к долине Вонюха лощины и балки. Таким образом, наблюдается чередование урочищ выпуклых пологосклонных хорошо дренированных увалов

(преобладающих по площади) и малых долин. Это дает основания выделить вторую *местность с более расчлененным, чем в приводораздельной, рельефом*. С приближением к долине Вонюха междуречье приобретает пологонаклонный характер с уклонами 1–3°, что способствует росту дренированности почв и снижению частоты встречаемости переувлажненных фаций. Последние в виде ельников осоково-хвощово-сфагновых в пределах «полуострова» встречаются только в водосборных понижениях в вершинах эрозионных форм.

2) Плоские моренно-водноледниковые равнины, сложенные валунными суглинками, перекрытыми маломощным песчаным чехлом, с елово-осиново-березовыми лесами на подзолистых почвах, местами слабодренированные. Преобладают в северной части Вига-Унжинского междуречья. Характерно преобладание бореального травостоя, господство производных вариантов ельников-черничников и пониженное видовое разнообразие. В условиях плоского рельефа может формироваться верховодка на контакте песчаной и суглинистой толщ, что приводит к локальному оглеению и переувлажнению. В зависимости от глубины залегания моренных суглинков находится присутствие в древостое и подросте пихты сибирской, которая обычно примешивается к ели при повышенном минеральном питании и маломощности песчаного чехла. Значительная площадь ландшафтов данного вида подвергалась сплошным концентрированным рубкам в 1980–90-е гг. и в настоящее время замещена густыми березовыми молодняками в стадии жердняка с начальными стадиями появления елового подроста. Если в 1960–80-е гг. основная доля лесосек в Кологривском районе приходилась на слабовыпуклые междуречные пространства, то в настоящее время вырубаются леса придолинных частей междуречий и долин малых рек, в том числе водосборных понижений. Такое расположение современных лесосек Кологривского района провоцирует нарушение питания водотоков, сокращение стока воды, рост стока наносов и заиливания малых рек (Кощеева, Хорошев, 2008; Khoroshev, Koshcheeva, 2009). В естественном состоянии подобные ландшафты сохранились лишь небольшими фрагментами по склонам речных долин. Субдоминантное положение моренно-водноледниковые урочища могут занимать в пределах моренных лессово-суглинистых равнин, где приурочены к заболоченным приводораздельным древним ложбинам стока. Болотные верховые и переходные урочища относятся к категории редких и имеют небольшие размеры. Для ландшафтов плоских моренных равнин характерно окаймление из плоских или пологонаклонных моренно-водноледниковых равнин с бореальными сосново-пихтово-еловыми чернично-кисличными лесами на подзолистых песчано-суглинистых почвах, примыкающих к речным долинам, в частности к долине Унжи. Некоторые из долин вскрывают на крутых склонах коренные породы триасового или юрского возраста; в таком случае формируются редкие урочища пихтово-еловых с липой в подлеске широкотравных лесов на дерновых почвах. Структурно-эрозионные ландшафты с маломощным четвертичным чехлом или без такового распространены узкой полосой вдоль долины Унжи и практически повсеместно были распаханы. В настоящее время наблюдается массовое зарастание полей осиной, березой, сосной, серой ольхой.

3) ***Плоские и бугристые водноледниковые хорошо дренированные равнины и террасы, сложенные мощными песками с елово-сосновыми лесами на подзолах и «ржавоземах».*** Господствуют на террасах Унжи. Контрастность рельефа способствует высокому разнообразию гигротопов от сухих с сосняками лишайниковыми на ржавоземах до елово-сосновых сфагновых и влажнотравных лесов на торфянисто-под-

золистых глееватых и перегнойных почвах. В травостое присутствует, как правило, бореальное мелкотравье и представители боровой группы при полном отсутствии неморальной флоры.

3.1.4. Хвойно-широколиственнолесной полигон: республика Удмуртия, бассейны р. Казанка и р. Вала

Полигон расположен в юго-западной Удмуртии в пределах двух участков в Кизнерском районе в бассейне р.Казанка с притоками Якшурка, Муркозька, Омгинка (56 км^2) и в Можгинском районе в бассейне р. Вала с притоками Ныша, Сюга (50 км^2).

Оба участка располагаются в пределах ***ландшафта возвышенной пластово-эрозионной равнины, сложенной пермскими отложениями, перекрытыми лессовидными суглинками, в долинах — водноледниковыми песками, с широколиственно-пихтово-еловыми и вторичными березово-осиновыми лесами на дерново-подзолистых почвах в сочетании с сельскохозяйственными угодьями.*** Ландшафт разделен широкими долинами субмеридионального и субширотного простирания на крупные неотектонические блоки с плоскими или слабовыпуклыми междуречными поверхностями и покатыми, местами крутыми, склонами. Водораздельные поверхности находятся на Кизнерском участке на уровнях 140–200 м (более высокие — севернее), на Можгинском — на уровнях 200–230 м (Можгинская возвышенность). На формирование рисунка гидрографической сети, особенно крупных долин, существенно повлияли неотектонические движения с основной тенденцией к поднятию (Бутаков и др., 1977; Рысин, Петухова, 2006). Характерна асимметрия междуречий и долин, связанная с моноклинальным падением пластов (Дедков и др., 1974) (рис. 18). Некоторые исследователи допускают также проявления инсоляционной асимметрии (Ступишин, 1977; Рысин, Петухова, 2006). Глубина расчленения нарастает на Кизнерском участке в южном направлении, на Можгинском — в восточном. Глубина и крутизна склонов боковых долин быстро нарастает вниз по течению по мере врезания в коренные породы, местами вплоть до каньонообразного характера. На поверхность выходят коренные карбонатные пермские отложения казанского яруса в долинах, татарского — на междуречьях: песчаники, аргилиты, конгломераты, красноцветные пески (последние особенно в Кизнерском районе).

На пластовых равнинах Удмуртии на междуречьях преобладают элювиально-делювиальные отложения, часто лёссовидные; в долинах встречаются лёссовидные делювиально-солифлюкционные суглинки (Рысин, 1998), водноледниковые и древнеаллювиальные

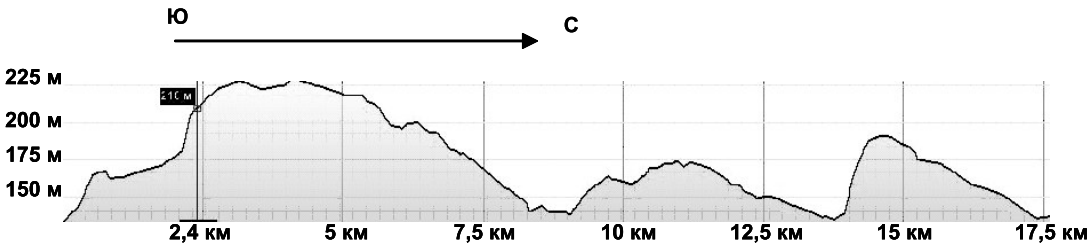

Рис. 18. Гипсометрический профиль через серию увалов в Можгинском районе Удмуртии от р. Ныша к р. Люга к западу от г. Можга.

песчаные отложения (Пермяков, 1972; Природа Удмуртии, 1972). Для почвообразующих пород междуречий, как и для Архангельского и Костромского полигонов, характерна двучленность: покровные лессовидные супеси или легкие суглинки сменяются на глубине 30–50 см коренными карбонатно-глинистыми пермскими отложениями. Доминирующие урочища водораздельных поверхностей формируются на богатых карбонатных коренных породах, что обусловливает благоприятные условия для развития многопородных смешанных древостоев с участием не только ели, но и такой требовательной к минеральному питанию породы как пихта сибирская при широком участии липы, клена, вяза, реже — дуба. Возобновление древостоя после вырубки на дерново-подзолистых почвах с лессовидными супесями, подстилаемыми коренными породами, идет через осину, липу, вяз, березу. Обилен кустарниковый ярус, представленный бересклетом, лещиной, черемухой, жимолостью, калиной, бузиной, крушиной. В травостое господствуют виды неморальной группы: пролесник многолетний, сныть, копытень, медуница, ясменник, вороний глаз, сочевичник, осока волосистая, хотя почти всегда присутствует бореальное мелкотравье: кислица, майник. Почвы, как правило, имеют следующее строение в верхней пылеватосупесчано-легкосуглинистой толще: AY (до 5–10 см) – AYEL (до 15–20 см) – EL, часто языковатый (10YR 6/3, 10YR 6/4), (до 20–25 см) – ELB (до 35–60 см). Ниже 50–60 см представлены среднесуглинистые или тяжелосуглинистые горизонты B и BC красновато-бурой окраски (5YR 4/4, 5YR 5/6), сформировавшиеся в коренной породе. Богатство основаниями способствует высокому плодородию дерново-подзолистых мелкоосветленных или неглубокоосветленных и дерновых почв и является одной из предпосылок широкого развития земледелия, особенно на Можгинском участке.

Высокая степень распаханности в зоне смешанных лесов в южной части Удмуртии стимулирует активную современную эрозию (Рысин, 1998), которая создает основные контрасты на уровне урочищ. Разная густота эрозионного расчленения приводит к обособлению геосистем ранга примерно местностей. Во внутренних частях наиболее широких междуречий встречаются небольшие (100–200 м в диаметре) верховые березовые пушице-сфагновые болота на торфяно-глееземах с мощностью торфа до 60–70 см, залегающем на тяжелосуглинистом глеевом горизонте (10Y 5/1). Нарастание густоты и глубины расчленения происходит, с одной стороны от водоразделов к долинам, с другой — от внутренних широких частей междуречий к торцевой суженной части увалов, разделяющих две субпараллельные долины водотоков, впадающих в реку более высокого порядка. По мере удаления от слабее дренированных широких секторов междуречья и с приближением к суженным торцевым секторам приоритет лесопользования постепенно меняется приоритетом земледелия.

Различия морфолитогенной основы ландшафта в приводораздельном и склоново-долинном секторах обусловлены наследием событий среднего плейстоцена. Оледенением покрывалась только северная часть Удмуртии. Для ее южных районов (в том числе Кизнерского и Можгинского) характерно наследие водноледниковых потоков в виде песков, прислоненных к нижним частям склонов коренных увалов. Растительность в этих позициях указывает на бедность минеральными веществами (носит бореальный характер). Следует отметить, однако, что в Кизнерском районе в бассейне р. Казанки в верхних частях склонов увалов на междуречьях уровня 150–160 м наблюдаются другие пески, явно богатые минеральными веществами, видимо, коренные пермские. Показательно, что на таких более богатых песках липа и другие широколиственные породы быстро заглушают посадки сосны 1980-х гг., осуществленные, видимо, фор-

мально по инструкции «на песках сажать сосну». Склоны долины р. Казанки примерно до уровня 150 м покрыты прислоненными водноледниковыми пылеватыми песками и супесями мощностью местами более 2 м. Этим создается ярко выраженное бореальное местообитание с господством сосново-елового бруснично-черничного кисличного леса с бореальным разнотравьем (кислица, майник, щитовник, орляк, костяника, плаун сплюснутый) при подчиненном участии или отсутствии неморальных видов (сныть, копытень). Для кустарникового яруса характерно присутствие можжевельника, волчьеягодника, крушины, рябины, бересклета. Почвы оподзолены до глубин 30–60 см с постепенной сменой горизонтов El (10YR 6/4) и ELB; нередко в верхней части присутствует старопахотный горизонт. В наиболее хорошо дренированных местоположениях нормальный элювиальный горизонт может отсутствовать и горизонт AEL подстилается горизонтом BF (10YR 5/4, 10YR 5/6). Сниженные междуречья с высотами 130–140 м могут быть перекрыты песчаными отложениями (междуречье р. Казанка и р. Якшурка, В долине р. Ныша (Можгинский участок) в среднем течении маломощный (до 60 см) песчаный чехол встречаются до отметок 210–220 м, а в нижнем течении — до отметок 150–160 м. В 1970-х гг. были предприняты большие работы по искусственному залесению покатых склонов долин р. Ныша и Вала сосной в целях предотвращения эрозии. Вблизи слияния Ныши и Валы в торцевой части увала с пихтово-еловыми лесами выбор технологии выборочных рубок с небольшой площадью лесосеки был также, видимо, продиктован, целями защиты от эрозии и сохранения экологического каркаса.

Склоны долин р. Ныши, р. Валы густо расчленены оврагами и малыми долинами юго-восточного (по крутым склонам) и северо-западного (по пологим склонам) простирания, удаленных друг от друга на расстояние 1–2 км. Глубина вреза и характер землепользования подчиняется асимметрии долин. Например, левый крутой склон долины р.Ныши больше залесен и расчленен более глубоко, чем пологий правый, который почти полностью распахивается за исключением оврагов. Крутые (до 25–40°) склоны вскрывают коренные породы и в силу недоступности для хозяйственного освоения покрыты старовозрастными пихтово-еловыми лесами на дерновых почвах с мощностью легкосуглинистого гумусового горизонта до 7–20 см. В кустарниковом и травяном ярусе в условиях быстрого латерального выноса вещества и близкого положения карбонатных пород сочетаются виды бореальной, неморальной, нитрофильной групп (можжевельник, бересклет, черемуха, калина, ортилия, сочевичник, ожика волосистая, майник, кочедыжник, щитовник). В привершинных секторах оврагов с покатыми (до 10–15°) склонами, примыкающими к распаханным полям, за счет намыва загрязняющих веществ возрастает обилие видов нитрофильной группы (крапива, чистотел, малина, черемуха). Воды ручьев в оврагах имеют щелочную реакцию с pH до 7,9.

У подножья склонов и в тыловых швах террас распространены елово-черноольховые кустарниковые влажнотравные леса на перегнойно-глеевых почвах с господством в травостое нитрофильного разнотравья: таволги, гравилата, колдуницы альпийской, крапивы. Поймы широкие, используются преимущественно для выпаса скота и сенокошения. Наиболее увлажненные части покрыты вязово-черноольховыми лесами на аллювиальных почвах, часто с погребенными перегнойными горизонтами. Для кустарникового и травяного ярусов характерны виды нитрофильной, неморальной, гигрофильной групп: черемуха, малина, смородина красная и черная, крапива, таволга вязолистная, паслен сладко-горький, будра плющевидная, колдуница альпийская, подмаренник цепкий, калужница болотная. Встречаются также крушина, калина, внеярусные растения (хмель).

3.1.5. Хвойно-широколиственнолесной полигон: Калининградская область, Куршская коса

Куршская коса расположена между Балтийским морем и Куршским заливом в пределах зоны смешанных хвойно-широколиственных лесов и представляет собой генетически единый ***ландшафт бугристой низменной эоловой песчаной равнины с сочетанием открытых дюн, свежих и сухих сосняков на слаборазвитых подзолах по повышениям и переувлажненных черноольшанников на органогенных почвах по понижениям рельефа***. В основе косы лежат несколько островов, сложенных моренными суглинками валдайского времени, которые в течении голоцена в результате колебаний уровня Балтийского моря, выноса вещества с реками и вдольбереговых потоков были перекрыты мощными песчаными отложениями. Исключение составляет местность с выходом моренных суглинков на поверхность в районе пос. Рыбачий, что создает наиболее богатые по минеральному питанию местообитания. Фоновые для Куршской косы местности, сложенные песками, представляют собой бугристую эоловую равнину, облик и функционирование которой определяются процессами перевеивания песков. В результате эоловых процессов произошло обособление нескольких параллельных друг другу местностей («пальве»), контрасты которых обусловливают ландшафтное и биологическое разнообразие территории. Стабилизация растительностью резко сократила проявление эоловых процессов на пальве, большинстве дюнных гряд и массивов, однако усиление рекреационной деятельности привело к активизации эоловых процессов на авандюне, незакрепленных дюнных массивах, осыпных склонах дюнных гряд; наименьшая трансформация отмечена для пальве, закрепленных дюнных гряд (Шаплыгина, Волкова, 2013).

В приморской и прикорневой частях косы основную площадь занимает *местность низкой пальве*, поверхность которой превышает уровень моря на первые метры. Характерное явление составляет регулярное подтопление территории в результате фильтрации морских вод и повышения уровня грунтовых вод. Почти постоянное переувлажнение низкой пальве способствует формированию мощных органогенных отложений в виде низинного торфа и перегноя, оглеению в почвах. Богатое минеральное питание и переувлажнение обусловливают преобладание березово-черноольховых влажнотравных лесов. По более дренированным участкам на хорошо гумусированных дерновых почвах встречаются сообщества лесов с участием дуба, липы, клена, вяза, которые, по сути, представляют собой редкие островки более южной зоны широколиственных лесов с большим количеством редких видов травянистых растений. В пределах низкой пальве распространены также относительно редкие для Куршской косы урочища темнохвойных лесов с доминированием ели и бореальных видов в травостое на подзолистых почвах, что создает островки таежной зоны. Элементом ландшафтного и биологического разнообразия низкой пальве являются низинные болота и небольшие озерки. В пределах низкой пальве переувлажненные урочища содержат ценные местообитания водно-болотных видов животных.

В призаливной (восточной) части косы, а местами также в приморской (западной) полосе, доминируют урочища эоловых бугров и межбугровых понижений *местности высокой пальве*. Ее характерные особенности — хорошо дренированные песчаные местообитания, контрасты которых связаны с разной глубиной залегания грунтовых вод. Наиболее типичными для высокой пальве и для косы в целом являются урочища

парковых сосняков луговиково-зеленомошных на дерново-слабоподзолистых почвах с относительно невысоким видовым разнообразием. Они могут занимать поверхности и склоны эоловых бугров и относительно выровненные участки. Такие сообщества в целом репрезентативны для восточных побережий Балтийского моря. По понижениям между буграми в более влажных местообитаниях (иногда с оглеением в почвах) к сосне может примешиваться ель и черная ольха. К содоминирующим сообществам на высокой пальве относятся березняки травяные. Наиболее сухие местообитания характерны для вершинных поверхностей эоловых бугров, где развиваются сосняки лишайниковые. Важную особенность функционирования высокой пальве составляет значительное влияние морских ветров, которые способствую сильному наклону многих деревьев, ветровалам и ветроломам. Риск ветровалов значительно усиливается на участках, непосредственно выходящих к морскому побережью и на опушках даже небольших полян и прогалин (Хорошев, 2011).

В призаливной полосе основная площадь занята *местностью крупных дюнных гряд*, возвышающихся на 30–60 м над уровнем моря. Доминируют урочища активных песчаных дюн со сложным мелкобугристым рельефом с многочисленными крутосклонными останцами. Дюны находятся под действием постоянных дефляционных процессов и смещаются в восточном направлении. Как правило, западные, обращенные к морю, склоны дюн более пологие, чем восточные, нередко обрывающиеся непосредственно в Куршский залив. Будучи наиболее характерным элементом ландшафта Куршской косы, гигантские дюны одновременно представляют собой уникальное явление в масштабах не только Калининградской области, но и России в целом. На Балтике подобные активные эоловые формы встречаются только в юго-восточном секторе побережья между устьями Вислы и Немана, но по размерам и строению дюны Куршской косы не имеют себе равных. Гигантские дюны частично были закреплены древесной растительностью, начиная с конца XVIII века. Посадки сосны разных видов на гигантских дюнах Куршской косы представляют собой уникальный в европейских масштабах памятник природопользования и лесного хозяйства, что послужило одним из оснований для включения территории в список Всемирного наследия. Краевые части незалесенных дюн характеризуются разреженными сообществами псаммофитов, среди которых большое количество редких и эндемичных видов.

В узкой приморской полосе в течение двух столетий постепенно сформировалась своеобразная *местность искусственной авандюны*. Целью ее сооружения была защита внутренней части косы от прорывов морских вод, ветров и песка. Для авадюны характерно сочетание хорошо закрепленных участков с древесной и кустарниковой растительностью, пионерных псаммофитных сообществ и котловин выдувания. Площадь последних стремительно увеличивается в результате антропогенных нагрузок, прежде всего — вытаптывания посетителями морского пляжа. Авандюна, помимо, защитной роли, является памятником природопользования и включает местообитания редких и эндемичных видов растений. Наряду с гигантскими дюнами, урочища авандюны относятся к числу наиболее динамичных на Куршской косе по положению границ и структуре (Хорошев, 2011).

Редкие для Куршской косы виды урочищ содержит *местность моренного острова* в районе пос. Рыбачий. Холмистый рельеф, унаследованный от оледенений, сочетается с насаженными на моренные суглинистые отложения невысокими серповидными и округлыми дюнами, что создает условия для формирования урочищ широколиственных

лесов с участием дуба, липы, клена, ясеня, граба, то есть фактически экстразонального ландшафта в пределах зоны смешанных лесов. В прошлом широколиственные леса на плодородных суглинках моренного острова занимали гораздо большую площадь. В результате хозяйственного освоения сохранились лишь небольшие фрагменты дубрав, ставших редкими для косы урочищами. На месте сведенных дубрав особое место занимает мезофитный, местами — гигрофитный луг, уникальный для косы. Его устойчивое существование в течение многих столетий поддерживается выпасом и сенокошением. При прекращении умеренных сельскохозяйственных нагрузок подобного рода, происходит быстрое его зарастание древесной растительностью. Уникальный для косы мезофитный луг является средоточием местообитаний редких растений и памятником природопользования.

3.1.6. Степной полигон: Оренбургская область, Айтуарская степь, Буртинская степь, бассейн р. Урал

Исследования межкомпонентных связей в степной зоне проводились на двух участках государственного заповедника «Оренбургский». На участке «Буртинская степь в Беляевском районе Оренбургской области изучались связи на основании точечных наблюдений (дискретные данные) и цифровой модели рельефа, на участке «Айтуарская степь» в Кувандыкском районе — на основании континуальных данных космического снимка и цифровой модели рельефа с верификацией по точечным наблюдениям.

Буртинская степь расположена в степной зоне на юго-восточной окраине Восточно-Европейской равнины на границе Предуральского прогиба с Уральской складчатой страной. Участок «Буртинская степь» принадлежит Оренбургскому государственному заповеднику и находится в режиме естественной степи около 25 лет. Буртинская степь лежит в континентальном секторе подзоны типичных степей на междуречье рек Урта-Бурта и Бурля (левых притоков Урала) в ***ландшафте предгорной глубокорасчлененной структурно-эрозионной возвышенной равнины, сложенной пермо-триасовыми осадочными породами молассовой формации в сочетании с котловинами, выполненными юрскими озерными суглинками с типичными разнотравно-типчаково-залесскоковыльными степями на южных черноземах*** (Еремеева, 2012). Выделено три типа местностей Буртинской степи. В местах, сложенных некарстующимися конгломератами, сформировались сильнорасчлененные возвышенные денудационные равнины. На месте крупной карстовой котловины сформированы пониженные аккумулятивные равнины, субгоризонтальные либо с небольшими уклонами поверхности (3–5°), практически без эрозионных процессов. Между карстовой котловиной на месте соляно-гипсовой структуры и возвышенностями, сложенными конгломератами, сформировались переходные позиции — денудационно-аккумулятивные и аккумулятивно-денудационные равнины, в том числе включенное в исследование широкое днище «балки» Белоглинки. В наиболее сухих местах преобладают степные ксерофиты (*Galatella villosa*, *Artemisia marschalliana*, *Festuca valesiaca*, *Stipa zalesskii*) на черноземах южных с наиболее щелочной реакцией почв (pH 7,2–7,4), наиболее близким к поверхности положением карбонатов, минимальной мощностью гумусовых горизонтов. Ниже по катене наблюдается увеличение доли мезофитов (*Hieracium virosum*, *Pulsatilla patens*) одновременно со снижением pH, увеличением мощности гумусовых горизон-

тов. В наиболее влажных местах (днища ложбин и балок) наибольшая доля мезофитов (*Filipendula vulgaris*, *Sanguisorba officinalis*, *Veronica spicata*, *Calamagrostis* sp., *Vicia* sp.) связана с наиболее кислыми (6,0, до 5,0) и глубоко прогумусированными почвами, наиболее тёмных цветов (Еремеева, 2012). В аккумулятивно-денудационных местностях местах выходов грунтовых вод на поверхность формируются осоковые и тростниковые луговины, черноольшаники в понижениях и вдоль ручьев. Пространственное расположение азональных комплексов свидетельствует о наличии линеаментов. Формирование трещин связано с солянокупольной тектоникой перми и триаса (Петрищев, 2011). Наиболее крупные из них имеют северо-восточное направление. Один из них идет по границе аккумулятивных местностей с аккумулятивно-денудационными и продолжается в одной из ложбин массива Южный Кармен. К нему приурочена полоса солончаков и небольших луговин. Другой крупный линеамент проходит через черноольшаник Тузкарагал и продолжается затем в балке Щуровой. Более мелкие линеаменты имеют разные направления. Большинство мелких линеаментов сосредоточено в полосе между аккумулятивными местностями и плато Муелды, что связано с «давлением» находившегося к западу соляного купола.

Айтуарская степь представляет собой участок Оренбургского государственного заповедника в осевой зоне Южного Урала с диапазоном абсолютных высот 160–430 м. С севера территория ограничена широтным отрезком долины р. Урал, с юга — долиной р. Алимбет. Особенностями территории, по сравнению с другими участками исследования, являются: принадлежность к подзоне типичной степи, большая амплитуда высот, преобладание крутосклонных поверхностей, господство коренных осадочных пород в качестве почвообразующих, жесткое подчинение ландшафтной структуры геологическим структурам, регулярность структур рельефа (чередование меридионально вытянутых балок и увалов). Основная часть территории Айтуарской степи (западный и центральный сектора до западной окраины балки Тышкак) принадлежит ландшафту ***структурно-эрозионного складчатого грядово-балочного низкогорья, сложенного чередующимися пластами карбоновых и пермских песчаников, конгломератов, известняков и глинистых сланцев, с останцами эоценовых поверхностей выравнивания, с петрофитными разнотравно-залесскоковыльно-типчаковыми степями на черноземах южных маломощных сильнокаменистых поверхностно-карбонатных***. Восточный сектор территории в пределах днища балки Тышкак принадлежит ландшафту ***мелкосопочного низкогорья, сложенного вулканогенно-осадочными и интрузивными породами палеозоя, с залесскоковыльно-петрофитноразнотравно-типчаковыми степями на черноземах южных маломощных сильнокаменистых поверхностно-карбонатных*** (Хорошев и др., 2014).

Ландшафтная структура Айтуарской степи формируется под воздействием тектонического, литолого-геоморфологического, палеогеографического, солярно-экспозиционного, гидрологического, биогенного, редко антропогенного и ряда других факторов.

Наиболее физиономичные черты ландшафтной организации придает наследие тектонических режимов позднего палеозоя — времени герцинской складчатости Уральской горной страны — и неоген-четвертичного этапа неотектонических поднятий и расчленения территории. Складчатые структуры палеозоя предопределили разнообразное падение пластов осадочных пород, неравномерное эрозионно-денудационное преобразование поверхности, характер гидрографической сети. Общее направление простирания пластов субмеридиональное. Для ландшафта характерна асимметрия

склонов и балок в силу того, что один из склонов обычно является структурным, а другой аструктурным (Хорошев и др., 2014).

В пределах структурных склонов, совпадающих с падением пластов горных пород, типично чешуйчатое расположение субвертикально запрокинутых пластов осадочных пород. Это способствует наличию линейных понижений, вытянутых по простиранию склона, ступенчатому характеру склонов, неравномерному увлажнению участков склона в зависимости от расположения геосистемы на ровной поверхности наклонного пласта или в понижении между торцом одного пласта и выступающей из-под него поверхности другого. Аструктурные склоны, секущие пласты пород, обычно более крутые, с более густой сетью ложбин и лощин с крутым падением, с многочисленными ареалами осыпных, иногда — обвально-осыпных процессов. Для аструктурных склонов в силу большей напряженности механической и водной миграции вещества свойственна большая петрофитность и меньшая мощность почв по сравнению со структурными. Например, левый склон балки Сеновальной состоит из массивных чешуйчатых (ряд продольных гребней, связанных с вершинами пластов) участков, чередующихся с глубокими покатосклонными распадками. Противоположный аструктурный правый склон имеет более густое мелкое расчленение, с хорошо выраженной ступенью, создающей выпуклость склона. Гребни между распадками более узкие, что создает повышенную петрофитность. Крутой наклон пластов часто способствует смещению реального водораздела с орографического гребня. Атмосферные осадки, выпадающие на аструктурном склоне, могут служить источниками питания водотоков противоположного структурного склона. Последний, поэтому, как правило, более глубоко расчленен эрозионными формами и имеет повышенную долю площади геосистем, отклоняющихся от зональной нормы в сторону гидроморфности. Водораздельные поверхности между балками обычно формируются ребрами почти вертикально запрокинутых пластов, что способствует активному физическому выветриванию, накоплению грубообломочного элювия.

Сильные ветры, свойственные высоким водораздельным гребням, удаляют мелкоземистые продукты выветривания, в результате чего почвенный покров фрагментарный или маломощный, представлен в основном литоземами или очень маломощными черноземами. Поверхность гребней перекрыта плащом остаточно накапливающегося щебня. В верховьях балок Сарткарагашты и Камысай наблюдаются места замыкания складок, что создает округлые в плане очертания форм рельефа и способствует концентрической системе стока. Особая структура с чередованием крутосклонных гребней и глубоких распадков, свойственна склонам субширотных отрезков балок (Карагашты) и долин (Айтуарка, Алимбет), где подрезаются пласты пород перпендикулярно простиранию.

Реликты эоценового этапа развития территории представлены в южной части Айтуарской степи в виде широкого плоского, местами ступенчатого плато Актобе, к которому приурочен водораздел р. Алимбет и р. Айтуарки. Некогда единая поверхность выравнивания впоследствии в неоген-четвертичное время оказалась расчленена эрозией, за исключением плато Актобе. Отдельные выдержанные в пространстве высотные уровни существовавшего в прошлом плато прослеживаются в виде узких поверхностей на водоразделах балок, лежащих к северу от Актобе. Плакорное положение геосистем плато Актобе обусловливает практически единственную в пределах Айтуарского участка заповедника возможность развития нормальных коренных зональных разнотравно-типча-

ково-ковыльных степных растительных сообществ. Почвы в силу близости коренных пород далеки от зональной «равнинной» нормы, которая определяется как подтип черноземы южные, или тип черноземы текстурно-карбонатные в соответствии с Классификацией почв России 2004 г. Остальные геосистемы заповедника за пределами плато, а частично и в его пределах, приходится относить к категории, по терминологии иркутской школы ландшафтоведения В.Б. Сочавы, «квазикоренных» геосистем в силу гипертрофированного влияния одного из факторов. Таких факторов, обусловливающих отклонение от зональной нормы, установлено три (Хорошев, Леонова, 2015): 1) гидрологический (в зависимости от степени увлажнения формируется так называемый «гидроморфный ряд» геосистем); 2) литологический («литоморфный ряд» по нарастанию степени каменистости почв и петрофитности растительного покрова); 3) фактор засоления («галоморфный ряд» по нарастанию степени осолонцевания). В дальнейшем для характеристики геосистем заповедника мы используем эту терминологию, отражающие положение геосистемы по отношению к зональной норме (коренная геосистема) в литоморфном, гидроморфном или галоморфном рядах квазикоренных геосистем.

Неотектонический фактор, действующий в неогеновом и четвертичном периодах, способствовал неравномерному расчленению Айтуар-Алимбетского междуречья. Активное неотектоническое поднятие обусловило неодинаковую денудацию осей антиклинальных и синклинальных складок, что привело к обособлению балок Акбулак, Карагашты, Сеновальной, Шинбутак, Сарткарагашты, Камысай (Жрык) и Тышкак. Днища балок бывают:

- ✓ почти плоские с широкими террасовидными поверхностями (Карагашты),
- ✓ с серией наложенных пологосклонных пролювиальных конусов (Сеновальная),
- ✓ с серией низких покатосклонных сопок, связанных с выходами пластов коренных осадочных пород (верховья Сеновальной, Шинбутак),
- ✓ с серией продольных гряд, связанных с выходами коренных пород (Камысай),
- ✓ с серией крутосклонных сопок, связанных с выходами вулканогенно-осадочных и интрузивных пород (Тышкак),
- ✓ суженные с наложенными осыпными крутосклонными шлейфами (Сарткарагашты).

Балки разделены субмеридиональными грядами, возвышающимися над днищами балок на разных участках на величину от 10–20 до 100–120 м. Наибольший контраст расчленения (балки Шинбутак и Карагашты) с соответствующими максимальными относительными высотами сформировался в северной части, примыкающей к разлому, к которому приурочены долина р. Айтуарка и отрезок долины р. Урал. Максимальное превышение гряд с крутыми, часто осыпными, склонами в северных секторах балок, наряду с притоком воды из южных секторов, способствует усиленному накоплению влаги в днищах, формированию кустарниковых лугов и древесно-кустарниковых (с черной ольхой, ивой) зарослей на черноземах гидрометаморфизованных бескарбонатных (или карбонатных только на большой глубине).

Верхние сектора балок имеют меньшее расчленение и меньшие относительные высоты. Северный склон массива Актобе, спускающийся к удаленным от долины Урала, верховьям балок, расчленен наименее глубоко и характеризуется преобладанием пологих и покатых склонов, на которых могут формироваться относительно мощные (по меркам низкогорья) черноземы.

Помимо расчленения «первого порядка», сформировавшего крупные балки, в Айтуарской степи ярко проявляется тектоническое расчленение «второго» порядка,

сформировавшее крупные консеквентные балки второго порядка и боковые лощины, простирающиеся субширотно. Наиболее крупное субширотное разрывное нарушение представлено на междуречье балок Карагашты и Шинбутак, почти полностью перерезающее его, оставляющее лишь узкий крутосклонный водораздельный гребень. Как правило, субширотные разрывные нарушения «перекликаются», то есть приурочены примерно к одной полосе, на соседних междуречьях. Таким образом, можно говорить об ортогональной системе разрывных нарушений. Отрицательные микроформы рельефа третьего порядка (обычно субмеридионального простирания) приурочены к уже упоминавшимся субсеквентным (то есть ориентированным вдоль простирания пластов) понижениям между выходами на поверхность смежных субвертикально запрокинутых пластов. Консеквентные балки и лощины имеют, как правило, более крутые склоны и часто имеют четковидный характер. Субсеквентные лощины с противоположно направленным стоком часто отделяются друг от друга узкими седловинами.

Литолого-геоморфологический фактор дифференциации проявляется в неодинаковой устойчивости пластов осадочных пород, контрастах крутизны склонов и интенсивности экзогенных процессов. Особняком стоит днище балки Тышкак, где мелкосопочный рельеф сформирован вулканогенно-осадочными породами. На основной части территории в результате избирательной денудации днища балок часто соответствуют выходам пластов аргиллитов, а гряды — песчаников, конгломератов и известняков, хотя соответствие не является абсолютно строгим. Чередование пластов очень пестрое, что не позволяет проводить границы урочищ, ориентируясь на литологические границы. Даже в пределах узкого гребня шириной менее 10 м можно встретить несколько пластов.

Контрасты интенсивности экзогенных процессов и механического переноса вещества по склонам связаны не столько с литологическими различиями, сколько с контрастами структурных и аструктурных склонов. Отвесные склоны и генетически связанные с ними обвально-осыпные шлейфы могут формироваться как песчаниками, так и конгломератами (балки Шинбутак и Камысай) и известняками (балка Акбулак, междуречье Шинбутак – Карагашты). Интенсивность осыпных процессов контролируется глубиной эрозионно-тектонического расчленения. Лощины наиболее крутого падения и наиболее глубоко врезанные в поверхность склонов могут иметь «каменные реки» вдоль тальвега. При менее глубоком врезе тальвег склоновой лощины обычно занят кустарниковыми или ксеромезофитными степями или кустарниковыми лугами. В тесной связи с геоморфологическим фактором дифференциации находится фактор солярной экспозиции. Склоны южной экспозиции, в силу более интенсивного испарения, всегда отличаются меньшим проективным покрытием, большей щебнистостью, частым развитием осыпей и, следовательно, преобладанием петрофитных сообществ и слаборазвитых почв; чаще встречаются кустарники спирея и карагана.

В зависимости от уклонов, коррелирующей с ними мощности элювиально-делювиального мелкоземистого чехла, степени развития осыпных процессов и соответствующего проективного покрытия растительностью выстраивается следующий *литоморфный ряд развития квазикоренных геосистем степей* (по мере удаления от параметров коренных плакорных степей):

геосистемы очень слабой степени литоморфности

- ✓ разнотравно-типчаково-тонконогово-ковыльные с высоким проективным покрытием прибровочных частей плато и пологих приводораздельных склонов преимущественно на черноземах текстурно-карбонатных;

геосистемы слабой степени литоморфности

- ✓ петрофитноразнотравно-залесскоковыльно-типчаковые, иногда с повышенным обилием овсеца (*Helictotrichon desertorum*), со средним проективным покрытием вершин гребней и покатых склонов преимущественно на чернозёмах;

геосистемы средней степени литоморфности

- ✓ залесскоковыльно-шерстистогрудницево-петрофитноразнотравно-типчаковые с низким проективным покрытием крутых склонов, особенно южных экспозиций, с микроосыпями на черноземах или литоземах;

геосистемы сильной степени литоморфности

- ✓ инееватопырейно-петрофитноразнотравные с низким проективным покрытием очень крутых аструктурных осыпных склонов с крупными выходами пластов осадочных пород на литоземах;
- ✓ петрофитноразнотравные с очень низким проективным покрытием островершинных гребней с субвертикальным выходами пластов осадочных пород и остаточным накоплением щебня и крутых осыпных склонов на литоземах или элювии коренных пород.

Гидрологический фактор реализуется в характере накопления влаги (преимущественно талой весенней) и уровне грунтовых вод в зависимости от рельефа и направлений миграции их по наклонным пластам. Геосистемы с повышенным (по сравнению с коренными плакорными геосистемами) уровнем увлажнения формируются, главным образом, в трех позициях: а) в вогнутых позициях склонов на контакте подрезаемых склоном пластов; б) в эрозионно-тектонических формах (ложбинах, лощинах, распадках), рассекающих склоны гряд и периферии плато Актобе; в) в прирусловых врезах днищ балок. Степень увлажнения определяется морфометрическими характеристиками вогнутых форм рельефа: шириной, крутизной склонов, площадью водосбора, уклоном днища.

Гидроморфный ряд развития квазикоренных геосистем (по мере удаления от параметров коренных плакорных степей) выстраивается следующим образом:

геосистемы слабой степени гидроморфности

- ✓ типчаково-залесскоковыльно-степномятликовые степи со спиреей (*Spiraea crenata*) пологовогнутых верхних секторов водосборов лощин и ложбин на черноземах;
- ✓ ксеромезофитноразнотравно-ковыльные степи на черноземах верхних секторов покатосклонных лощин и ложбин;

геосистемы средней степени гидроморфности

- ✓ кустарниково-богаторазнотравные луга сильновогнутых крутосклонных секторов лощин, прирусловых врезов в днищах балок на черноземах гидрометаморфизованных;
- ✓ кустарниковые луга глубоковрезанных распадков и прирусловых врезов в днищах балок на черноземах гидрометаморфизованных;

геосистемы сильной степени гидроморфности

- ✓ черноольшанники таволгово-осоково-тростниковые и вторичные таволгово-осоково-тростниковые луга с ивой на месте чернольшанников расширенных плоскодонных прирусловых врезов балок на черноземах гидрометаморфизованных.

Фактор засоления почв проявляется на территории Айтуарской степи весьма локально. Солонцы встречаются в разнообразных геоморфологических позициях: у подножья гряд, в ложбинах, на межложбинных повышениях, сложенных красноцветным

элювием песчаников и брекчий. Основные массивы солонцов сосредоточены на изученной территории по левому борту днища балки Тышкак у пологосклонного подножия гряды, в краевой восточной части плато Актобе и в верхних пологих частях его приводораздельных склонов. Небольшие пятна солонцов встречены в районе седловины в перехваченных балкой Шинбутак верховьях балки Камысай. Галофитные ассоциации на солонцах обычно формируются в виде пятен диаметром 15–30 м среди ковыльно-типчаковых степей, обычно начальных звеньев литоморфного ряда.

Выделены две разновидности *геосистем галоморфного ряда* (по мере удаления от параметров коренных плакорных степей):

- ✓ разнотравно-шерстистогрудницево-типчаковые степи на черноземах солонцеватых бескарбонатных или солонцах;
- ✓ типчаково-грудницево-селитряннополынные с прутняком (*Kochia prostrata*) и кермеком (*Limonium gmelinii*) галофитные сообщества на солонцах.

На фациальном уровне определенную роль в ландшафтной дифференциации играет *биогенный фактор*, прежде всего роющая деятельность сурков. Их выбросы способствуют формированию разреженных литоморфных сообществ на небольших бугорках округлой формы в днищах балок. Вокруг сурчин характерна звездообразная сеть тропинок среди типчаково-ковыльной степи. Видимо, некоторое предпочтение в выборе мест для нор сурки оказывают небольшим гребням, сложенными наиболее легко выветриваемыми породами — глинистыми сланцами, что хорошо заметно по материалу выбросов.

Выделение местностей проведено с учетом горного характерна территории (рис. 19). В связи с этим мы считаем важным отразить не генетико-морфологическую конфигурацию подразделений ландшафта (это сделано ранее сотрудниками Института степи УрО РАН под руководством А.А. Чибилева и отражено в работе «Степной заповедник...., 1996»), а позиционно-динамическую (Швебс и др., 1986; Гродзинський, 2005). В этом случае границами местностей являются каркасные линии рельефа, ответственные за направление и интенсивность потоков вещества: гребни, подножья склонов, тальвеги. На карте местностей отражены различия пространственной структуры (рисунка) ландшафта. Они определяются рисунком палеозойских складчатых структур, степенью сохранности палеогеновых поверхностей выравнивания, интенсивностью неотектонического и современного эрозионного расчленения. Пространственная структура местностей характеризуется площадными соотношениями, ориентацией, соседством отдельных урочищ. Местности отличаются по соотношению зонального, литоморфного, гидроморфного и галоморфного рядов развития геосистем, а также по напряженности и направлению потоков вещества (прежде всего — механической и водной миграции), соотношению выноса и аккумуляции вещества. Сочетания урочищ внутри местностей и их пространственная структура описываются ниже.

Чешуйчато-решетчатая структура характерна для левого склона балки Сеновальной, правобережья балки Сарткарагашты, левобережья балки Шинбутак в среднем течении. Местности с чешуйчатой структурой соответствуют структурным склонам, которые сложены параллельными пластами, «выглядывающими» друг из-под друга, как чешуи, постепенно от подножья к гребню. Их срезанные вершины разделены расходящимися диагональными по отношению к линиям падения и простирания понижениями-ложбинами, занятыми ксеромезофитными вариантами степных сообществ. Ниже ложбины углубляются, становятся лощинами и поворачивают строго в

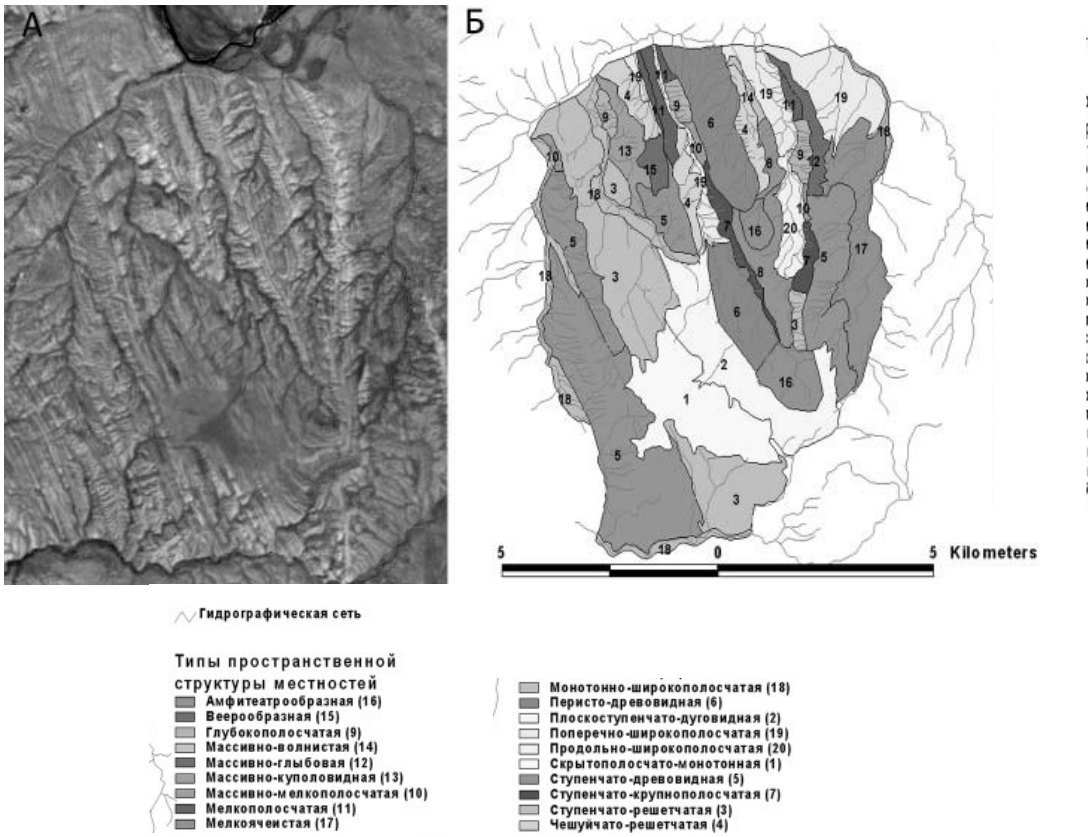

Рис. 19. Карта местностей Айтуарской степи в Оренбургской области (государственный заповедник «Оренбургский»).
А — космический снимок (Google Earth). Б — местности. Пояснения см. в тексте.

согласии с основным уклоном склона. Лощины в целом повторяют профиль склона, но степень концентрации влаги более высока, что способствует развитию богаторазнотравно-кустарниковых лугов на бескарбонатных сильнокаменистых черноземах. Склоновые поверхности, ограниченные двумя параллельными лощинами и расходящимися диагональными ложбинами, разделяющими «чешуи», имеют в плане обычно шлемовидную форму. Основные поверхности склонов имеют маломощный слой мелкозема, перекрывающий пласт песчаника, конгломерата или известняка. Маломощность почв определяет принадлежность геосистем к литоморфному ряду. Отклонения от зонального характера в нем определяются высокой каменистостью, в результате чего вместо ассоциаций ковыльной формации формируются ассоциации типчаковой формации с высокой долей петрофильного разнотравья (василек Маршалла *Centaurea marschalliana* и др.), грудницы шерстистой *Galatella villosa* (при большей крутизне) или овсеца *Helictotrichon desertorum* (при меньшей крутизне). В почвах слабы условия для выщелачивания, поэтому они почти везде карбонатны с поверхности.

Ступенчато-решетчатая структура характерна для балки Карагашты и примыкающих, особенно с запада, междуречий. Склон в результате выхода субвертикально запрокинутых пластов приобретает ступенчатый характер, но ступени не горизонтальны, а запрокинуты в обратную основному уклону сторону (подобно оползневым массивам). Поверхности ступеней, как правило, имеют пологий наклон. Это ярко проявляется на правом склоне балки Карагашты ниже ее поворота на север. Поперечные (по отношению к падению склона) лощины концентрируют влагу (преимущественно весеннюю), которая относительно медленно стекает вдоль лощины пока не дойдет до перпендикулярного распадка, рассекающего склон. По поперечным лощинам происходит постепенное нарастание увлажнения в гидроморфном ряду. Залесскоковыльно-степномятликовые степные ассоциации в верховьях водосборов сменяются вниз по течению богаторазнотравно-кустарниково-ковыльными с участием ястребинки ядовитой (*Hieracium virosum*), жабрицы (*Seseli libanotis*), горошка (*Vicia cracca*), миндаля (*Amygdalus nana*), вишни (*Cerasus fruticosa*), а затем закустаренными лугами с караганой (*Caragana*), вишней, жимолостью, шиповником (*Rosa majalis*) и др. Таким образом, для таких склонов характерна резкая смена направления стока под прямым или почти прямым углом от субсеквентных к консеквентным участкам. В субсеквентных лощинах создаются условия для накопления делювиального мелкозема. Субсеквентные лощины с противоположно направленным стоком соседствуют через покатоклонные или пологосклонные седловины, характерные для данной группы местностей. В консеквентных глубоковрезанных крутосклонных лощинах лучше условия для промывания, выщелачивания оснований, выноса мелкозема и остаточного накопления грубообломочного материала, в результате чего почвы становятся сильнокаменистыми и бескарбонатными.

Для групп местностей с чешуйчато-решетчатой и ступенчато-решетчатой структурой характерно преобладание геосистем начальных звеньев литоморфного ряда (без преобладания в почвенном покрове литоземов) при значительном участии начальных звеньев гидроморфного ряда (не доходящих до формирования осоково-тростниковых ассоциаций на черноземах гидрометаморфизованных). Напряженность латеральных потоков переноса вещества можно оценить как среднюю в силу наличия механизмов их торможения и частичной нейтрализации в субсеквентных лощинах.

Мелкополосчатая структура аструктурных и структурных крутых склонов с сочетанием узких гребней и лощин встречается на правом склоне балки Сеновальной, левом склоне балки Шинбутак в нижнем течении. Здесь резко преобладают геосистемы конечных звеньев литоморфного ряда с преобладанием литоземов и крайне маломощных черноземов (по существу — петроземов темногумусовых, согласно новой Классификации почв России). Причиной является очень высокая напряженность механической и водной миграции, быстро удаляющих мелкоземистые продукты выветривания. Основным агентом формирования пространственной структуры является мелкая трещиноватость, создающая сеть близкорасположенных неглубоковрезанных лощин с продольным профилем, в целом повторяющим профиль склона. Практически отсутствуют ровные участки склонов: присутствуют только гребни и лощины. Глубина врезов, однако, неравномерна, что отражает пересечение лощинами пластов разной устойчивости. Как правило, в водосборном и в нижнем секторах глубина вреза больше, чем в среднем. В результате сверху вниз разнотравно-кустарниковые сообщества сменяются ксеромезофитными разнотравно-ковыльными степями, а потом опять разно-

травно-кустарниковыми. Возможны несколько перегибов продольного профиля лощин с соответствующим чередованием сообществ большей и меньшей гидроморфности.

Глубокополосчатая структура является разновидностью полосчатой с более глубоким расчленением, чем при мелкополосчатой. Она связана с крутыми и очень крутыми аструктурными склонами. Местности с глубокополосчатой структурой встречаются в наиболее глубокорасчлененном северном секторе Айтуарской степи по правым склонам балок Карагашты, Шинбутак, Камысай на участках с максимальным превышением водоразделов над тальвегами балок, что позволяет водным и механическим потокам развивать наибольшую интенсивность. Склонами подсекаются пласты песчаников, известняков и конгломератов с падением на северо-восток. Склоны представляют собой чередование крутосклонных островершинных гребней и глубоковрезанных лощин. Абсолютно преобладают крайние звенья литоморфного ряда с господством петрофитно-разнотравных ассоциаций, ассоциаций с пыреем инееватым, а также типчаково-грудницевых ассоциаций. В силу постоянного сноса мелкозема и широкого развития осыпных процессов преобладают литоземы. Поперек склона многочисленны выходы пластов осадочных пород, создающие микроступенчатость и обилие фаций практически лишенные почв и покрытые разреженными петрофитными группировками.

Массивно-мелкополосчатая структура аструктурных обвально-осыпных склонов характеризуется менее глубоким расчленением, чем глубокополосчатая. Выражена в среднем течении балок Шинбутак и Камысай по правому борту. Высокие обрывы, сложенные когломератами, являются поставщиками коллювия для примыкающих снизу шлейфов, которые полностью или почти полностью маскируют выходы пластов других пород и рассекающие их лощины. В результате скальные обнажения верхних частей склонов сочетаются с мезофитно-разнотравно-кустарниковыми или разнотравно-овсецово-грудницево-типчаковыми ассоциациями, представляющими собой разные звенья литоморфного ряда. Повышенная каменистость коллювиальных шлейфов, насыщенных как мелкообломочным, так и грубообломочным материалом, создает относительно благоприятные условия для сохранения влаги и широкого присутствия мезофитов. Напряженность латеральных потоков в этой группе местностей максимальная, причем с резким преобладанием механической миграции над водной. Высокая каменистость способствует просачиванию влаги в коллювиальные шлейфы и слабому развитию поверхностного стока и, соответственно, эрозионных форм. Возможно, низкое влагосодержание в поверхностных слоях сильнокаменистых черноземных почв препятствует сплошному промерзанию и способствует фильтрации талых вод. Коллювиальный шлейф под обрывом конгломератов в балке Камысай более увлажнен, чем подобный шлейф в балке Шинбутак, что выражается в гораздо большей закустаренности и большей доле мезофитного разнотравья.

Ступенчато-крупнополосчатая структура формируется в пределах аструктурных склонов с резко выраженными выходами пластов осадочных пород, образующих крупные ступени. Такая структура встречается в верхней части балки Камысай по правому борту. Выходы пластов разделены глубоковрезанными широкими извилистыми распадками. Изгибы распадков и лощин объясняются пересечением участков пластов с разной устойчивостью и чередованием субсеквентных (в основном в верховьях) и консеквентных отрезков. Глубокие крутосклонные распадки и лощины хорошо концентрируют сток, крутые склоны создают дополнительное затенение, снижающее испарение. Поэтому в днищах и на склонах северной экспозиции широко распространены раз-

нотравно-кустарниковые степи и кустарниковые луга на черноземах бескарбонатных при сокращенной доле начальных звеньев гидроморфного ряда (залесскоковыльно-степномятликовых и ксеромезофитно-залесскоковыльных степей). Склоны распадков и лощин южной экспозиции отличаются малой долей кустарников и преобладанием залесскоковыльно-шерстистогрудницево-типчаковых сообществ, принадлежащих к литоморфному ряду геосистем. Начальные звенья литоморфного ряда — ковыльно-овсецово-типчаковые степи господствуют на основной поверхности склонов. На вогнутых перегибах склонов выше каждой ступени формируются геосистемы начальных звеньев гидроморфного ряда с повышенным участием ковыля, мезофитного разнотравья, кустарников (прежде всего миндаля и вишни). Это создает своеобразную поперечную полосчатость склона, на котором выпуклые и вогнутые участки различаются по соотношению мезофитного разнотравья, кустарников и плотнодерновинных злаков. Соответственно, резко визуально различаются аспекты сообществ. Напряженность латеральных потоков оценивается как средняя, благодаря тормозящей роли ступеней, в пределах основной поверхности склонов и высокая в пределах распадков.

Ступенчато-древовидная структура широко распространена по структурным левым склонам балки Тышкак, междуречью Алимбет – Акбулак, склонам междуречья Карагашты – Акбулак, обращенным к балке Акбулак. Ступени выражены менее резко, по сравнению с местностями ступенчато-крупнополосчатой структуры. Тем не менее, склоны имеют, хотя и более мягкие, но все же ступенчатые очертания. В пределах основной поверхности склонов водопроницаемость пластов песчаников и известняков понижена, что, видимо, способствует росту размывающей силы водных потоков и формированию достаточно густой сети неглубоких ложбин и лощин, сливающихся в глубокие распадки.

Рисунок гидрографической сети частично определяется ортогональной системой разрывных нарушений вдоль и поперек простирания пластов, однако достаточно велик вклад самоорганизации стока. Это проявляется в многократных изгибах лощин и их древовидном характере, что отличает эту группу местностей от местностей со ступенчато-решетчатой структурой, где гидрографическая сеть строго контролируется геологическими структурами. Характерно, что начало лощин и ложбин может быть приурочено к разным высотным уровням склона, то есть в пределах нескольких уровней ступеней. В лощинах формируется полный ряд гидроморфных геосистем, причем степень гидроморфности увеличивается не монотонно от водосборов к устьям. Как правило, наиболее гидроморфные геосистемы с таволгово-осоково-тростниковыми лугами и черноольшанниками влажнотравными на черноземах гидрометаморфизированных соответствуют отрезкам с выполаживанием продольного профиля на контакте крутых склонов с пологонаклонной днищем балки Тышкак. Особенно это типично для расширений у слияния распадков под острым углом, где особенно высока концентрация стока и есть предпосылки ее застоя.

Массивно-глыбовая структура с редким расчленением глубокими широкими распадками представлена на левом структурном склоне балки Тышкак (междуречье Тышкак – Камысай) в ее нижней части. Характерны массивные слаборасчлененные склоны, поверхности которых совпадают с поверхностью пластов, и покатосклонные широкие лощины с воронкообразным водосборным понижением, иногда с резким каньонообразным сужением в приустьевой части (в случае пересечения обнажающихся пластов известняков). Склоны выполаживаются к подножью. Некоторые распадки

представляют собой короткие амфитеатрообразные понижения с покатыми склонами. Количество ложбин, осложняющих основные поверхности склонов, невелико, и они гораздо менее глубокие, чем в местности со ступенчато-древовидной структурой, примыкающей с севера. Растительный покров отличается пониженной долей сообществ гидроморфного ряда, которые приурочены к узким тальвегам распадков. Абсолютно преобладают ковыльно-овсецово-типчаковые ассоциации, то есть начальные звенья литоморфного ряда, формирующиеся при относительно мощном (за исключением прибровочных позиций в привершинной части) элюво-делювии песчаников и конгломератов. Мощность элюво-делювия заметно возрастает к подножью склонов, где он переходит в широкие шлейфы, наложенные на коренное днище балки Тышкак. Сток четко сконцентрирован в немногочисленных, но крупных эрозионно-тектонических формах. Вероятно, существует соответствие между объемами отрицательных форм рельефа полуворонковидной в верховьях распадков и слившихся друг с другом у подножья склонов пролювиальных конусов. Размеры конусов очень велики, по сравнению с более южным сектором склона балки Тышкак; эрозионные врезы в пределах конусов выражены слабее в силу меньших относительных высот и скоростей временных водотоков. Часто склоновые лощины не имеют связи с основным руслом балки, как бы утопая в рыхлых отложениях или не имея достаточной энергии для прорезания пластов коренных пород в днище балки.

Амфитеатрообразная структура в местах замыкания складок представляет наиболее редкий и своеобразный тип. Он выражен в совмещенных, в силу перехвата стока верховьях балок Камысай и Шинбутак, а также к центральному сектору междуречья Камысай-Шинбутак, где расположен водосбор крупнейшего левого бокового распадка балки Камысай. Место перехвата стока балкой Шинбутак отделено от верховьев балки Камысай узкими пологосклонной седловиной высотой в несколько метров с петрофитно-степными и галофитными сообществами.

К оси складки приурочено резко обозначенное понижение в рельефе, ограниченное округлой в плане системой крутых склонов с концентрической системой эрозионных форм, соединяющихся в днище. Потоки вещества не развивают больших скоростей из-за малых превышений, а в днище понижения создаются условия для застойных режимов с признаками оглеения в почвах в виде оливковой и серо-стальной окраски подгумусовых горизонтов. Концентрация влаги в днище понижения в верховьях балки Шинбутак способствует формированию таволгово-осоково-тростниковых, кустарниково-богаторазнотравно-пырейных с кровохлебкой (*Sanguisorba officinalis*) лугов на черноземах гидрометаморфизированных. Луговые полосы разделены низкими плосковершинными гребнями по выходам пластов аргиллитов и песчаников. Поверхность гребней занята геосистемами литоморфного и галоморфного рядов. Последние проявляются в виде солонцов с типчаково-австрийскополынно-шерстистогрудницевыми сообществами. Местами солонцы формируются в прибровочных выпуклых позициях склонов, окружающих понижение. Амфитеатрообразное понижение в верховьях бокового распадка балки Камысай более дренировано. Поэтому крайние звенья гидроморфного ряда (такие как осоково-тростниковые луга) отсутствуют. Представлены залесскоковыльно-степномятликовые и ксеромезофитно-разнотравные степи, по тальвегам с зарослями миндаля и вишни.

Мелкоячеистая структура свойственна местности в днище балки Тышкак, густо расчлененной неглубокими лощинами в местах выходов вулканогенно-осадочных

пород. Небольшие сопки высотой 10–15 м (по левобережью балки) с многочисленными выходами на поверхность вулканогенно-осадочных пород создают крайне пеструю фациальную структуру с преобладанием литоморфных вариантов степей. На вершинах сопок почти нет условий для формирования почв, поверхность сильно защебнена, господствуют типчаково-петрофитно-разнотравные сообщества с высоким обилием типчака, эфедры, мордовника русского, грудницы шерстистой, полыни австрийской, бурачка извилистого. На склонах в зависимости от мощности почвы могут преобладать либо тонконогово-типчаковые, либо ковыльно-типчаково-овсецовые (начальные звенья литоморфного ряда), либо ковыльно-миндально-карагановые кустарниковые степи. Важное отличие геосистем вулканогенно-осадочных сопок от местностей на осадочных породах заключается в бескарбонатности почв даже в самых петрофитных местообитаниях (в которых на остальной территории Айтуарской степи почвы карбонатны с поверхности). У подножий сопок и в водосборах преобладание переходит к геосистемам начальных звеньев гидроморфного ряда: ковыльно-мятликовым степям, по мере увеличения вогнутости лощин — к ксеромезофитно-разнотравно-ковыльным степям, затем к густым кустарниковым зарослям. Напряженность латеральных потоков в этой местности очень мала в силу малых амплитуд высот, потоки разнонаправленные.

Перисто-древовидная структура связана со структурными склонами балок, обращенными к оси асимметричной синклинальной складки. Перистый рисунок создается глубоким расчленением дугообразно или коленчатообразно изогнутыми распадками по левому покатому склону балки Сарткарагашты. Похожая структура, но с меньшим перепадом высот и меньшим расчленением представлена в верховьях балки Шинбутак ниже места перехвата ей стока у балки Камысай. В силу асимметричности балок по разные стороны от русла формируются разные пространственные структуры. Левобережье расчленено эрозионно-тектоническими формами, которые меняют направление либо один раз (балка Сарткарагашты), либо несколько (притоки балки Шинбутак) в зависимости от приуроченности либо к продольным понижением между параллельными пластами, либо к консеквентным участкам. Пологое падение пластов способствует слабой фильтрации влаги и формированию разветвленной сети извилистых ложбин. На основных пологих поверхностях склонов господствуют коренные разнотравно-типчаково-ковыльные геосистемы и геосистемы начальных звеньев литоморфного ряда (ковыльно-овсецово-типчаковые и типчаково-тонконогово-ковыльные степи). Геосистемы субгмидроморфного ряда с ксеромезофитными и кустарниковыми степями и кустарниковыми лугами представлены широко вдоль тальвегов и по теневым склонам.

Массивно-куполовидная структура встречается в центральной части Айтуарской степи в районе массива Жуванаадыр, резко воздымающегося над балкой Карагашты и двумя балками второго порядка — ее правыми ответвлениями. Местность разделена на несколько секторов глубокими лощинами и малыми балками, образующими ортогональную сеть явно неотектонической природы.

Склоны, обращенные к лощинам и балкам, расчленены слабее, чем в других местностях. Однако крутизна, и большие относительные высоты (до 100–110 м) обусловливают высокую интенсивность латерального переноса вещества. Характерны массивные округлые вершины, соединяющиеся друг с другом округловершинными гребнями и седловинами, крутые ровные аструктурные склоны, повышенная доля геосистем литоморфного ряда. На склонах большие площади занимают осыпи, по краям которых

развиваются заросли спиреи. Выходы пластов песчаников и конгломератов на склонах западных и юго-западных экспозиций, образуют чередование микрогребней, вытянутых вниз по склону, и вогнутых поверхностей с петрофитными степями.

Гидроморфные геосистемы (ксеромезофитные и кустарниковые степи) развиваются в лощинах, в которых присутствуют также и литоморфные, в том числе каменистые россыпи в тальвегах. Крайние звенья литоморфного ряда представлены в привершинной части массива Жуванаадыр, где значительную площадь занимают почти отвесные выходы известняков.

Веерообразная структура сформировалась у дугообразного водораздела балок Шинбутак, Сеновальная и Карагашты при пересечении субширотным разломом с балкой второго порядка серии отпрепарированных субмеридиональных пластов осадочных пород. В результате мелкого дробления образовался веер лощин, начинающихся у водоразделов и сходящихся к днищу малой балки, рассекающей местность массива Жуванаадыр. Между лощинами многочисленны невысокие сопки, сложенные песчаниками, известняками и конгломератами, которые разделены седловинами. Поверхность сопок имеет полосчатый характер из-за частого чередования пластов разного литологического состава, простирающихся в субмеридиональном направлении. Залегание пластов местами осложнено мелкими синклинальными и антиклинальными складками. В пределах местности одни лощины относятся к субсеквентному типу, другие — к консеквентному, а в третьих представлены участки обоих типов. В лощинах представлены ксеромезофитные и кустарниковые степи, причем при пересечении лощинами пластов известняков увлажнение снижается, что проявляется в уменьшении обилия кустарников (жимолости, миндаля, спиреи, вишни) и замещении их злаками: ковылем (*Stipa zalesskii*), мятликом (*Poa transbaicalica*), пыреем (*Elytrigia repens*). На склонах и вершинах сопок и в приводораздельной части господствуют геосистемы литоморфного ряда, в том числе крайних звеньев, с низким проективным покрытием (15–30%), высоким обилием грудницы (*Galatella villosa*), полыней (*Artemisia austriaca*), василька казахского (*Centaurea kazakorum*) и Маршалла (*Centaurea marschalliana*), мордовника русского (*Echinops ruthenicus*), чабреца Маршалла (*Thymus marschallianus*), эфедры (*Ephedra distachya*) на карбонатных литоземах или очень маломощных поверхностно-карбонатных черноземах.

Скрытополосчато-монотонная структура представлена в западной части плато Актобе — реликта эоценовой поверхности выравнивания, которое по краям подвергается эрозионному расчленению. Абсолютно преобладают автономные геосистемы с практически полным отсутствием латеральных потоков вещества. Сквозь почти плоскую поверхность плато «просвечивают» линейные структуры, обусловленные чередованием субвертикально запрокинутых пластов песчаников, конгломератов и известняков. Выходы пластов в основном «утопают» в элювии. Тем не менее на фоне доминирующих коренных геосистем плакорных степей-«ровнядей» с разнотравно-типчаково-ковыльными сообществами на карбонатных среднемощных черноземах проявляются узкие субмеридиональные полосы начальных звеньев литоморфного (тонконогово-типчаково-ковыльные степи по повышениям) и гидроморфного (ковыльно-мятликовые и кустарниково-ксеромезофитно-ковыльные степи по понижениям) рядов геосистем. Северная и южная границы структур данного типа проводятся по началу выходов на поверхность из-под элювия пластов пород, которые формируют грядово-лощинный рельеф с резким сокращением доли автономных геосистем и преобладанию трансэлю-

виальных. Слабая концентрация весеннего стока возможна только в краевых частях местности.

Плоскоступенчато-дуговидная структура сформировалась в восточной части плато Актобе, где оно приобретает явно ступенчатый характер и более четкий рисунок субвертикальных пластов осадочных пород. В отличие от других местностей со ступенчатостью, поверхности ступеней практически плоские и имеют дугообразное простирание. Это обусловлено положением в области южного замыкания складок, которые протягиваются далее на север и формируют борта балок Тышкак, Камысай и Шинбутак. Поверхности ступеней постепенно понижаются в северном направлении и разделены короткими пологими склонами, по которым возможен весенний поверхностный сток по промерзшей почве. Поверхности сложены в основном пластами известняковых брекчий и конгломератов. Почвы часто выщелочены от карбонатов. Здесь распространены коренные степные геосистемы с разнотравно-типчаково-ковыльными степями на маломощных черноземах, но с некоторыми проявлениями литоморфности, в частности с повышенным обилием тонконога, овсеца, грудницы, полыней. Кустарники встречаются редко. Однако характерную особенность представляет также субдоминантная роль галоморфных геосистем с грудницево-селитряннополынно-типчаковыми сообществами на солонцах. Они распространены многочисленными пятнами в центральной и прибровочной частях местности. Геосистемы гидроморфного ряда практически отсутствуют.

Массивно-волнистая структура представлена на левом борте балки Камысай в нижнем секторе. Она соответствует аструктурному склону с небольшими относительными высотами до 50 м. Небольшая амплитуда высот не создает условий для интенсивного развития эрозии, поэтому расчленение склона очень слабое в виде неглубоких ложбин, создающих волнистую поверхность наподобие «стиральной доски». Степень петрофитности невелика, в основном представлены начальные звенья литоморфного ряда — ковыльно-овсецово-типчаковые степи на выпуклых в поперечном профиле участках. Они чередуются с кустарниково-ксеромезофитно-ковыльными степями в ложбинах.

Поперечно-широкополосчатая структура свойственна для днищ балок Шинбутак, Сеновальная и нижнего сектора балок Камысай и Тышкак. Изначально плоское днище осложнено пролювиально-делювиальными пологими шлейфами, спускающимися с обоих склонов и нижними секторами лощин. Невысокая интенсивность латеральных потоков позволяет здесь развиваться черноземам с повышенной мощностью профиля. В травостое преобладают караганово-типчаково-ковыльные и полынно-ковыльно-типчаковые степи. Удобный для обработки рельеф в прошлом благоприятствовал сельскохозяйственной деятельности, наследие которой обнаруживается в присутствии житняка и пырея ползучего в составе типчаково-ковыльных степей балки Карагашты и нижней части балки Тышкак. Особенностью последней является наличие солонцов с типчаково-селитряннополынно-грудницевыми сообществами, которые могут быть приурочены к разным позициям в микрорельефе: днищам слабовогнутых ложбин, поверхностям пологосклонных гребней, пологим основным поверхностям.

Продольно-широкополосчатая структура ярко выражена в среднем секторе днища балки Камысай. Балка представляет собой, видимо, инверсионную структуру, заложившуюся по оси антиклинальной складки. Особенностью местности является наличие серии невысоких (3–10 м высотой), вытянутых вдоль основного русла и почти

параллельных ему русел притоков плосковершинных или округловершинных гряд, соответствующих отпрепарированным эрозией выходам пластов песчаников, конгломератов, известняков или аргиллитовв. В силу маломощности почв и элювия на вершинах гряд доминируют геосистемы начальных звеньев литоморфного ряда: овсецово-разнотравно-типчаково-ковыльные или разнотравно-ковыльно-типчаковые степи на очень маломощных поверхностно-карбонатных сильнокаменистых черноземах. На склонах гряд и в прируслoвых понижениях обычно господствуют кустарниковые луга из вишни, миндаля, жимолости, караганы. В расширенных секторах днищ встречаются осоково-тростниковые луга с ивняками. Местность данной группы отличается примерно равной долей гидроморфных и литоморфных геосистем при низкой доле коренных степных геосистем.

Монотонно-широкополосчатая структура характерна для широких днищ балок Карагашты и Акбулак. В днище встречаются как почти плоские террасовидные поверхности по пластам коренных пород, так и широкие пологосклонные пролювиальные шлейфы с геосистемами коренного ряда – разнотравно-типчаково-ковыльными степями, иногда с примесью мятлика, овсеца или житняка, на черноземах поверхностно-карбонатных. Шлейфы разделены поперечными лощинами. Многие из лощин, выходя из склоновых местностей в днище балки, очень слабо выражены в рельефе. Прируслoвые понижения основных водотоков балок обычно широкие, ограничены хорошо выраженными подрезанными склонами пролювиальных шлейфов. В них наиболее ярко в Айтуарской степи ярко выражены гидроморфные геосистемы. В наиболее широких секторах прируслoвых понижений, прежде всего вблизи устьев балок второго порядка, развиваются кровохлебково-таволгово-осоково-тростниковые с ивняками луга или черноольшанники таволгово-тростниковые на лугово-черноземных почвах. В более узких присклоновых секторах прируслoвых понижений преобладают богаторазнотравно-кустарниковые луга с доминированием миндаля, спиреи, жимолости, вейника, солонечника, осоково-вейниковые или кострецово-вейниковые луга. В пространственной структуре местности данной группы коренные степные геосистемы заметно преобладают над гидроморфными.

3.2. Методы

3.2.1. Полевые описания

Полевые описания проводились в типичных фациях подурочища или простого урочища при максимально полном охвате урочищ, распространенных на территории исследования. Описанная фация считалась носителем общих свойств урочища, которые составляют «рамочные условия» для всех составляющих его фаций. Кроме того каждое полевое описание считалось носителем общих свойств содержащей ее операционной территориальной единицы (ОТЕ), границы которой определялись как границы соответствующего пиксела цифровой модели рельефа.

Основным методом на полевом этапе был метод комплексных описаний. Точки выбирались таким образом, чтобы описания равномерно охватывали разные местоположения, разные формы рельефа, уровень исследований — урочищный. На наиболее подробно изученном полигоне «Заячья», а также расположенных внутри него полигонах «Козловка» и «Становская балка» расположение точек близко к регулярному.

При описании рельефа фиксировались: генетический тип, принадлежность к формам мезорельефа и микрорельефа, характер нанорельефа, уклон в градусах, солярная экспозиция. Описание растительности проводилось в лесных ландшафтах на площадке размером 20х20 м, в степном — 10х10 м. Почвенный разрез закладывался в центре площадки в межкроновом пространстве. При описании древостоя фиксировались следующие характеристики: формула древостоя для каждого яруса, средняя высота ярусов, средний и максимальный диаметр, сумма площадей сечений в $м^2$/га (с помощью реласкопа Биттерлиха), возраст (с помощью приростного бура Пресслера), сомкнутость крон. Обилие каждого вида подроста описывалось по четырехбалльной шкале. При описании кустарникового яруса фиксировалось обилие каждого вида в баллах по четырехбалльной шкале, аналогичной описанию подроста. При описании кустарничкового и травянистого ярусов обилие видов оценивалось по шкале Друде. Для травостоя отмечалось общее проективное покрытие, высота по ярусам, количество ярусов. При описании мохово-лишайникового яруса отмечалось проективное покрытие в сумме и для каждой экологической группы видов: сфагновые мхи, долгие мхи (кукушкин лен), зеленые мхи (плевроциум, гилокомиум, дикранум и др.), лишайники. При описании почв фиксировались: тип и подтип почв, мощность каждого горизонта, влажность, структура, механический состав и цвет по шкале Манселла через каждые 5 см, фиксировались (при наличии) глубина признаков оглеения, глубина вскипания мелкозема и каменистых включений от HCl 10%, щебнистость и (для Обского полигона) положение кровли сезонной мерзлоты. Средняя глубина шурфа составляла около 90–100 см. При проявлении грунтовых вод или верховодки фиксировались глубина их залегания.

По результатам первичных описаний почв и растительного покрова фиксировалась принадлежность к гигротопу (от сухого до мокрого по стандартным признакам), богатство местообитания по преобладанию той или иной эколого-ценотической группы травостоя (боровая, бореальная, неморальная, нитрофильная, гигрофильная).

В результате количество показателей варьировало для разных полигонов от 170 до 280 (в зависимости от встреченного числа видов растений). В дальнейший расчет используемых для анализа межкомпонентных связей интегральных переменных не включались данные обилия видов трав, встреченных на 1–3 точках.

3.2.2. Подготовка полевых данных и цифровых моделей рельефа к анализу

Для корректности статистических расчетов необходимо соблюдать требование приближения анализируемых данных к нормальному распределению, что потребовало преобразования исходных данных средствами метода многомерного шкалирования и дополнительных операций с матрицами (Пузаченко, 2004). Первая задача анализа первичных данных формулировалась следующим образом: рассчитать значения осей дифференциации компонентов, интерпретировать их физическое содержание как мер проявления экологического фактора и ранжировать по значимости. Для этого необходимо снизить размерность массива данных и выявить группы согласованно меняющихся в пространстве свойств. Вместо большого количества исходных переменных (например, более сотни видов растений) получается небольшое количество интегральных переменных (параметров порядка), каждая из которых описывает со-

гласованное поведение сразу многих исходных переменных под действие какого-либо фактора. При этом небольшое количество интегральных переменных описывает большую часть вариабельности исходных переменных. Факторный анализ (метод главных компонент) обычно дает искаженные результаты при сильном отклонении от нормальности, которое почти всегда бывает с почвенными и растительными данными. По этой причине в расчет включаются таблицы непараметрических корреляций. Как правило, даже если полученные интегральные переменные не подчиняются нормальному распределению, асимметрия и эксцесс намного ближе к 0, чем факторы, полученные методом главных компонент. Опишем алгоритм решения задачи средствами программы Statistica 7.0.

1. Создается таблица непараметрических корреляций Gamma между переменными (выбор коэффициента обусловлен большим количеством смысловых нулей – отсутствие горизонта, отсутствие вида и т.д. на точке).
2. Таблица непараметрических корреляций пересчитывается в таблицу дистанций (dissimilarities) между переменными по формуле d=1–r, где d — дистанция, r — коэффициент корреляции Gamma.
3. Полученная таблица дистанций переводится в формат матрицы путем добавления дополнительных строк и цифровых кодов для обеспечения совместимости с требованиями модуля многомерного шкалирования программы Statistica.
4. Файл-матрица открывается в модуле многомерного шкалирования (Multidimensional Scaling).
5. Задается количество осей: максимум 9, но не больше, чем n–1, где n — количество переменных. Задается конфигурация Standard G-L.
6. Рассчитывается стресс. По Ю.Г.Пузаченко (2004), оптимальная размерность определяется построением нелинейной функции стресса от количества осей.
7. После завершения расчета нужного количества осей сохраняется таблица Final Configuration. Она содержит меры чувствительности каждой исходной переменной к взаимонезависимым осям дифференциации компонента, которы отражают влияния отдельных экологических факторов и процессов — влажности, трофности, выщелачивания и т.п.). Мера чувствительности переменной к данному фактору дается с учетом знака +/– (положительная или отрицательная корреляция аналогично факторам метода главных компонент). Интерпретация первых трех–пяти осей в большинстве случаев очевидна по противопоставлению переменных, имеющих максимальные по модулю, но разные по знаку коэффициенты (рис. 5). Например, если максимальные положительные значения у ели и осины, а максимальные отрицательные — у сосны и березы, то это с высокой вероятностью фактор трофности местообитания. Если обилия березы и осины противопоставляются обилию ели и пихты — то это с высокой вероятностью фактор стадии восстановительной сукцессии и т.д. Файл конфигурации сохраняется в формате dbf для последующего расчета в программе FRACDIM в качестве «таблицы коэффициентов».
8. Создается таблица со значениями исследуемых переменных (например, мощностей горизонтов) в каждой точке. Проводится ранжирование переменных в процентах от максимального значения. Таблица сохраняется для последующего расчета в программе FRACDIM как «таблица точек»
9. В программе FRACDIM (автор Г.М. Алещенко; на раннем этапе в разработку идеологии и набора опций продукта основной вклад внес Ю.Г. Пузаченко) в модуле LINDBF

открываются таблица коэффициентов и таблица точек и определяются координаты положения точек на осях экологических факторов на основе решения системы уравнений:

$$y_i^j = a_{1i}x_1^j + a_{2i}x_2^j + a_{3i}x_3^j + a_{4i}x_4^j \quad ,$$

где y_i^j — известное значение переменной i в точке (элементе) j , $a_{1i}...a_{4i}$ — значение коэффициента чувствительности переменной i при координате 1 или 2 или 3 или 4, определенное в результате решения задачи многомерного шкалирования на предыдущем шаге анализа, $x_1^j...x_4^j$ — искомое значение координаты 1 или 2 или 3 или 4 для точки j (Пузаченко, 2004).

10. Полученная таблица значений осей объединяется для дальнейшего анализа межкомпонентных связей с данными, характеризующими рельеф окрестностей, то есть серии гипотетических вмещающих геосистем.

Цифровые модели рельефа составлены на основе топографических карт масштаба 1 : 200 000 (для Архангельского и Кологривского полигонов также 1 : 50 000, для участков «Становская балка» и «Козловка» Архангельского полигона также — 1 : 10 000) методом триангуляции с последующим переводом в формат грид темы средствами модуля Spatial Analyst ГИС ArcView 3.2a. В том же модуле оцифрована гидрографическая сеть (тальвеги постоянных и времнных водотоков); полученная векторная тема переведена в формат грид-темы с параметрами, аналогичными грид-темам для рельефа. Основная обработка данных о морфометрических свойствах рельефа проведена для размера ОТЕ со стороной 400 м, что позволяет абстрагироваться от форм микрорельефа и примерно сопоставлять размер ОТЕ с размером ПТК ранга урочища или подурочища. Отметим, что при этом ОТЕ не отождествляется с урочищем или подурочищем. Для трех модельных участков на Архангельском полигоне («Козловка», «Становская балка», «Медвежий»), где ставилась задача сопоставления эффектов разных иерархических уровней вплоть до фациального, были составлены цифровые модели рельефа с разрешением 10 и 30 м на основе топографической карты масштаба 1 : 10 000 (Мерекалова, 2006; Хорошев и др., 2008, 2013а). Для степных модельных участков в Оренбургской области были также использованы данные цифровой модели рельефа SRTM с разрешением 90 м. Следует заметить, что для лесных ландшафтов остальных полигонов модели SRTM категорически не годятся для целей данного исследования. Показывая поверхность, от которой отражаются солнечные лучи, SRTM в лесных районах сильно искажают абсолютные высоты, где перепад высот древостоя между вырубленными лесными участками разных сукцессионных стадий достигает 30 м. Такие искусственные перепады высот сопоставимы с размерами мезоформ рельефа, поэтому будут создавать иллюзию несуществующего расчленения рельефа. Автор на ранних этапах исследования предпринимал попытки работать с SRTM-моделями, но пришел к выводу о невозможности их использовать в частично обезлесенных районах для исследования ландшафтных связей урочищного уровня, т.е. уровня, сопоставимого с мезоформами рельефа.

Полученные файлы, содержащие сведения об абсолютных высотах каждого пиксела и наличии или отсутствии в нем тальвега после экспорта грид-темы в формат asc и последующего перевода в формат dbf объединялись средствами пакета программ FRACDIM. В специальном модуле FRACDIM для расчета морфометрических показателей рельефа в скользящем квадрате с присвоением значения центральному пикселу

рассчитаны в квадратах с размерами 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 пикселов:

1. вертикальная расчлененность рельефа как стандартное отклонение высот;
2. горизонтальная расчлененность рельефа как сумма длин тальвегов;
3. вертикальная кривизна;
4. горизонтальная кривизна.

Эти показатели использованы как характеристики свойств рельефа геосистемы, вмещающей операционную территориальную единицу (ОТЕ) и описанную в полевых условиях ее типичную фацию.

Классификация пикселов по свойствам рельефа каждой окрестности осуществлялась в модуле кластеризации FRACDIM методом к-средних, позволяющем задавать нужное количество классов.

Программа FRACDIM использовалась также для расчета факторов дифференциации растительного покрова методом главных компонент на основе данных многоканальной космической съемки Landsat 7 и последующей классификации растительного покрова методом к-средних. Классификация использовалась для ландшафтного картографирования. Значения факторов дифференциации растительного покрова после объединения с файлом данных полевых исследований и характеристик рельефа использовались для анализа связей между растительным покровом и геоморфологическими характеристиками (раздел 4.6.2).

Визуализация полученных показателей, а также результатов классификаций рельефа, расчета вероятности принадлежности ОТЕ тому или иному классу осуществлялась обратным преобразованием файла dbf в формат asc в программе FRACDIM и экспортом в формат грид-темы ГИС ArcView 3.2a. Файл со стандартизованными значениями морфометрических показателей рельефа после исключения пикселов, не содержащих точки наблюдения, объединялся с файлом данных полевых измерений свойств почвообразующих отложений, почв, растительного покрова для дальнейшего анализа межкомпонентных связей в программе Statistica 7.0.

3.2.3. Количественные методы анализа межкомпонентных связей

Исследование межкомпонентных отношений и их иерархической организации проводилось с применением ряда методов математической статистики: мультирегрессионного анализа, дискриминантного анализа, параметрического и непараметрического корреляционного анализа, канонического корреляционного анализа, многомерного шкалирования, метода главных компонент, кластерного анализа. Ниже описывается круг задач решавшихся с помощью каждой группы методов, совокупность которых составляет процедуру полимасштабного анализа структуры ландшафта (табл. 4).

Метод канонических корреляций используется для определения меры сопряженности двух групп свойств, характеризующих два компонента ландшафта. Выясняется, насколько велика общность осей дифференциации двух компонентов. Это наиболее общий и наиболее грубый показатель межкомпонентных связей, но позволяет ранжировать компоненты по степени влияния на какой-либо другой компонент и ранжировать территории исследования по степени взаимосопряженности компонентов.

Таблица. 4.

Количественные методы полимасштабного анализа структуры ландшафта и решаемые ими задачи

Метод	Задача
Каноническая корреляция	Определение меры сопряженности двух групп свойств, характеризующих два компонента ландшафта
Мультирегрессионное уравнение межкомпонентных связей	Оценки сопряженности одного свойства компонента с совокупностью свойств другого компонента
Сравнение качества регрессионных уравнений межкомпонентных связей первой и второй степени	Оценка вклада нелинейной составляющей во взаимодействии компонентов
Метод варьирующего состава выборки	Определение иерархического уровня геосистем, на котором связи наиболее совершенны. Проверка гипотезы о неодинаковости факторов, действующих на разных иерархических уровнях.
Метод «резонансных уровней»	Определение иерархических уровней вмещающих геосистем, свойства которых контролируют состояние геосистемы анализируемого ранга
Метод варьирующего разрешения	Определения иерархического уровня геосистемы, который чувствителен к характеристикам вмещающей геосистемы
Метод анализа «остатков» регрессионных уравнений	Выявления группы геосистем, которая в наилучшей степени подчиняется типу межкомпонентных отношений, описываемых уравнением
Метод классификации пространственных единиц по регрессионным коэффициентам	Разделение территории на ареалы геосистем с единством типа межкомпонентных отношений
Метод «суперфакторов»	Разделение вкладов в варьирование свойств почв и фитоценозов двух составляющих: а) детерминированной морфолитогенной основой вмещающих геосистем б) связанной с взаимодействием почв и фитоценозов независимо от морфолитогенной основы
Метод дискриминации групп свойств компонентов классами рельефа	Определения оптимального количества классов рельефа, отражающего дифференциацию почвенно-растительного покрова

Метод уравнений межкомпонентных связей применяется для оценки сопряженности одного свойства (оси дифференциации) компонента с совокупностью осей дифференциации другого компонента. Строятся мультирегрессионные уравнения второй степени следующего вида:

$$y=a+b_1x_1+b_2x_1^2+b_3x_2+b_4x_2^2+b_5x_1x_2+\ldots+b_mx_nx_k\pm\varepsilon, \quad (1)$$

где y — координата на оси дифференциации того или иного компонента ландшафта (экологического градиента), x_n — координата на оси дифференциации другого компонента, b_1 — регрессионные коэффициенты, ε — стандартная ошибка расчета (мера случайного варьирования).

Мультирегрессионные уравнения имеют ряд очевидных преимуществ. Во-первых, возможно сравнить вклады одновременно нескольких факторов (например, разных характеристик почв или рельефа) в варьирование целевой переменной (например, той или иной характеристики растительного покрова). Во-вторых, возможно рассчитать

меру зависимости переменной от совокупного воздействия ряда факторов. В-третьих, на основании регрессионных коэффициентов возможна классификация территории по типам отношений, что дает возможность объективно определить факторы дифференциации территории для каждого конкретного участка отдельно для каждого масштаба. В-четвертых, возможен пространственный анализ остатков мультирегрессионных уравнений, которые становятся новой зависимой переменной; проверяются гипотезы о подчинении их фактором иной природы. В-пятых, сопоставление результатов мультирегрессионных моделей, построенных для разных масштабов, позволяет выявить характерные масштабы реализации межкомпонентных отношений.

Однако есть и трудности применения метода. Основная проблема — трудоемкость построения нелинейных мультирегрессионных моделей. Повышение степени модели и количества независимых переменных может сделать ее громоздкой и трудноинтерпретируемой. Поэтому мы во всех случаях ограничивались четырьмя независимыми переменными и второй степенью. На современном этапе становится понятно, что именно нелинейные отношения наиболее обычны в ландшафте, являются источником его развития и предметом изучения при анализе устойчивости ландшафта (Naveh, 2000).

Сравнение качества (коэффициентов детерминации и уровня значимости) регрессионных уравнений межкомпонентных связей первой и второй степени проводилось для оценки вклада нелинейной составляющей во взаимодействии компонентов (неаддитивной составляющей). В качестве разновидности применяется сравнение параметрических и непараметрических коэффициентов корреляции, которые должны быть близки при линейной форме отношений и отличаться — при наличии нелинейной составляющей.

Наиболее распространены следующие виды связей:

1. Простая линейная.
2. Параболическая.
3. Экспоненциальная.
4. Ограничение разнообразия в экстремальных состояниях при высоком разнообразии в диапазоне средних значений.
   4а Выражается параболической зависимостью с «запрещенным» диапазоном значений зависимой переменной в области высоких или низких значений.
   4б Выражается более или менее линейной зависимостью с «запрещенными» противоположными сочетаниями свойств. При большом X не бывает малых Y и наоборот.
5. Г-образная. При малых значениях аргумента возможны разнообразные состояния зависимой переменной, т.е. нет «запрещенных» состояний. Но при больших значениях аргумента «запрещены» малые значений зависимой переменной. Высокое разнообразие возможных состояний в некотором диапазоне значений аргумента может свидетельствовать о неаддитивном действии двух факторов — исследуемого и еще какого-то, который становится ответственен за варьирование.
6. Эффект «шипа». Высокое разнообразие состояний функции наблюдается в одном диапазоне значений аргумента при резком сужении разнообразия в области средних значений функции при другом диапазоне. По сути это частный случай Г-образной связи.

Метод варьирующего состава выборки. До сих пор речь шла об одноуровенных моделях связей, т.е. о связях компонентов внутри одного выбранного уровня организации, заданного территориальным охватом ландшафтного разнообразия. Однако можно менять содержание выборки, что отражает изменение анализируемого уровня ландшафтного разнообразия. Сравнение серии подобных моделей позволяют найти тот иерархический уровень, на котором связи наиболее совершенны, т.е. коэффициент детерминации максимален, регрессионные коэффициенты значимы, а ошибка минимальна. Высокая теснота связей интерпретировалась как показатель взаимоадаптированности компонентов геосистем в пределах геосистемы некоторого более высокого ранга. Гетерогенность последней обусловлена существованием того или иного градиента, в зависимости от положения на котором происходит сопряженное изменение связанных свойств. Этот метод позволяет выявить типологическую принадлежность геосистемы, в которой существует единый внутренний фактор дифференциации и, соответственно, ее ареал. Рассмотрим этот подход подробнее.

Расчленение выборки используется для проверки гипотезы о неодинаковости факторов, действующих на разных иерархических уровнях организации ландшафта. Основным инструментом служит сравнение качества моделей межкомпонентных связей, полученных для разных уровней ландшафтного разнообразия и степени подчиненности их нормальному распределению (раздел 4.3). В равной степени варьирование состава выборки может служить для сравнения плотности связей на разных сукцессионных стадиях или при разной интенсивности того или иного процесса (раздел 4.7).

Высокие показатели тесноты межкомпонентных связей свидетельствуют о наличии внутренних различий состояния компонентов внутри массива данных. Исключение той или иной категории элементов (фаций) из массива данных может показать либо рост, либо снижение качества модели. Рост качества свидетельствует о возрастании однородности оставшихся данных в том смысле, что существует выявленное достоверной моделью единое правило, объясняющее внутренние различия, а, следовательно, и существование геосистемы с единым системообразующим процессом. Снижение качества модели свидетельствует о том, что среди оставшихся данных нет строгого взаимосоответствия компонентов. Применительно к ландшафтным объектам, а конкретнее — к модели почвенно-фитоценотических связей, это может означать, что: при любых почвах может существовать широкий диапазон фитоценозов; существует широкий диапазон возможных сочетаний почв и фитоценозов; фитоценоз может находиться в разных временных состояниях на одной и той же почве. Причинами такой «слабой связи», как уже говорилось, могут быть наличие на территории разных стадий развития ПТК одного вида, запаздывание реакции почв на изменения по сравнению с изменениями фитоценозов, разное характерное время почв и фитоценозов, случайные нарушения почв или фитоценозов и т.п.

Меняя состав выборки, можно выявить свойства, находящиеся либо под действием множества уравновешивающих друг друга процессов, либо под действием какого-либо ведущего процесса. Исходная «большая» выборка, характеризующая обширную территорию, может по одному ряду свойств соответствовать нормальному распределению, а по другому ряду — отклоняться от такового. При уменьшении выборки ситуация может измениться, что показывает иной набор факторов в геосистеме более низкого ранга. Появляется задача разделения свойств ландшафта на группы, отражающие подчиненность составляющих его парциальных геосистем разным одновременно протекающим процес-

сам, которые в первом случае уравновешивают друг друга, а во втором — нет (т.е. есть ведущий процесс). Например, равновесная оконная динамика древостоя и связанных с ним подчиненных ярусов может проявляться на фоне прогрессирующего заболачивания, провоцирующего изменение строения почв и состава ярусов фитоценоза.

Метод «резонансных уровней» применяется для определения иерархических уровней вмещающих геосистем, свойства которых контролируют состояние геосистемы анализируемого ранга. Строятся мультирегрессионные уравнения второй степени вида (1), только с той разницей, что в качестве независимых переменных x_n выступают морфометрические характеристики рельефа в окрестности, размер которой отражает гипотезу о размере вышестоящей контролирующей геосистемы. Как *критерий «резонансного уровня» вмещающих геосистем используется максимальное значение коэффициента детерминации среди серии уравнений составленных для разных окрестностей*. Метод позволяет установить критерии (информативные свойства компонентов) для классификации геосистем на разных иерархических уровнях. Эта разновидность метода полимасштабного анализа позволяет определить размеры вышестоящей геосистемы при фиксированном размере нижестоящей геосистемы. Опираясь на представление о связи между характерным пространством и характерным временем процесса, по размерам вышестоящей геосистемы можно выдвинуть гипотезу о природе и времени проявления процесса, создающего единство вмещаемых геосистем более низкого ранга.

Метод варьирующего разрешения используется для определения иерархического уровня геосистемы, который чувствителен к характеристикам вмещающей геосистемы. Метод решает обратную задачу по отношению к методу резонансных уровней. Подлежат сравнению модели связи, построенные для ОТЕ разного размера (разрешения цифровой модели рельефа или космического снимка) при одинаковом гипотетическом размере контролирующей вмещающей геосистемы или при одинаковой пропорции между размерами ОТЕ и размерами гипотетической вмещающей геосистемы. Разновидностью анализа является использование в качестве предиктора (независимой переменной) характеристики, измеренной двумя различными способами: применительно к описанной в поле территориальной единице (например, фации) и применительно к описанной по картографическим материалам вмещающей ее единице (например, урочищу).

Как уже говорилось, «проклятьем» ландшафтоведения является проблема «слабых связей», которые, на самом деле, далеко не всегда так слабы, как кажется по результатам статистических расчетов. Проблема, как правило, заключается в том, что закономерность хотя и есть, но выражена не на всей исследуемой территории и не в любых типах ландшафтных условий. Поэтому необходим метод идентификации «идеальных» условий существования связи. Перейдем к описанию такого метода.

Метод анализа «остатков» (residuals) регрессионных уравнений используется для выявления группы геосистем, которая в наилучшей степени с минимальными отклонениями подчиняется выявленной зависимости. Предметом анализа является разность между значениями свойства, наблюдаемыми в природе и предсказанными регрессионной моделью.

Получив уравнение связи исследуемого свойства с характеристиками рельефа какой-либо окрестности, мы получаем возможность разделить ландшафтные фации, которые строго описываются этим уравнением, от фаций, не описываемых уравнением. Первые характеризуются малыми по модулю (близкими к 0) остатками уравнения, вторые — большими по модулю остатками. Оговоримся, что определение «близости остатков к

0» — отдельный вопрос. В нашей работе за таковые считались остатки в пределах одного среднеквадратического отклонения от среднего. Геосистемы с малыми остатками интерпретируются как обладающие хорошей взаимной адаптацией компонентов по какому-либо градиенту среды. Они интерпретируются как принадлежащие единой парагенетической геосистеме, в которой выдерживается правило подчинения исследуемого свойства процессу или явлению. Для выявления пространственных контрастов интенсивности этого процесса или явления необходима классификация рельефа по свойствам заданной окрестности. Территории с большими остатками интерпретируются как не обладающие взаимоадаптацией компонентов.

Территориальная привязка геосистем с минимальными остатками от регрессионных уравнений позволяет выявить ареал проявления ландшафтоформирующего процесса. Очень важен вопрос о специфике локальных условий, в которых наиболее сильно нарушается характерное в целом для ландшафта правило соответствия между фитоценозами и почвами. Предмет анализа — поиск причин наиболее сильных отклонений значений, предсказанных моделью, от значений, наблюдаемых в природе. Иными словами, это поиск мест в ландшафте, где действие проверяемого фактора (например, условий увлажнения) на свойство (например, видовой состав травостоя) ослабевает и маскируется действием других факторов. Такая фация как бы выбивается из общего ряда и имеет гипертрофированное обилие какого-либо вида или, наоборот, обилие существенно меньшее, чем ожидается по гипотезе.

Описанный метод позволяет распознать на территории участок, подчиняющийся закономерности одного конкретного вида. Однако необходим метод, который позволил бы разделить территорию на участки с разными видами зависимости. Такой метод описывается ниже.

Метод классификации пространственных единиц по регрессионным коэффициентам позволяет разделить территорию на геосистемы с единством типа межкомпонентных отношений. В качестве объекта классификации используются операционные территориальные единицы (пикселы). Их совокупность на территории образует массив данных. Расчет проводится в скользящем окне. Предметом классификации становятся коэффициенты мультирегрессионного уравнения, связывающего свойства пиксела со свойствами окрестности. Метод применяется для выделения территорий, в которых свойства индивидуальных геосистем зависят от свойств рельефа вмещающей геосистемы одинаковым образом. В нашей работе основным предметом исследовании явилась зависимость свойств растительного покрова, оцененных по многоканальному космическому снимку, от свойств рельефа окрестности варьирующего размера. Предварительно значения оптических плотностей разных каналов космического снимка были методом главных компонент преобразованы во взаимонезависимые оси дифференциации, каждая из которых отражает одно из свойств растительного покрова. Мы особое внимание уделяли влажности местообитания. Интерпретация полученных классов позволяет выявить и нанести на карту ареалы проявления ландшафтоформирующих процессов, особенности протекания которых определяются или индицируются рельефом.

В качестве одного из методов оценки функциональной целостности геосистем ранее иркутскими исследователями был предложен расчет значений элементов матрицы Якоби, которые являются частными производными от анализируемых функций по соответствующим параметрам (Черкашин, 2005; Истомина, 2013). При наличии функциональной связи детерминант якобиана обращается в ноль в окрестности выбранной

точки. Теоретически достаточно трех точек для вычисления оценок частных производных. Однако в реальных условиях приходится сталкиваться с рядом сложностей. Во-первых, исходные данные, как правило, заданы в дискретном пространстве (аэро- или космические снимки в различных спектральных диапазонах); во-вторых, структура территории может иметь несколько иерархических уровней (например, микро-, мезо- и макро-рельеф); в-третьих, влияет наличие случайной составляющей в данных. Все это требует специальных процедур для оценки частных производных и значений детерминанта якобиана для всех точек исследуемой области.

В качестве одной из таких процедур может быть предложен следующий алгоритм (Хорошев, Алещенко, 2008). Оценкой элементов матрицы якобиана в некоторой точке исследуемой территории предлагается считать значения коэффициентов в уравнениях плоскостей, касательных к анализируемым зависимостям, построенных по точкам элементарного квадрата размером 2n+1 на 2n+1 точек методом наименьших квадратов. При этом значения детерминанта якобиана присваивается центральной точке элементарного квадрата. Это объясняет нечетность стороны такого квадрата. Передвигая центр элементарного квадрата (осуществляя процедуру «скользящего квадрата») из одной точки пространства в другую возможно получение оценок детерминанта якобиана для всех точек исследуемой области за исключением граничных. Таким образом, будет получена карта-схема территории с указанием областей, в которых может существовать функциональная зависимость между рассматриваемыми параметрами.

Вопрос о размерности квадрата приобретает особое значение. Оценка частных производных будет тем точнее, чем меньше квадрат. Понятно, что при этом построенная плоскость будет ближе к касательной в центре элементарного квадрата. Однако оговоренные выше структурные и стохастические свойства территории заставляют увеличивать размер элементарного квадрата. При увеличении размера элементарного квадрата происходит сглаживание случайной составляющей, а также возможный переход на другой иерархический уровень организации территории. Итак, использование детерминанта Якоби позволяет в первом приближении установить факт наличия функциональной связи между характеристиками компонентов ландшафта, но не дает информации о виде и силе этой связи.

В случае, когда требуется определить силу связи и можно пренебречь информацией о ее знаке**,** может быть использован алгоритм, основанный на вычислении для скользящего квадрата индексов разнообразия Шеннона, предложенный Г.М. Алещенко (Хорошев, Алещенко, 2008). Следует отметить, что информационная мера связи нечувствительна к отклонениям данных от нормального распределения и к нелинейности связей, что выгодно отличает ее от параметрических методов статистического анализа. В то же время информационная мера не позволяет, в отличие от регрессионных методов и непараметрических корреляций, определить знак связи. По аналогии с мерой информации, передаваемой набором каналов, мера взаимосвязи может быть оценена как

$$I(x_1, x_2) = \sum_{j=1}^{j=N} H_j(x_1, x_2) - H_0(x_1, x_2),$$

где N — число анализируемых переменных (слоев, характеристик компонентов ландшафта); x_1, x_2 — координаты центра скользящего квадрата; H_j — индекс разнообразия для отдельного слоя (j = 1,2,…N); H_0 – индекс разнообразия по всем слоям. При незави-

симости параметров величина меры связи будет нулевой, т.е. I=0. При наличии связи, (т.е. при повторении одинаковых значений при расчете H_0) величина меры связи будет возрастать ($I > 0$) по мере увеличения меры связи. Здесь связь интерпретируется как уменьшение количества комбинаций значений параметров, реализуемых на территории.

Поскольку при вычислении индексов разнообразия Шеннона используются не сами значения параметров, а частоты появления их значений, то во многих случаях необходима процедура дискретизации значений параметра в области его изменения и замена дискретных значений числами натурального ряда от 1 до M, где M — число дискретизаций. Здесь и далее подразумевается равномерная дискретизация всех параметров с одинаковым количеством дискретизаций для всех параметров (слоев). При этом возникает естественный вопрос о количестве дискретизаций. Как при малом количестве дискретизаций, так и при их достаточно большом количестве вносятся значительные ошибки в описание распределения системы параметров по территории. При малом количестве дискретизаций каждая подобласть может оказаться достаточно большой и при вычислении значения H_j (j = 0, 1, … N), будет недостаточное количество вариантов для качественного описания системы. При большом количестве дискретизаций (количество вариантов для H_0 определяется как M^N) возможное количество вариантов может значительно превышать размер исследуемой области и, тем более, «скользящего квадрата» — $(2n+1)^2$. Это дает возможность предположить, что в большинстве случаев, реализованные в каждом из «скользящих квадратов» варианты сочетаний дискретизованных значений параметров будут различны (индекс разнообразия H_0 близок к своему максимальному значению).

Для проверки этой гипотезы Г.М. Алещенко провел следующий вычислительный эксперимент. В этом эксперименте оценивалась мера связи между тремя параметрами (горизонтальная расчлененность, вертикальная расчлененность и «фактор влажности» — одна из осей дифференциации растительного покрова, полученная методом главных компонент по многоканальному космическому снимку Landsat 7) при различных значениях $M=2^i$ (i = 1,2, …8) для «скользящего квадрата» размером 5x5 пикселов. На рис. 20 показаны результаты вычислительного эксперимента, а именно зависимости минимального (min I), максимального (max I), среднего (I ср.) по территории значении меры связи, а также разности между максимальным и минимальным значениями меры связи ($\Delta I=maxI–minI$) для различного количества дискретизаций (M), выбранных параметров. Критерием наилучшего выбора количества дискретизаций может считаться значение M^*, при котором достигается максимум функции ΔI(M), т.е. $M^*=argmax\,\Delta I(M)$. Выбор такого количества дискретизаций гарантирует максимальный диапазон изменения меры связи параметров по территории.

Чем более высока дробность категоризации переменных, тем более компактны ареалы классов отношений, отражаемые на карте. Избыточная дробность категоризации приводит к тому, что частоты сочетаний разных состояний переменных становятся почти одинаковыми, и поэтому информационные меры связи искусственно нивелируются. При недостаточной дробности категоризации связь выделенных функционально единых структур и ландшафтных единиц размывается.

Другим — основным в данной работе — способом пространственного анализа межкомпонентных связей стало построение мультирегрессионной зависимости. Такие зависимости строятся для всех пикселов анализируемой области по соответствующим элементарным квадратам. Элементарный квадрат в данном алгоритме играет роль ли-

нейной окрестности, что снимает возможные вопросы о необходимости использования нелинейных связей. Изменение коэффициентов в уравнении множественной регрессии показывает смену процессов происходящих в исследуемой области пространства, а также оценивает «силу связи» между характеристиками ландшафта. Именно возможность пространственного анализа коэффициентов мультирегрессионных зависимостей, реализованный Г.М. Алещенко по предложению автора в программе FRACDIM, отличает созданный алгоритм от хорошо известных и давно используемых процедур построения регрессионных уравнений. Преимущество способа пространственного представления межкомпонентных связей посредством мультирегрессионных уравнений заключается в возможности не только оценить силу связей по коэффициенту

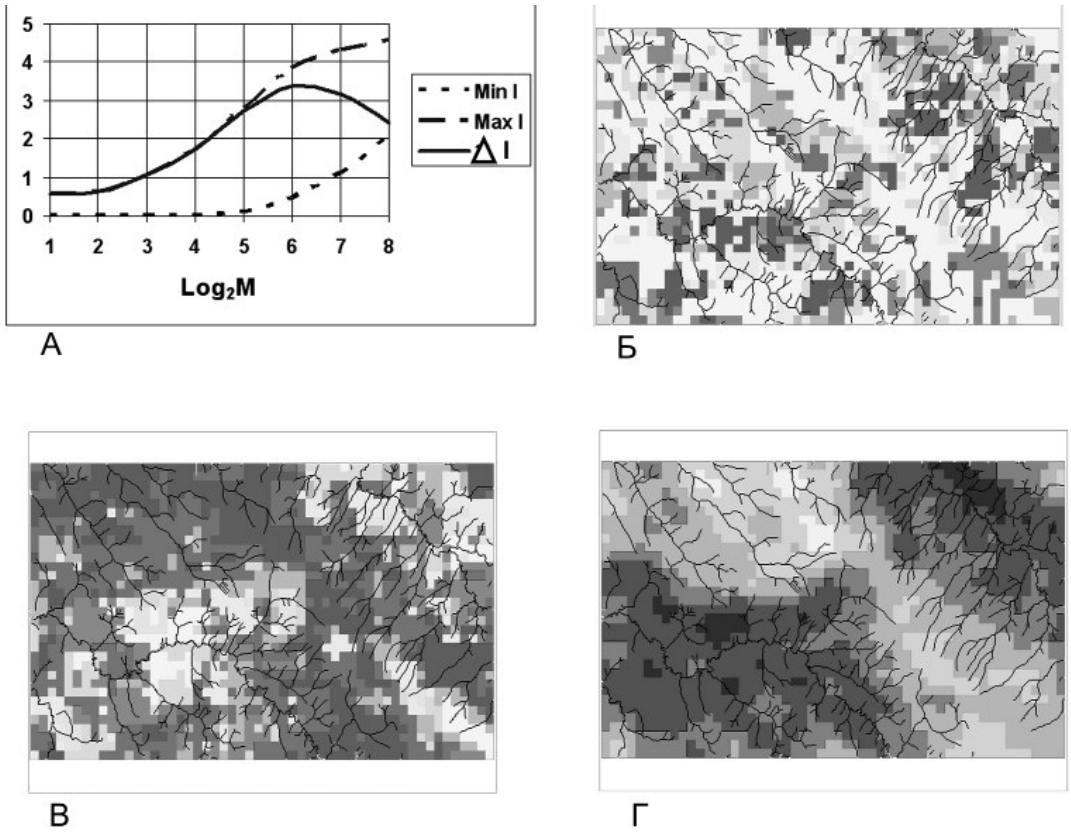

Рис. 20. Определение оптимального уровня категоризации переменных (M*) при расчете информационной меры связи между «фактором влажности» и вертикальной расчлененностью рельефа (Хорошев, Алещенко, 2008).
А — информационная мера связи (Min I — минимальное, Max I — максимальное и ΔI = Max I – Min I значения меры связи по территории). Б — классификации территории (8 классов) по совокупности информационных мер связи в скользящем квадрате со стороной 2000 м при дробности квантования переменных 16 градаций. В — то же, 64 градации. Г — то же, 128 градаций. Среднетаежный полигон «Заячья» в Архангельской области.

детерминации, но и сопоставить по модулю и по знаку вклады нескольких гипотетических факторов (независимых переменных) в варьирование зависимой переменной. Классификация объектов по значениям стандартизованных коэффициентов регрессионного уравнения позволяет различать на местности мозаичные геосистемы с единым типом межкомпонентных отношений, т.е. с единым главным фактором пространственной дифференциации.

Наконец, если линейность отношений между характеристиками компонентов ландшафта вызывает сомнения, то инструментом пространственного представления типов межкомпонентных отношений могут служить непараметрические коэффициенты корреляции, которые также рассчитываются в скользящем квадрате и дают информацию как о знаке, так и виде связи. В отличие от регрессионных уравнений, этим способом невозможно получить интегральную оценку, в какой степени зависимая переменная (например, растительность) описывается совокупностью независимых (например, группой характеристик рельефа). Однако классификация объектов по совокупности значений коэффициентов корреляции зависимой переменной с каждой из независимых также позволяет найти в пространстве границы геосистем с единым типом межкомпонентных отношений.

Основная задача решается путем построения серии уравнений, которые связывают свойства операционной территориальной единицы с морфометрическими характеристиками рельефа окрестностей разного размера. Затем сравнивается качество и достоверность этих моделей. Известны методы выявления иерархических уровней организации какой-либо одной характеристики. В них индикатором перехода на новый уровень считается резкое увеличении дисперсии при достижении некоторого порога территориального охвата (Turner et al., 2001; Hay et al., 2002). В нашей работе решается более сложная задача: анализируются связи между сразу несколькими характеристиками (сопряженного их изменения в пространстве). Индикатором выхода на новый иерархический уровень будем считать резкое изменение доли описанной дисперсии. На выходе этого анализа будет получена классификации компонентов или их свойств по чувствительности к свойствам окрестностей разного размера. Фактически это означает классификацию по принадлежности процессов, ответственных за варьирование данного свойства ландшафта, к иерархическим уровням вмещающих геосистем. Это дает основания для соотнесения характеристик ландшафта с иерархическими уровнями.

Составление серии статистических моделей, связывающих свойств ОТЕ со свойствами окрестностей разного размера, позволяет определить размеры вмещающей геосистемы более высокого ранга. Показателем качества статистической модели является высокое значение коэффициента детерминации *r^2* при стремящемся к нулю значению ошибки первого рода *p*. Значительное превышение значения коэффициента детерминации модели, составленной для какой-либо окрестности, по сравнению с моделями для окрестностей других размеров, индицирует «резонансные» отношения, т.е. приоритетную подчиненность исследуемого свойства ОТЕ свойствам геосистемы данного размера.

Заключительным этапом процедуры была классификация пикселов методом к-средних по значениям регрессионных коэффициентов. Она позволяет отнести каждую ОТЕ (пиксел) к тому или иному типу уравнения, т.е. типу межкомпонентных отношений. Типы, выделенные таким способом, различаются по набору ландшафтоформирующих процессов, отражаемых сочетанием вкладов каждой из морфометрических характе-

ристик рельефа в варьирование зависимой переменной (в нашем случае – одного из свойств растительного покрова).

Применяя описанный метод, мы сталкиваемся с некоторым ограничением, а именно — проблемой корректного разграничения ареалов с разными типами межкомпонентных отношений. Она возникает из-за того, что результат классификации ПТК по коэффициентам мультирегрессионного уравнения присваивается центральному пикселу скользящего окна, а периферия окна попадает в сферу влияния сразу нескольких, иногда противоположных по смыслу типов отношений. Строго говоря, в чистом виде каждый тип отношений существует только в центральной части относительно обширного гомогенного ареала, куда не «достает» влияние ядра другого типа отношений. Если на небольшом расстоянии часто происходит смена типов отношений, то это, скорее всего, свидетельствует либо о многофакторности, либо о неприемлемости данного пространственного масштаба для анализа отношений данного типа.

Метод «суперфакторов» предназначен для разделения вкладов в варьирование свойств почв и фитоценозов двух составляющих: а) детерминированной морфолитогенной основой вмещающих геосистем б) связанной с взаимодействием почв и фитоценозов независимо от морфолитогенной основы. Теоретический смысл процедуры был рассмотрен выше в разделе 2.7. В табл. 5 описывается последовательность расчетов. Отметим, что для того чтобы исключить в результирующих расчетах влияние свойства на самого себя (что приводит всегда к завышенным показателям коэффициента детерминации) при расчете суперфакторов из числа исходных переменных исключалось свойство, которое в мультирегрессионном уравнении использовалось как зависимая переменная.

Таблица. 5.

Алгоритм разделения вкладов внутриуровенных и межуровневых взаимодействий методом «суперфакторов»

Шаг	Процедура	Результат
1	***2***	***3***
1	Выделение независимых факторов дифференциации свойств компонентов (ярусов фитоценоза, почв, почвообразующих отложений) методом многомерного шкалирования исходных данных измеренных в поле. Расчет морфометрических характеристик рельефа (вертикальная и горизонтальная расчлененность, вертикальная и горизонтальная кривизна) для пяти разных окрестностей пиксела (ОТЕ), заключающего описанную в поле фацию. Квадратные окрестности со стороной: 3, 5, 7, 9, 15 пикселов.	Оси дифференциации компонентов, полученные методом многомерного шкалирования: d1a, d2a, d3a, d1b, d2b, d3b, d1c, d2c, d3c, где d-оси; a, b, c — компоненты ландшафта. Например, d1c — свойства древостоя, чувствительные к влажности, d2c — свойства древостоя, чувствительные к трофности, d2a — морфологические свойства почв, чувствительные к влажности и т.д.) Морфометрические характеристики рельефа гипотетических вмещающих геосистем: A1, A2, A3, B1, B2, B3, где А, Б — морфометрические характеристики; 1, 2, 3 — размеры окрестностей, для которых они рассчитаны (размеры гипотетических вмещающих геосистем)

Таблица (*продолжение*)

1	*2*	*3*
2	Метод главных компонент - определение вкладов свойств, зависимых от рельефа, и межкомпонентных связей в варьирование свойства d1a. Исходные переменные: d2a, d3a, d1b, d2b, d3b, d1c, d2c, d3c, A1, A2, A3, B1, B2, B3.	Значения взаимонезависимых «суперфакторов» F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8 для каждой точки описания
3	Интерпретация суперфакторов по факторным нагрузкам	F1, F2, F6, F8 (номера условные) — суперфакторы, отражающие сопряженное варьирование характеристик рельефа и свойств компонентов (большие по модулю факторные нагрузки для морфометрических характеристик рельефа и некоторых свойств фитоценоза, почв, отложений). F3, F4, F5, F7 (номера условные) — суперфакторы, отражающие независимое от рельефа варьирование свойств компонентов (большие по модулю нагрузки только для свойств фитоценоза, почв, отложений)
4	Составление двух мультирегрессионных моделей: (1) d1a=Ф(F1, F2, F6, F8) — модель вклада рельефа вмещающих геосистем (межуровенных взаимодействий) (2) d1a=Ф(F3, F4, F5, F7) – модель вклада других свойств фитоценоза, почв, отложений, независимых от рельефа вмещающих геосистем (внутриуровенных — собственно межкомпонентных — связей)	Сравнение качества двух моделей (при условии их статистической достоверности, $p<0,05$). Первый вариант: Коэффициент детерминации уравнения (1) больше коэффициента детерминации уравнения (2). Следовательно, свойство d1a варьирует в пространстве в зависимости от состояния рельефа и сопряженных с ним процессов вмещающей геосистемы (например, с размерами 3 пиксела) или совокупности вмещающих геосистем нескольких иерархических уровней (например, с размерами 3 и 7 пикселов). Второй вариант: Коэффициент детерминации уравнения (1) меньше коэффициента детерминации уравнения (2). Следовательно, варьирование свойства d1a в пространстве определяется исключительно взаимодействиями компонентов на локальном уровне, соответствующем заданному размеру ОТЕ. Например, интенсивность гумусонакопления определяется видовым составом травостоя; наличие соотношение бореальных и неморальных видов травостоя определяется соотношением хвойных и широколиственных видов древостоя. Другой вариант интерпретации: свойство d1a может зависеть от свойств вмещающих геосистем более низкого уровня, чем заданный размер ОТЕ (например, 400 м). Например, обилие сфагнума зависит от положения фации в окружении фаций, приуроченных к соседним формам микрорельефа, каждая из которых имеет линейные размеры более низкого порядка (например, 30–50 м), чем заданные размеры ОТЕ. Тогда требуется аналогичный анализ с использованием морфометрических характеристик, рассчитанных при более высоком разрешении цифровой модели рельефа.

Таблица (*окончание*)

1	*2*	*3*
5	Проверка гипотезы о наличии эмерджентных эффектов совместного влияния вмещающих геосистем нескольких иерархических уровней на свойство d1a или совместного влияния группы свойств компонентов	Первый вариант для уравнения (1): Коэффициент детерминации уравнения (1), при условии его статистической значимости, выше, чем любой из коэффициентов детерминации уравнений, показывающих зависимость свойства d1a от четырех морфометрических характеристик какой-либо одной окрестности (3, 5, 7, 9 или 15 пикселов). Тогда значения свойства d1a (например, соотношение гумусонакопления и торфонакопления) определяется одновременно действующими процессами нескольких иерархических уровней (например, оттоком влаги с междуречья в долину и перераспределением влаги между формами эрозионного мезорельефа внутри междуречья). Второй вариант для уравнения (1): Коэффициент детерминации уравнения (1), при условии его статистической значимости, ниже, чем какой-либо из коэффициентов детерминации уравнений, показывающих зависимость свойства d1a от четырех морфометрических характеристик одной окрестности (3, 5, 7, 9 или 15 пикселов). Тогда значения свойства d1a (например, соотношение гумусонакопления и торфонакопления) определяется исключительно процессами, характерными для одного иерархического уровня (например, только перераспределением влаги между формами эрозионного мезорельефа внутри междуречья). Тогда подтверждается гипотеза о характерном размере единственной значимой вмещающей геосистемы. Первый вариант для уравнения (2): Коэффициент детерминации уравнения (2), при условии его статистической значимости, выше, чем любой из коэффициентов детерминации уравнений, показывающих зависимость свойства d1a от 4-х осей дифференциации свойств другого компонента. Например, соотношение бореальных и неморальных кустарников, определяется в меньшей степени составом древесного яруса, чем совокупностью условий, созданных древостоем, моховым ярусом и морфологическими свойствами почв. Условный ход рассуждения: «Для того, чтобы могло быть высокое обилие бересклета необходимо не только наличие липы и клена в древостое, а обязательно еще и хорошо гумусированные и хорошо дренированные (неоглеенные) почвы». Парные межкомпонентные взаимодействия слабее, чем эмерджентный эффект совместного влияния нескольких компонентов. В этом случае есть основания говорить о наличии на территории исследования целостных природно-территориальных комплексов с высокой взаимозависимостью компонентов и возможными обратными связями, приводящими к саморазвитию. Второй вариант для уравнения (2): Коэффициент детерминации уравнения (2), при условии его статистической значимости, ниже, чем коэффициент детерминации какого-либо из уравнений, показывающих зависимость свойства d1a от четырех осей дифференциации свойств другого компонента. Например, соотношение бореальных и неморальных кустарников, определяется исключительно составом древесного яруса. Условный ход рассуждения: «Для того чтобы могло быть высокое обилие бересклета, необходимо только наличие липы и клена в древостое при любых свойствах почв, травяного и кустарничкового ярусов». Парные межкомпонентные взаимодействия сильные; эмерджентный эффект совместного влияния нескольких компонентов не выражен. В этом случае есть основания говорить о наличии на территории исследования только серии парциальных относительно независимых друг от друга геосистем, связывающих свойства пары компонентов. Цепные реакции при нарушениях в ландшафте, скорее всего, в этом случае будут ослабленными. С высокой вероятностью ландшафт находится в нарушенном состоянии.

Когда для некоторой группы свойств методом суперфакторов установлен господствующий вклад рельефа вмещающих геосистем в варьирование значений, применяется описываемый ниже «метод дискриминации». Он позволяет связать классификацию рельефа с пространственной организацией почвенно-растительного покрова.

Метод дискриминации групп свойств компонентов классами рельефа используется для определения оптимального количества классов рельефа, отражающего дифференциацию почвенно-растительного покрова, т.е. имеющих ландшафтное содержание. Предварительно выявляется оптимальный (резонансный) иерархический уровень организации рельефа, контролирующий состояние свойств индивидуальных геосистем (разумеется, если он вообще существует). Затем производится классификация рельефа территории по морфометрическим характеристикам резонансной окрестности, которая одновременно является ландшафтной классификацией, так как на предыдущем этапе доказано, что свойства почвенно-растительного покрова меняются в пространстве сопряженно с морфометрическими свойствами рельефа.

Целесообразное количество классов рельефа и отложений определялось по перегибам графика зависимости «количество классов – доля корректно классифицированных ПТК». Последний показатель рассчитан методом дискриминантного анализа. В качестве группирующих переменных задаются классы морфолитогенной основы. В качестве зависимых переменных задаются характеристики почв и фитоценозов, которые описаны осями дифференциации. Средствами дискриминантного анализа рассчитываются доля корректно классифицированных наблюдений (т.е. процент точек наблюдения, для которого свойства почв и растительности точно распределяются по заданным классам морфолитогенной основы). Корректная классификация наблюдений указывает на принадлежность их к целостным ландшафтным структурам. Возможен вариант некорректной, но однозначной классификации, т.е. с большой вероятностью свойства мобильных компонентов соответствуют не тому классу морфолитогенной основы, к которому ПТК отнесен по результатам классификации, а другому. Иными словами, у растительности и/или почв данного ПТК имеется однозначное сходство со свойствами комплексов, находящихся в совершенно других морфолитогенных условиях; имеет место искажение равновесных межкомпонентных отношений. Это заставляет либо искать другой морфолитогенный фактор (например, особые литологические или геохимические условия, которые нарушают ожидаемую интенсивность латеральных потоков), либо проверять перечисленные выше гипотезы о причинах неравновесности.

Расчет условных (постериорных) вероятностей применяется для определения степени соответствия совокупности свойств типичным значениям для дискретных классов другого компонента. Метод позволяет выделить геосистемы с высокой адаптацией одного компонента к другому и геосистемы в переходных, потенциально неустойчивых состояниях. Последние имеют свойства, характерные сразу для нескольких классов и могут быть смещены случайными воздействиями к более типичному для того или иного класса состоянию. Постериорные вероятности принадлежности к нескольким классам используются для расчета меры неопределенности классификационной принадлежности (НКП) по формуле Шеннона, смысл которой описан в разделе 2.10. Полученная в результате описанных процедур информация наносится на карту и позволяет получить представление не только о степени морфолитогенной детерминированности свойств ландшафта, но и о соотношении дискретности и континуальности в пространственной организации территории.

Более частные особенности применения описанных методов приводятся в следующем разделе при описании конкретных результатов исследований на региональных примерах.

Совокупность описанных процедур мы называем *полимасштабным анализом вертикальной (компонентной) структуры ландшафта*.

3.2.4. Предметные и региональные ограничения методологии

Предлагаемая методология целиком основана на методах математической статистики, которые представляют собой лишь часть стохастического моделирования. Хорошо известно, что статистика сама по себе не дает ответа на вопросы о причинно-следственных связях между явлениями, а лишь подсказывает путь поиска (Д.Л. Арманд, 1975). Тем не менее, автор убежден, что такой этап совершенно необходим, прежде чем приступать к моделированию процессов массоэнергообмена, то есть к наиболее сложной задаче науки о природных комплексах. Разработанная методология позволяет выявлять связи-отношения и их иерархическую организацию и тем самым сужает поле поиска связей-взаимодействий, то есть круговоротов вещества и энергии. Взаимодействия должны изучаться более сложными физико-математическими методами с применением дорогостоящих приборов по материалам длительных и трудоемких стационарных исследований, желательно — с применением экспериментов в природе (разумеется, насколько сама природа это позволяет). В данной работе предпринята попытка описания межкомпонентных отношений средствами относительно простых мультирегрессионных уравнений второй степени в сравнении с линейными уравнениями. Почти наверняка, нелинейные уравнения более сложного вида будут способствовать получению более достоверной и подробной информации, особенно о неаддитивных эффектах взаимодействия компонентов.

Как уже говорилось, представленное исследование лежит в рамках функционально-статического направления ландшафтоведения. Демонстрируемые в главе 4 результаты применения методологии полимасштабного анализа основаны на единовременных наблюдениях, представляющих собой только один возможный временно́й «срез» состояний ландшафта. Поэтому для получения информации о более или менее инвариантных свойствах и связях в ландшафте при реализации предлагаемой методологии предпочтительно использовать либо характеристики с высокой инертностью (то есть мало подверженные сезонной и межгодовой динамике), либо «нейтрализовать» влияние кратковременной динамики. Один из применяемых методов — снижения размерности и интерпретации физического смысла осей дифференциации — позволяет оперировать не индивидуальными свойствами (возможно неустойчивыми во времени, например, обилиями видов или цветом почв), а их совокупностями, причем случайные или редко встречающиеся свойства описываются не главными по значимости осями. В принципе для полной проверки работоспособности методологии необходимо несколько итераций расчетов, в каждой из которых исходными данными служили бы результаты описаний за разные сезоны и годы, в том числе отличающиеся по погодным условиям. Такими данными автор на данный момент, к сожалению не располагает. Влияние погодных условий на результаты измерений свойств растительности и почв (особенно оглеения) пока остаются за рамками исследования. Климатические условия косвенно учтены только на зональном уровне через сравнительный анализ структуры межком-

понентных связей трех подзон лесной зоны и степной зоны. Микроклиматические условия, как показали полевые исследования, не оказывают влияния на рассмотренные свойства почвенно-растительного покрова на лесных равнинных полигонах, поэтому они оставлены за рамками исследования.

В нашей работе ключевое значение придается эмерджентному влиянию расчлененности рельефа вмещающих геосистем на свойства вложенных геосистем, которое передается в лесной зоне в основном через уровень грунтовых вод. Не располагая надежными данными об уровне грунтовых вод и, тем более, об их динамике в районах исследования, автор, тем не менее, считает возможным рассматривать свойства почвенно-растительного покрова как индикатор состояния этого труднонаблюдаемого компонента. Неочевидна применимость методологии к полупустынной и пустынной зонам, где влияние грунтовых вод на почвенно-растительный покров узко локализовано и более существенное значение имеют гранулометрический состав грунтов и эоловые процессы. Также неочевидна применимость методологии к тундровой зоне, где влияние грунтовых вод может быть блокировано многолетней мерзлотой. Возможно в мерзлотных условиях расчлененность рельефа может создавать эмерджентный эффект через другие механизмы, например через сток поверхностных вод и внутрипочвенных вод в маломощном сезонно-талом слое. Однако этот вопрос требует отдельного исследования. Для степной зоны автор считает разработанную методологию ограниченно применимой в районах с густорасчлененным эрозионным или низкогорным и сопочным эрозионно-денудационным рельефом, где при большом летнем испарении структура почвенно-растительного покрова в большой степени зависит от быстроты сброса талых вод по отрицательным формам рельефа. Вероятно, это особенно важный механизм в районах с континентальным климатом, где весенний сток часто идет по промерзшей почве и влагозарядка почвы на вегетационный период зависит от способности рельефа «задержать» влагу до времени оттаивания почвы.

Признавая значимость нескольких типов ландшафтных структур (В.Н. Солнцев, 1997; Коломыц, 1998; Гродзинський, 2005), автор сосредоточил внимание на тех, которые наиболее близки к геостационарным и косвенно – геоциоркуляционным (в терминологии В.Н. Солнцева, 1997). Для исследования полимасштабной организации биоциркуляционных структур использованных показателей расчлененности рельефа недостаточно. Для исследования эмерджентных эффектов пространственной структуры ландшафта на биоциркуляционные структуры, помимо общепринятых характеристик солярной и циркуляционной экспозиции (Пузаченко и др., 2002; Глущенко, Лычак, 2005), необходимы, вероятно, показатели, учитывающие характер горно-долинной циркуляции, фёновые и подобные им эффекты, взаимное затенение склонов, инверсионные котловинные эффекты, близость к охлаждающим или отепляющим объектам типа ледников или водохранилищ и др. Обобщая, можно сказать, что необходим набор показателей ландшафтного соседства, который характеризовал бы искажающее влияние рельефа на структуры, формируемые солнечной радиацией. Что касается, биоцентрично-сетевых конфигураций ландшафта (в терминологии М.Д. Гродзинського), то предложенные подходы, по мнению автора, вполне применимы с той разницей, что вместо характеристик рельефа в окрестности ОТЕ должны применяться характеристики разнообразия ландшафтного покрова. Представляется перспективным изучение возможностей предложенной методологии в целях объяснения устойчивости свойств почвенного и особенно растительного покрова в зависимости от степени типичности

или редкости геосистемы низкого ранга в контексте геосистем более высокого ранга, т.е. в категориях «родственного» или «враждебного» окружения. Такой сюжет частично пересекается со сферой исследований рисунка ландшафта, в которых геоморфологические и биотические процессы увязываются друг с другом разными способами в зависимости от генезиса территории.

Важное ограничение предложенной методологии заключается в отсутствии в ней пока инструментов характеристики анизотропности пространства вмещающей геосистемы, т.е. зависимости свойств от направлений (Ласточкин, 2011). Используемые количественные показатели характеризуют общий уровень разнообразия и форму геосистемы, но не пространственные различия в размещении внутренних элементов (например, зоны сгущения эрозионных форм или склонов повышенной крутизны). Вероятно, в дальнейшем потребуется привлечение инструментов характеристики позиционно-динамических и бассейновых геосистем для объяснения свойств операционной территориальной единицы. В их число могут входить, например, позиционные индексы (расстояние до водораздела, водотока и т.п.), характеристики возможности накопления и рассеяния влаги с учетом площади водосбора (Сысуев, 2003; Ерофеев, 2012), доли тех или иных видов ландшафтного покрова выше и ниже по рельефу, с подветренной и наветренной стороны, наличия в окрестности геохимических барьеров или механических препятствий для потоков вещества и т.д. Вероятно, перспективно привлечение аппарата исследований рисунка ландшафта (Викторов, 2006) для описания взаиморасположения пространственных элементов в пределах геосистемы высокого ранга как предиктора свойств ОТЕ. При этом широкий диапазон разработанных количественных показателей структуры и канонических моделей (Викторов, 1986, 1998, 2006; McGarigal, Marks, 1995; Wu, 2004; Couteron et al., 2006) может применяться не только к ландшафтному покрову, распознаваемому по дистанционным материалам, но и к геотопам или морфотопам, выделяемым по ЦМР на основании строгих критериев (Мкртчян, 2008; Ласточкин, 2011).

Глава 4

Полимасштабный анализ структуры ландшафта

Ландшафтоведение неизбежно имеет с большим количеством показателей, характеризующих компоненты ландшафта. Это является и преимуществом ландшафтоведения и вызовом для него, осложняющим анализ причин пространственной дифференциации природы. В данном исследовании добавляются еще и показатели, характеризующие свойства геосистем нескольких иерархических уровней. Поэтому на первом месте в последовательности процедур полимасштабного анализа ландшафтной организации (разумеется, после полевых исследований) стоит снижение размерности массива данных, то есть перевод исходных данных в небольшое количество осей дифференциации, которые имеют смысл экологических градиентов. Напомним, что каждая из осей отражает согласованное поведение группы показателей в зависимости от состояния экологического фактора. Наблюдаемое значение количественного показателя ландшафта является суперпозицией множества факторов, из которых мы на количественной основе выделяем наиболее значимые и исследуем результаты их действия в ландшафте на нескольких иерархических уровнях. Пространственное варьирование значений каждой оси и их сочетаний является основным предметом исследования. Объекты, которые характеризуются осями дифференциации, — фитоценоз и почвы.

4.1. Интерпретация физического смысла осей дифференциации свойств компонентов и ранжирование экологических факторов

Результаты интерпретации осей дифференциации для модельных регионов приведены в табл. 6.

Интерпретация физического смысла виртуальных осей дифференциации свойств компонентов может производиться несколькими взаимодополняющими способами. Рассмотрим их на простых примерах модельных ландшафтов.

Во-первых, набор переменных с противоположными факторными нагрузками (фактически — корреляциями между измеренным значением и значением оси в точке наблюдения) подсказывает смысл оси при знании экологических особенностей видов фитоценоза, условий формирования почвенных горизонтов. Например, на Куршской косе первая ось дифференциации древостоя отражает противоположное поведение в пространстве двух групп видов: при высоком обилии ясеня, каштана, липы, клена, дуба, вяза наблюдается минимальное обилие сосны, ели, березы и наоборот (табл. 7). Очевидно, что ось отражает соотношение видов с разными требованиями к минеральному питанию — фактически соотношение видов таежной и широколиственно-лесной зон. В зависимости от локальных особенностей минерального питания в зоне смешанных лесов, к которой относится Куршская коса, соотношение смещается в пользу то хвойных, то широколиственных видов.

Таблица 6.

Экологическая интерпретация физического смысла осей дифференциации свойств компонентов ландшафта на лесных полигонах исследования. У.с.ф. – узколокальные или случайные факторы

Ось дифференциации: компонент и порядковый номер	Символическое обозначение в тексте и на рисунках	Архангельская обл. Полигон «Заячья»	Архангельская обл. Полигон «Трансект»	Архангельская обл. Полигон «Медвежий»	Архангельская обл. Полигон «Козловка	Ханты-Мансийский округ Обский полигон	Костромская область	Костромская область Кологривский район	Удмуртия	Куршская коса
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*
Фитоценоз										
Деревья 1	D1tree	Трофность	Трофность	Трофность	Сукцессия	Влажность	Трофность	Трофность	Трофность	Трофность
Деревья 2	D2tree	Влажность	Сукцессия	Трофность	Трофность	Влажность	Мехсостав	Влажность	Трофность	Интродуценты
Деревья 3	D3tree	Трофность	Влажность	Влажность	Влажность	Трофность	Влажность	Влажность	Сукцессия	Влажность
Деревья 4	D4tree	Влажность	Влажность	–	Влажность	Сукцессия	Мехсостав	Сукцессия	Влажность	Сукцессия
Деревья 5	D5tree	–	–	–	–	Сукцессия	У.с.ф.	Сукцессия	У.с.ф.	–
Деревья 6	D6tree	–	–	–	–	У.с.ф.	У.с.ф.	Сукцессия	У.с.ф.	–
Деревья 7	D7tree	–	–	–	–	Сукцессия	Сукцессия	–	У.с.ф.	–
Деревья 8	D8tree	–	–	–	–	У.с.ф.	У.с.ф.	–	Сукцессия	–
Кустарники 1	D1bush	Трофность	Трофность	Трофность	Трофность	Влажность	Азот	Мехсостав	Влажность	Трофность
Кустарники 2	D2bush	Влажность	У.с.ф.	У.с.ф.	Азот	Азот	Влажность	У.с.ф.	Мехсостав	Влажность
Кустарники 3	D3bush	Азот	Трофность	У.с.ф.	Трофность	Влажность	Мехсостав	Сукцессия	У.с.ф.	У.с.ф.
Кустарники 4	D4bush	Гумус	Гумус	У.с.ф.	Влажность	У.с.ф.	Трофность	У.с.ф.	У.с.ф.	Трофность
Кустарнички 1	D1low	Влажность	Влажность	У.с.ф.	Влажность	Влажность	Влажность	Влажность	Трофность	Влажность
Кустарнички 2	D2low	Трофность		Трофность	Трофность	Трофность	Трофность	Трофность	Влажность	Трофность
Кустарнички 3	D3low	Сукцессия	Трофность	–	–	Трофность	Мехсостав	Трофность	–	Трофность
Кустарнички 4	D4low	У.с.ф.	Влажность	–	–	–	Влажность	Влажность	–	Влажность
Травы 1	D1herb	Трофность	Трофность	Трофность	Влажность	Трофность	Трофность	Влажность	Азот	Влажность
Травы 2	D2herb	Влажность	Трофность	Влажность	Азот	Влажность	Влажность	Сукцессия	Трофность	Азот
Травы 3	D3herb	У.с.ф.	Влажность	Влажность	Влажность	Свет	Азот	Трофность	Мехсостав	Трофность
Травы 4	D4herb	Влажность	Сукцессия	У.с.ф.	Трофность	Влажность	У.с.ф.	Азот	У.с.ф.	Влажность
Травы 5	D5herb	Сукцессия	У.с.ф.	У.с.ф.	Трофность	Влажность	У.с.ф.	У.с.ф.	Трофность	У.с.ф.

Таблица (*окончание*)

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*
Травы 6	D6herb	У.с.ф.	Влажность	У.с.ф.	У.с.ф.	У.с.ф.	У.с.ф.	У.с.ф.	У.с.ф.	У.с.ф.
Травы 7	D7herb	Сукцессия		У.с.ф.	У.с.ф.	У.с.ф.	У.с.ф.	У.с.ф.	У.с.ф.	У.с.ф.
Травы 8	D8herb	У.с.ф.	Влажность	У.с.ф.	У.с.ф.	У.с.ф.	У.с.ф.	Сукцессия	У.с.ф.	У.с.ф.
Мхи 1	D1moss	Влажность	Влажность	–	Влажность	Влажность	Влажность	Влажность	–	Влажность
Мхи 2	D2moss	Влажность	Влажность	–	Влажность	Влажность	Трофность	Влажность	–	Мехсостав
Мхи 3	D3moss	–	–	–	–	Влажность	Трофность	–	–	–
Почва										
Мощность горизонтов почв 1	D1hor	Влажность	Влажность	Трофность	Влажность	Влажность	Влажность	Влажность	Влажность	Влажность
Мощность горизонтов почв 2	D2hor	Трофность	Трофность	Иллювиирование	Вложенный подзол	Трофность	Трофность	Трофность	Трофность	Трофность
Мощность горизонтов почв 3	D3hor	Вложенный подзол	Вложенный подзол	Сукцессия	Сукцессия	Сукцессия	Сукцессия	Вложенный подзол	Влажность	Влажность
Мощность горизонтов почв 4	D4hor	Влажность	Влажность	Влажность	Трофность	Мерзлота	Азот	Сукцессия	Сукцессия	Трофность
Цвет почв 1	D1col	Влажность	Влажность	Влажность	Элювиирование	Влажность	Влажность	Мехсостав	Влажность	Мехсостав
Цвет почв 2	D2col	Иллювиирование	Влажность	Трофность	Поверхностное оглеение	Трофность	Мехсостав	Трофность	Трофность	Влажность
Цвет почв 3	D3col	Трофность	Трофность	Влажность	Глубинное оглеение	Трофность	Трофность	Сукцессия	Трофность	Азот
Цвет почв 4	D4col	Трофность	Иллювиирование	Трофность	Иллювиирование	Мерзлота	Иллювиирование	Иллювиирование	Влажность	Влажность
Отложения										
Мех.состав почв 1	D1text	Двучленность	Двучленность	Двучленность	15–30 см	–	5–25 см	Двучленность	Двучленность	–
Мех.состав почв 2	D2text	20–40 см	25–40 см	20–35 см	5–25 см	–	30–45см	35–50 см	20–45 см	–
Мех.состав почв 3	D3text	5–40 см	15–25 см	30–40 см	5–15см	–	5–15 см	25–40 см	5–10см	–
Мех.состав почв 4	D4text	10–50 см	40–50 см	15–20 см	5–30см	–	15–45 см	20–50 см	10–50 см	–

Таблица. 7.

Факторные значения первой оси дифференциации древостоя в ландшафте Куршской косы.

Виды	Оси дифференциации							
	DIM__1	DIM__2	DIM__3	DIM__4	DIM__5	DIM__6	DIM__7	DIM__8
							Виды 1-го яруса	
Сосна обыкновенная	0,65	–0,00	–0,14	0,34	0,16	–0,10	0,58	–0,03
Сосна горная	0,45	–0,10	0,10	0,42	–0,34	0,68	–0,51	0,01
Ель	0,30	–0,05	–0,11	0,05	0,25	–0,01	–0,76	0,49
Береза	0,25	–0,04	–0,32	–0,30	–0,28	–0,44	–0,04	0,36
Ольха черная	–0,12	0,11	0,67	–0,18	0,12	–0,42	0,15	0,26
Дуб	–0,24	–0,49	–0,05	0,49	0,48	–0,21	–0,19	0,09
Липа	–0,62	–0,40	–0,40	0,06	–0,18	–0,03	0,05	0,02
Осина	–0,08	–0,23	0,19	–0,65	–0,26	0,08	–0,35	–0,37
Туя	–0,07	0,64	–0,69	0,01	0,12	–0,02	–0,00	–0,07
Клен	–0,65	0,08	0,52	–0,12	–0,04	0,26	–0,38	0,11
Ясень	–0,66	0,35	–0,10	0,14	0,33	0,08	0,21	0,25
Вяз	–0,28	–0,68	0,13	–0,40	–0,28	0,35	0,14	0,22
Виды 2-го яруса								
Ель	0,68	0,10	–0,16	–0,36	0,35	–0,34	–0,16	–0,38
Береза	0,20	0,14	–0,52	–0,42	–0,19	0,22	0,30	–0,14
Липа	–0,24	–0,81	–0,39	0,00	–0,26	–0,08	0,15	–0,31
Ольха черная	–0,16	0,33	0,58	–0,12	0,27	0,06	0,67	–0,31
Граб	–0,13	–0,66	–0,42	0,40	0,05	–0,59	0,02	–0,30
Сосна обыкновенная	0,49	0,23	0,31	0,01	–0,26	–0,23	0,47	–0,64
Клен	–0,60	0,59	0,15	–0,10	–0,05	0,07	0,10	–0,29
Дуб	–0,44	0,37	0,73	–0,25	0,16	0,13	0,00	–0,26
Каштан	–0,54	0,57	–0,62	0,11	–0,13	0,06	0,04	–0,04
Виды подроста								
Вяз	–0,39	–0,44	–0,09	0,19	0,12	0,28	0,23	0,78
Граб	–0,16	–0,68	–0,13	–0,50	–0,41	0,15	0,28	–0,28
Ель	0,47	0,18	–0,25	–0,40	0,44	–0,03	–0,57	–0,07
Сосна обыкновенная	0,50	0,10	–0,03	0,63	–0,74	–0,06	0,13	0,01
Сосна горная	0,31	–0,09	0,38	0,58	–0,68	0,40	–0,27	0,04
Дуб	0,27	–0,07	0,31	0,22	0,29	0,52	–0,27	–0,28
Ольха черная	0,20	–0,13	0,34	0,12	0,35	–0,77	–0,23	0,41
Береза	0,73	0,30	0,05	–0,07	–0,38	0,32	–0,15	0,20
Клен	–0,32	0,46	0,09	–0,27	0,15	0,32	0,01	0,31
Липа	–0,61	–0,02	–0,53	0,40	–0,02	–0,11	–0,09	0,13
Осина	0,11	–0,65	–0,10	–0,51	–0,02	–0,22	–0,28	–0,40
Ясень	–0,59	–0,36	0,22	–0,37	0,31	0,13	0,19	0,07
Каштан	–0,56	0,43	–0,12	–0,08	0,00	–0,06	–0,51	–0,27

Во-вторых, интерпретация может осуществляться статистическими способами. Значения интерпретируемой оси тем или иным способом проверяются на чувствительность к измеренным в поле переменным — индикаторам экологических условий. Например, значения той же первой оси дифференциации древостоя на Куршской косе

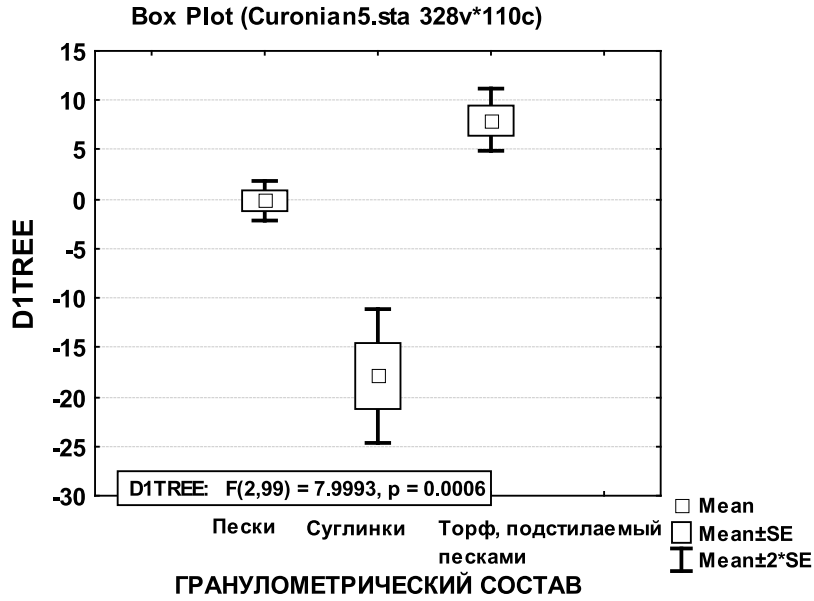

Рис. 21. Чувствительность первой оси дифференциации древостоя (d1tree) на Куршской косе (соотношение темнохвойных и широколиственных пород) к механическому составу почвообразующих отложений (TEXTURE).

четко различаются между классами почвообразующих отложений: на суглинистых почвах господствуют широколиственные виды (большие по модулю отрицательные значения), на почвах с торфянистым горизонтом, подстилаемым песками — хвойные породы и береза (большие по модулю положительные значения), на песках — значения близки к 0, что соответствует примерно равным соотношениям деревьев двух групп (точнее — перевес той или иной группы зависит от другого фактора, чаще всего — гигротопа) (рис. 21).

В-третьих, знание ландшафтной структуры конкретной территории позволяет использовать для интерпретации ареалы преобладания положительных или отрицательных значений оси. Так, высокие положительные значения первой оси дифференциации древостоя на Куршской косе приурочены к низменной части прикорневого призаливного сектора косы, где березово-сосново-еловые леса (так называемый «Королевский бор») произрастают на переувлажненных бедных торфянисто-подзолистых почвах. Отрицательные значения сосредоточены в районе так называемого «моренного острова» вблизи пос. Рыбачий, где благодаря суглинистому составу почв сформировались чисто широколиственные многопородные леса, а также на низкой пальве в прикорневой приморской части косы, где развиты черноольшанники с широколиственными породами на перегнойных почвах (рис. 22).

В-четвертых, часто физический смысл подсказывается корреляциями с уже интерпретированной осью дифференциации другого компонента или яруса фитоценоза. Например, существует положительная корреляция ($r = 0{,}5376$, $p = 0{,}000000001$) между первой осью дифференциации древостоя и второй осью дифференциации травостоя

на Куршской косе. Вторая ось дифференциации травостоя имеет высокие положительные значения при высоком обилии видов ожики волосистой (*Luzula pilosa*), седмичника европейского (*Trientalis europaeus*), щитовника австрийского (*Dryopteris austriaca*), луговика извилистого (*Deschampsia flexuosa*), мерингии бокоцветковой (*Moehringia lateriflora*), то есть видов бореальной эколого-ценотической группы. Отрицательные значения наблюдаются при высоком обилии сныти (*Aegopodium podagraria*), лунника оживающего (*Lunaria rediviva*), таволги вязолистной (*Filipendula ulmaria*), крапивы двудомной (*Urtica dioica*), гравилата речного (*Geum rivalis*), то есть видов неморальной и нитрофильной эколого-ценотических групп, требовательных к минеральному питанию, в том числе к содержанию азота. Специфическим локальным источником азота

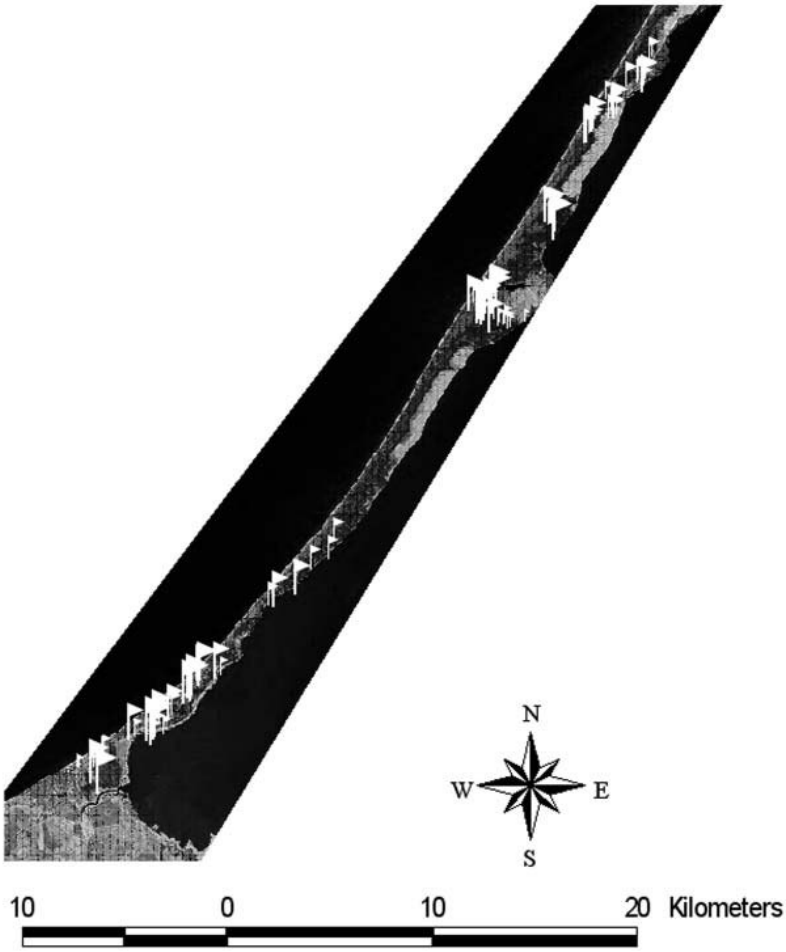

Рис. 22. Пространственное распределение значений первой оси дифференциации древостоя на Куршской косе (южный сектор). Малые флажки — высокое обилие мегатрофных пород, крупные флажки — высокое обилие олиготрофных и мезотрофных пород.

на Куршской косе служат отходы жизнедеятельности кабанов, которые в широколиственных лесах весьма активны и в местах скопления могут полностью уничтожать травяный ярус.

Снижение размерности данных методом многомерного шкалирования показало, что варьирование значений абсолютного большинства измеренных в поле переменных во всех регионах описывается мультирегрессионным уравнением второй степени на 60–80% четырьмя независимыми осями. Для примера приводится таблица для Архангельского полигона «Заячья» (табл. 8). Хуже качество описания механического состава и цветовых характеристик почв, лучше — деревьев, мхов, мощности почвенных горизонтов.

Таблица. 8.

Качество описания измеренных в поле характеристик компонентов ландшафта четырьмя осями многомерного шкалирования (уравнение множественной регрессии второй степени). Коэффициент детерминации (описанная дисперсия в долях от 1) Архангельская область. Среднетаежный полигон «Заячья»

		R^2 Уравнение второй степени	R^2 Уравнение первой степени			R^2 Уравнение второй степени
1	***2***	***3***	***4***	***5***	***6***	***7***
Деревья				Мощность почвенных горизонтов		
PINUS	Сосна обыкновенная, 1-й ярус	0,81	0,68	ORG	Суммарная мощность органогенных горизонтов	0,80
PICEA	Ель европейская, 1-й ярус	0,85	0,66	PODZOL	Суммарная мощность оподзоленных горизонтов	0,81
BETULA	Береза повислая, 1-й ярус	0,74	0,66	HUMUS	Суммарная мощность гумусированных горизонтов	0,81
POPULUS	Осина, 1-й ярус	0,68	0,48	AT		0,69
ALNUS	Ольха серая, 1-й ярус	0,75	0,51	AP		0,69
PINR	Сосна, подрост	0,69	0,33	A1		0,76
PICEAR	Ель, подрост	0,64	0,57	A1A2		0,86
BETULAR	Береза, подрост	0,64	0,55	A2		0,89
POPULR	Осина, подрост	0,63	0,51	EL		0,87
ALNUSR	Ольха серая, подрост	0,67	0,63	BFEH		0,51
SORBUS	Рябина обыкновенная	0,82		ELB		0, 82
Кустарники				Цвет почв		

Таблица (*продолжение*)

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*
JUNIPER	Можжевельник обыкновенный	0,85		HUE_5	Hue — Оттенок, Value — Яркость, Chroma — Цветность. Цифра — глубина в см.	0,44
RUBUS	Малина обыкновенная	0,74		VALUE_5		0,31
RIBES	Смородина черная	0,56		CHROMA_5		0,36
PADUS	Черемуха	0,71		HUE_1O		0,61
ROSA	Шиповник майский	0,65		VALUE_10		0,38
LONICERA	Жимолость лесная	0,55		CHROM_10		0,43
RHAMNUS	Крушина ломкая	0,68		HUE_15		0,49
DAPHNE	Вольчьеягодник обыкновенный	0,41		VALUE_15		0,43
Мхи				CHROM_15		0,43
PLEUROZ	Плеуроциум Шребера	0,52		HUE_20		0,58
POLYTRIC	Кукушкин лен	0,70		VALUE_20		0,58
SPHAGNUM	Сфагнум (все виды)	0,71	0,41	CHROM_20		0,38
Кустарнички				HUE_25		0,56
VACMYRT	Черника	0,98	0,57	VALUE_25		0,49
VACVIT	Брусника	0,95	0,47	CHROM_25		0,36
CALLUNA	Вереск обыкновенный	0,76		HUE_30		0,49
VACULIGI	Голубика	0,73		VALUE_30		0,43
OXYCOCC	Клюква обыкновенная	0,91		CHROM_30		0,39
CASSANDR	Мирт болотный	0,74		HUE_35		0,65
LEDUM	Багульник болотный	0,66		VALUE_35		0,47
Травы (избранные виды)				CHROM_35		0,59
RUBSHAM	Морошка	0,79		HUE_40		0,66
RUBSAXAT	Костяника	0,98		VALUE_40		0,49
OXALIS	Кислица обыкновенная	0,58		CHROM_40		0,65
PYROLA	Грушанка круглолистная	0,27		HUE_45		0,70
TRIENT	Седмичник европейский	0,44		VALUE_45		0,56
MAJANTH	Майник двулистный	0,49		CHROM_45		0,61
LUZULA	Ожика волосистая	0,58		HUE_50		0,65
LINNEA	Линнея северная	0,34		VALUE_50		0,32
ASARUM	Копытень европейский	0,48		CHROM_50		0,57

Таблица (*окончание*)

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*
AEGOPOD	Сныть обыкновенная	0,68		Механический состав почв		
PULMONAR	Медуница неясная	0,62		TEXT5	5 см	0,30
PARIS	Вороний глаз четырехлистный	0,46		TEXT10	10 см	0,31
OROBUS	Чина весенняя	0,71		TEXT15	15 см	0,35
FILIPEND	Таволга вязолистная	0,60		TEXT20	20 см	0,31
ACONITUM	Борец северный	0,80		TEXT25	25 см	0,34
URTICA	Крапива двудомная	0,47		TEXT30	30 см	0,39
GEUM	Гравилат речной	0,57		TEXT35	35 см	0,43
HERACLEU	Борщевик сибирский	0,71		TEXT40	40 см	0,45
JUNCUS	Ситник болотный	0,27		TEXT45	45 см	0,40
ORCHIS	Ятрышник мужской	0,43		TEXT50	50 см	0,31
				TEXT55	55 см	0,25
				TEXT60	60 см	0,27

Результаты интерпретации осей дифференциации свойств ландшафта (табл. 6) показывают, что ведущими факторами для всех компонентов во всех регионах являются влажность и трофность. Именно так интерпретируются оси, которые описывают основную часть варьирования и, соответственно, имеют номер 1 или 2.

Ось трофности трактуется как обеспеченность почв и вод, главным образом, основаниями. Это свойство отражается на соотношении в ландшафте свойств, присущих более северным и более южным ландшафтным зонам и подзонам, чем та, к которой приурочен полигон исследования. Например, в зоне смешанных лесов (Куршская коса и Удмуртия) свойства, подчиняющиеся оси трофности, отражают соотношение признаков, свойственных таежным и широколиственнолесным ландшафтам. Азотообеспеченность выделена как отдельная ось, поскольку в геоботанике давно выделена нитрофильная группа видов (Смирнов и др., 2006), образующая очень своеобразные легко распознаваемые на местности сообщества.

Ось трофности определяет основную часть варьирования видового состава древесного яруса на всех полигонах кроме Обского, кустарникового яруса — на Архангельском («Заячья») и Куршском полигонах, травяного яруса — на Архангельском, Обском, Костромском полигонах. Для видового состава кустарничкового яруса и строения почвенного профиля (мощности горизонтов) обеспеченность минеральным питанием стоит на втором месте после фактора влажности. В средней тайге (Архангельский и Обский полигоны) относительно богатое минеральное питание выражается в повышенной доле в древостое осины, пихты, в кустарниковом ярусе — в повышении закустаренности в целом и обилия жимолости в частности, в кустарничковом ярусе — в росте обилия черники по сравнению с брусникой и видами олиготрофных болот, в

травостое — в росте обилия видов неморальной группы (сныть, медуница, копытень, вороний глаз, сочевичник и др.), в почвенном профиле — в появлении лиственной подстилки, гумусового и сокращении элювиального горизонта. При пониженном минеральном питании в естественных лесах господство переходит в древостое к ели, сосне, при восстановительной сукцессии — к березе; в кустарниковом ярусе могут господствовать волчьеягодник, крушина; в кустарничковом — брусника; в травяном — виды бореальной и боровой групп (седмичник, линнея, майник, ожика волосистая, плауны, кошачья лапка и др.); в почвенном профиле растет мощность элювиальных горизонтов и исчезает гумусовый. В южной тайге (Костромская область) и зоне смешанных лесов (Куршская коса и Удмуртия) в древесном ярусе индикаторами повышенного минерального питания могут быть широколиственные виды деревьев (липа, клен, вяз, дуб, на Куршской косе — также ясень, граб и каштан); в кустарниковом ярусе важное место занимают лещина и бересклет.

Ось влажности во всех случаях входит либо в первую пару (чаще), либо в первую тройку главных факторов. Это неслучайно и достаточно очевидно, поскольку перераспределение влаги является важнейшим следствием разнообразия форм рельефа и положения геологических границ, определяющего места разгрузки грунтовых вод.

Ось влажности является главной во всех регионах для кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов и строения почвенного профиля. Это объясняется, очевидно, главным ландшафтным контрастом всех исследованных территорий (кроме степной) — суходольных и болотных урочищ. На болотах господствуют клюква, морошка, мирт, подбел, багульник, сфагновые мхи, в суходольных урочищах — черника, брусника, зеленые мхи (преимущественно *Pleurozium schreberii*, в Западной Сибири также *Hylocomium splendens*). Для мохово-лишайникового яруса практически во всех регионах действуют два фактора влажности, но в разных масштабах. Одна из осей влажности чувствительна к уровню типов ландшафтов и отделяет болотные ПТК со сфагновыми мхами и торфяным горизонтом мощностью более 25 см от зональных лесных ПТК с господством долгих, зеленых, мхов или лишайников и наличием элювиальных горизонтов почв (в том числе под торфянистым, который имеет мощность до 15–20 см).

На Обском полигоне в одну группу попали урочища верховых болот со сфагновыми мхами, в другую — зональные таежные урочища преимущественно с *Pleurozium schreberii и Hylocomium splendens*. Вторая же ось влажности отразила различия видов свежих урочищ вершин и склонов бугров и влажных, но не заболоченных межбугровых понижений. В первых представлены *Pleurozium schreberii* и *Hylocomium splendens* с некоторым перевесом последнего, во вторых — явно преобладает *Pleurozium schreberii.* Еще одна ось дифференциации мохово-лишайникового покрова отражает разные соотношения *Pleurozium schreberii* и *Polytrichum commune* по мере постепенной смены суходольных фаций сырыми приболотными или при переходе от дренированных водораздельных урочищ к урочищам вобосборных понижений. Следует отметить, что для древесного яруса влажность является главным фактором только для Обского полигона. Это объясняется тем, что видовой состав древостоя в Западной Сибири достаточно четко различается в зависимости от гигротопа. На болотах господствует сосна (при подчиненном значении кедра и березы), в дренированных — кедр, ель, пихта, осина. На остальных лесных полигонах такого жесткого противопоставления нет, так как один и тот же вид сосны *Pinus silvestris* благодаря высокой экологической пластичности не только присутствует, но и может составлять фон и на болотах, и в дренированных урочищах.

В строении почвенного профиля ось влажности отражается двояко. С одной стороны практически во всех регионах противопоставляются почвы с застойным режимом, т.е. с преобладанием торфонакопления, почвам с преобладанием промывного режима и наличием элювиальных или гумусовых горизонтов (1-я ось для Архангельского, Удмуртского, Обского, Куршского полигонов). С другой стороны, одна из осей влажности может отражать фациальные различия в лесных урочищах: интенсивность трансформации подстилки в гумус в зависимости от увлажненности (3-я ось для Удмуртии), соотношения торфонакопления и подзолообразования (4-я ось для Архангельского полигона), соотношение накопления перегноя и гумуса в почвах с богатым минеральным питанием (1-я ось для Куршского полигона). Близкий смысл имеют первые оси влажности для цветовых характеристик почв. Они разделяют почвы с восстановительной и окислительной средой, т.е., соответственно, с высокими (2,5Y, 5Y, 5GY, 5BG) и низкими (5YR, 7,5YR, 10YR) значениями оттенка (Hue). При этом высокое значение Hue сопровождается низким значением цветности Chroma, что соответствует обезжелезнению глеевых горизонтов, и наоборот. Из литературных данных известно, что для цветности имеет значение не общее количество железа, а содержание растворимых форм (Banfield, Bascomb, 1976; Khan, Fenton, 1996), состав железосодержащих минералов (Ромашкевич, Ильичев, 1992; Ulery, Graham, 1993), степень окристаллизованности (McKeague, Day, 1966).

Ось сукцессии. Помимо взаимонезависимых осей трофности и влажности для многих свойств фитоценоза и почв имеет большое значение принадлежность к той или иной стадии восстановительной сукцессии после рубок или наследие антропогенного воздействия в виде старопахотных горизонтов почв. Все полигоны, так или иначе, представляют собой арену проявления разнообразных стадий развития фитоценоза и почв после рубок, распашки или пожаров. Их наследие отражается в разнообразных соотношениях зональных и сукцессионных видов, зональных (гумусового, подзолистого) и антропогенных (пахотного, антропогенно-турбированного) горизонтов почв. Определение вклада сукцессионного фактора имеет принципиальное значение, так как он способен создавать наиболее физиономичные церты растительного и почвенного покрова, маскирующие действие естественных факторов.

Для Архангельского полигона с его наиболее бедным среди всех полигонов видовым составом древостоя сукцессионный фактор дифференциации древостоя выходит на первое место (соотношение еловых и березово-сосновых сообществ). В Удмуртии, где видовое разнообразие деревьев значительно богаче, сукцессионный фактор уступает по значимости двум факторам трофности. Естественные фоновые контрасты образуются двумя главными литогенными факторами. Первая ось отражает контрасты между пихтово-еловыми лесами в более бедных местообитаниях на песчаных почвах и широколиственными — на более богатых супесчано-легкосуглинистых почвах (точнее — между смешанными древостоями с противоположным соотношением этих двух групп пород). Вторая ось выделяет сосняки на наиболее мощных флювиогляциальных песках, прислоненных к нижним частям склонов, и на террасах. Им противопоставляются леса с преобладанием пихтово-широколиственных лесов на наиболее богатых легкосуглинистых почвах. На этом фоне третьестепенная по значению ось (фактор сукцессии) отличает 30–40-летние вторичные леса с господством осины, березы, серой ольхи, ивы от старовозрастных зональных лесов — пихтово-еловых, пихтово-елово-сосновых (на песках), липово-пихтовых, пихтово-елово-вязовых с участием клена, липы, дуба в подросте (на

супесчаных или легкосуглинистых почвах). Отметим, что в средней тайге в большинстве случаев восстановительная сукцессия идет через березу или осину (за исключением песчаных почв) и за несколько десятилетий после рубки состав древостоя меняется коренным образом. В отличие от этого, в зоне хвойно-широколиственных лесов в Удмуртии сукцессия может идти через липу, вяз, дуб, то есть те же породы, которые могут участвовать в формировании полога коренных лесов. Поэтому сукцессионный фактор состава древостоя занимает лишь третье место по значимости.

Для Костромского и Кологривского полигонов сукцессионный фактор уступает по значимости факторам трофности, влажности, механического состава. Соответствующие оси отделяют леса с преобладанием мелколиственных пород (березовые, осиновые, сероольховые с подростом ели) от зональных пихтово-еловых и широколиственно-хвойных лесов. Своеобразный смысл имеет сукцессионный фактор для Куршского полигона. Там видовой состав древостоя также чрезвычайно богат, причем с присутствием экзотических видов-интродуцентов (туя гигантская, каштан конский, черемуха Маака, черемуха поздняя, тополь бальзамический, орех серый, сосна горная, сосна черная, сосна Банкса (Гришанов, 2007)). Сукцессионный фактор является четвертым по значимости после факторов трофности, экзотичности (присутствие интродуцированных видов) и влажности. Соответствующая ось придает противоположные значения 20–40-летним лесам, восстанавливающимся естественным образом после рубки (преимущественно березовым) на слабодренированной низкой пальве, и лесам с посадками сосны обыкновенной (*Pinus silvestris*) и сосны горной (*Pinus mugo*) на хорошо дренированной высокой пальве и сухих песчаных дюнах. При этом старовозрастные леса с составом близким к естественному (березово-еловые, дубово-черноольхово-еловые и дубово-ясенево-черноольховые) безразличны к данному фактору, то есть располагаются вблизи нулевых значений оси.

Сукцессионная стадия имеет значение не только для структуры фитоценоза, но и для почвенного профиля. Так, наличие или отсутствие старопахотного горизонта отражают 4-я ось дифференциации почвенного профиля для Удмуртского полигона, 2-я ось для полигона «Козловка» в Архангельской области, 3-я ось для Костромского полигона. Иногда показателем недавних нарушений лесного покрова и положения на ранней стадии восстановительной сукцессии является повышенная мощность дернового или гумусового горизонта как следствия повышенной доли злаков под редкостойными молодыми сосняками (1-я ось для Куршского полигона), или бореального мелкотравья под осинниками (3-я ось для Обского полигона).

Из приведенных данных по «весу» сукцессионного фактора в видовом составе фитоценозов следует, что наблюдаемый облик вторичных лесов может существенно маскировать реальную ландшафтную мозаику, особенно в среднетаежных регионах с относительно бедным видовым составом древостоя. При высоком видовом разнообразии в южной тайге и смешанных лесах наблюдаемая структура даже вторичного фитоценоза может служить более явным индикатором почвенно-гидрологических условий.

Ось азотообеспеченности выделяет ПТК небольшие по занимаемой площади, но важные для понимания пространственной структуры и латеральных взаимодействий ее элементов. Сложность идентификации этого фактора связана с частым совмещением в пространстве ПТК с повышенным увлажнением и с повышенной обеспеченностью азотом. Это ярко проявляется в преобладании видов растений нитрофильной эколого-ценотической группы в травяном и кустарниковом ярусах на поймах, в местах

разгрузки грунтовых вод на склонах и у их подножий. Так, 1-я ось дифференциации травостоя в Удмуртии выделяет ПТК с высоким обилием борца, крапивы, противопоставляя сообществам с орляком, вейником, ортилией, ожикой, седмичником. На Куршской косе целая местность низкой пальве сочетает в себе черты высокой нитрофильности и гидрофильности (2-я ось дифференциации травостоя) — сообщества со снытью, борцом, гравилатом, таволгой, крапивой. Они противопоставляются сообществам с луговиком извилистым, мерингией, седмичником, щитовником австрийским. Кроме того осью азотообеспеченности различаются сообщества зарастающих вырубок, засоренных лесов на месте удобрявшихся пашен. Примером может служить 2-я ось дифференциации кустарников на полигоне «Козловка» в Архангельской области, которая выделяет сообщества с повышенной долей смородины черной или малины.

Ось опесчаненности имеет отдельное значение по сравнению с осью трофности, несмотря на близкий смысл, связанный с обедненностью песков питательными веществами, по сравнению с суглинками. Однако бывают случаи нарушения прямого соответствия: например, когда происходит разгрузка богатых грунтовых вод на склоне или на пойме через песчаные почвы. Если ось трофности может в одну группу отнести ПТК с бореальными и боровыми видами на кислых почвах с хорошо развитыми элювиальными горизонтами, то ось опесчаненности выделит в отдельную категорию боровые геосистемы песчаных террас или водноледниковых равнин с самыми бедными почвами – подзолами. Такой смысл имеет 2-я ось дифференциации древостоя для Костромского полигона, разделяющая среди южнотаежных ПТК, с одной стороны, сосновые леса на песках и лиственнично-сосновые на песках пылеватых, с другой стороны — пихтово-еловые леса на суглинках или двучленных песчано-суглинистых и лессовидных отложениях. В Удмуртии 2-я ось дифференциации кустарников противопоставляет сообщества с высоким обилием можжевельника и шиповника на песках сообществам с высоким обилием бузины, черемухи, красной смородины, калины на двучленных отложениях и суглинках.

Ось освещенности интерпретируется по связи с сомкнутостью крон, по присутствию луговых видов под лесным пологом. Например, 3-я ось дифференциации травостоя для Обского полигона выделяет сообщества с иван-чаем, вейником, ястребинкой, формирующиеся под слабосомкнутыми (сомкнутость крон 0,2–0,4) березняками, осинниками, сосняками.

Ось промерзания значима для Обского полигона, где степень выраженности серогумусового (AY) и элювиального (EL) горизонтов зависит от положения кровли длительно-сезонно-мерзлого криометаморфического горизонта CRM. При позднем оттаивании почв элювиально-иллювиальное перераспределение блокируется, и формирование четко выраженного элювиального горизонта становится невозможным. Вместо него в верхней части профиля характерна слабодифференцированная толща с постепенным переходом от горизонта AEL к горизонту ELB. Две группы геосистем со слабодифференцированным и с хорошо дифференцированным профилем светлоземов различаются 4-й осью дифференциации мощностей почвенных горизонтов и 4-й осью дифференциации цветовых характеристик почв. Напомним, что порядковый номер оси соответствует ее вкладу в пространственную дифференциацию, поэтому значимость фактора промерзания на Обском полигоне существенно меньше, чем факторов влажности и трофности.

Установив физический смысл главных осей дифференциации свойств компонентов для каждого региона, мы можем на следующем этапе оценить тесноту межкомпонент-

ных связей (между осями дифференциации компонентов) и сравнить значимость разных видов межкомпонентных связей между регионами. Следует еще раз подчеркнуть, что оси дифференциации одной группы свойств (например, древостоя) взаимонезависимы, но вполне закономерна связь между осями разных групп свойств (например, древостоя и травостоя).

4.2. Межрегиональный анализ внутриуровенной вертикальной структуры

Основной вопрос этого этапа исследования формулируется так: *являются ли те или иные виды связей универсальными для разных регионов; выдерживается ли в разных регионах соотношение значимостей видов связей?* Предметом анализа являются внутриуровенные связи, то есть вертикальные отношения между компонентами ландшафта без учета рамочных условий, создаваемых геосистемами более высокого ранга. Этот аспект можно назвать «экологическим», если следовать пониманию связей между природными телами как привилегии экологического подхода (который в России в этом контексте называется ландшафтным). Такое понимание экологического подхода распространено в англоязычной науке (например, Ndubisi, 2002).

Для каждого полигона построены модели межкомпонентных связей, в которых та или иная мера чувствительности компонента к экологическому фактору, выраженная значениями «оси», выступает как зависимая переменная. В качестве независимых переменных выступают четыре главных по значимости оси дифференциации другого компонента или другого яруса фитоценоза. Предметом сравнения служат: а) факт статистической достоверности модели (наличие или отсутствие связи), б) коэффициенты детерминации уравнения (сила связи), в) значения регрессионных коэффициентов (количественный вклад каждой независимой переменной) и г) знак регрессионных коэффициентов (положительная или отрицательная связь), д) вклад нелинейной составляющей.

Объясним смысл дополнительной информации, которую дает для ландшафтного исследования построение мультирегрессионных уравнений второй степени по сравнению с простыми параметрическими и непараметрическими коэффициентами корреляции между свойствми компонентов ландшафта. Как и коэффициенты корреляции, такой способ позволяет не только установить факт сопряженного варьирования зависимой переменной с каждой из независимых, но и сравнить вклады независимых друг от друга переменных. Появляется возможность оценить вклад нелинейной составляющей, если значимы регрессионные коэффициенты первой и/или второй степени при той или иной независимой переменной. Наконец, появляется возможность оценить вклад неаддитивных эффектов совместного действия нескольких факторов, если значимы коэффициенты при членах типа $a*x_1*x_2$. Тогда можно говорить о наличии эмерджентных эффектов взаимодействия компонентов. Например, хорошо известно, что предрасположенность некоторых влаголюбивых видов растений к поглощению влаги из почвы может блокироваться одновременным действием низких температур (явление физиологической сухости).

Следует отметить, что понятия «зависимые» и «независимые» переменные в данном случае абсолютно условны. В качестве косвенного способа отделения обратной связи от одностороннего влияния можно предложить сопоставление рядов значимости групп свойств друг для друга. Например, чувствительные к трофности свойства травостоя

обнаруживают тесную связь с осью гумусированности почв. Легко предположить двусторонний эффект, то есть обратную связь: злаки способствуют накоплению гумуса, а накопление гумуса благоприятно для повышения продуктивности злаков. Если это основной механизм регулирования обоих свойств ландшафта, тогда гумус должен стоять на первом месте среди других возможных факторов, влияющих на травостой. И наоборот, среди факторов гумусирования на первом месте должен стоять травостой. Если же среди факторов, предположительно влияющих на гумусное состояние почвы, свойства травостоя уступают по значимости (по величине коэффициента детерминации), например, интенсивности механического переноса вещества, то основной причиной большой мощности гумусового горизонта может оказаться механический намыв, а причиной малой мощности — смыв с крутых склонов.

Проиллюстрируем сказанное на примере свойств травостоя среднетаежного ландшафта Архангельского полигона, чувствительных к трофности местообитания.

Первая ось дифференциации травостоя отражает противоположное поведение в ландшафте, с одной стороны, группы мегатрофных видов неморальной и нитрофильной групп, (борец, крапива, сныть, таволга, медуница, вороний глаз), с другой стороны — олиготрофных и мезотрофных видов бореальной, боровой, гидрофильной групп, способных произрастать на бедных почвах (ожика волосистая, плаун булавовидный, ситник, ятрышник мужской). Проверим, в какой степени это свойство травостоя описывается 4-мя осями дифференциации мощностей генетических горизонтов почв. Мультирегрессионное уравнение первой степени обеспечивает описание лишь 35% варьирования. Уравнение второй степени значимо с коэффициентом детерминации 0,45, т.е. описывает 45% варьирования. Оба уравнения показывают значимость 2-й, 3-й и 4-й осей дифференциации почвенных горизонтов, причем ни для одной из них вторая степень не значима (табл. 9). Отметим, что непосредственно как ось обеспеченности почв основаниями может интерпретироваться лишь 2-я (D2hor). Она различает почвы, в которых велика мощность гумусового или перегнойного горизонта, но отсутствует или слабо выражен элювиальный, и наоборот. Существует более или менее линейная связь гумусированности/оподзоленности (2 ось) с исследуемым свойством травостоя (рис. 23). Графики для 3-й и 4-й оси показывают рассеяние точек по плоскости, но с явно выраженным сектором «запрещенных» сочетаний свойств почв и травостоя (рис. 24, 25). 3-я ось дифференциации почвенных горизонтов отражает наличие близкой верховодки, в результате чего в песчано-супесчаном плаще может формироваться иллювиально-железисто-гумусовый горизонт BFH либо перегнойный горизонт при одновременном наличии элювиального горизонта. Такой процесс формирования вложенного субпрофиля альфегумусового подзола, описан для района в работе И.А. Горбуновой и И.П. Гавриловой (2002). Подобные профили 3-я ось противопоставляет почвам с простой сменой горизонта EL переходным ELB. Следовательно, появление или отсутствие неморальных видов в тайге в некоторой степени определяется возможностью процесса формирования высокой верховодки и перегнойного горизонта. При этом урочища с вложенным субпрофилем альфегумусового подзола «запрещают» появление неморальных и нитрофильных видов. 4-я ось определяет соотношение торфонакопления и оподзоливания и фактически «запрещает» наличие неморальных видов даже при небольшом торфонакоплении.

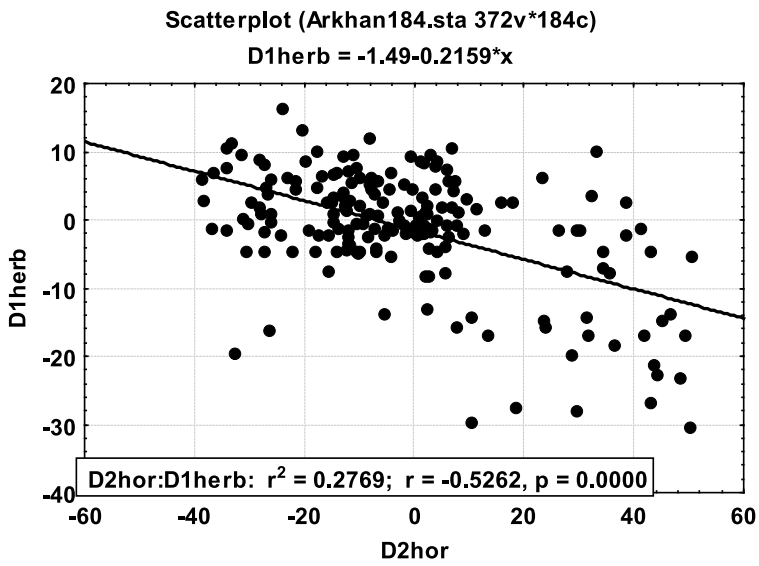

Рис. 23. Линейная связь соотношения гумусированности/оподзоленности (d2hor) с соотношением мегатрофных и олиготрофных видов травостоя (d1herb). Среднетаежный полигон «Заячья» в Архангельской области.

Таблица. 9.

Уравнение второй степени зависимости первой оси дифференциации травостоя (ось трофности) от четырех осей дифференциации мощности почвенных горизонтов. Регрессионные коэффициенты содержатся в первом столбике. Среднетаежный ландшафт в Архангельской области, полигон «Заячья».

D1hor…D4hor — оси дифференциации мощности почвенных горизонтов.

	Коэффициент	**Стандартная ошибка**	**t-критерий**	**p**
Intercept	–1,12	1,37	–0,82	0,42
D1hor	0,02	0,03	0,87	0,38
D1hor^2	0,00	0,00	0,48	0,63
D2hor	***–0,16***	***0,03***	***–4,86***	***0,00***
D2hor^2	–0,00	0,00	–1,29	0,20
D3hor	***0,10***	***0,02***	***4,14***	***0,00***
D3hor^2	0,00	0,00	0,05	0,96
D4hor	***0,06***	***0,03***	***2,05***	***0,04***
D4hor^2	–0,00	0,00	–0,66	0,51
D1hor*D2hor	0,00	0,00	0,01	0,99
D1hor*D3hor	–0,00	0,00	–1,66	0,10
D2hor*D3hor	***0,01***	***0,00***	***4,06***	***0,00***
D1hor*D4hor	–0,00	0,00	–0,26	0,79
D2hor*D4hor	***0,00***	***0,00***	***1,99***	***0,05***
D3hor*D4hor	***–0,00***	***0,00***	***–2,77***	***0,01***

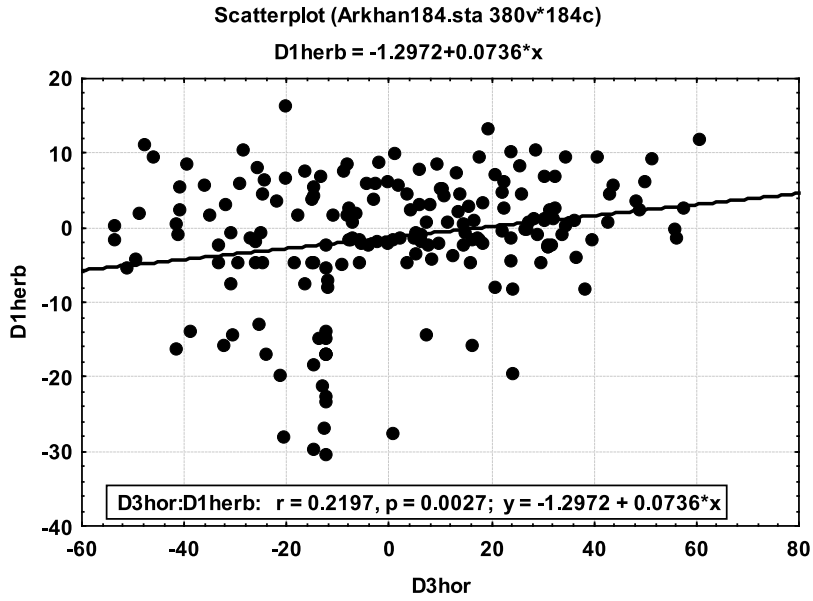

Рис. 24. Связь оси наличия вложенного альфегумусового подзола (d3hor) с соотношением мегатрофных и олиготрофных видов травостоя (d1herb). Среднетаежный полигон «Заячья» в Архангельской области.

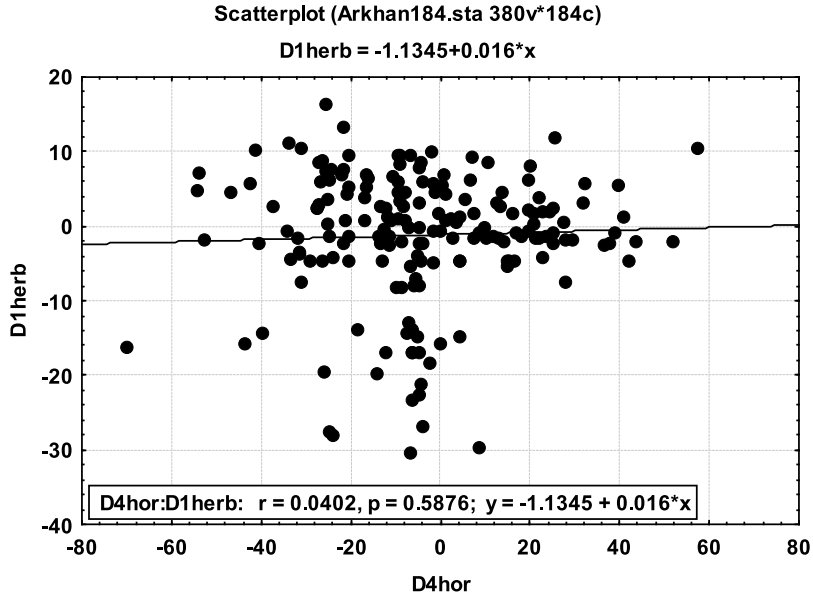

Рис. 25. Связь оси соотношения торфонакопления и оподзоливания (d4hor) с соотношением мегатрофных и олиготрофных видов травостоя (d1herb). Среднетаежный полигон «Заячья» в Архангельской области.

В уравнении 2-й степени значимы неаддитивные эффекты совместного действия 2-й, 3-й и 4-й осей дифференциации почвенных горизонтов. Следовательно, высокое обилие группы требовательных к питанию видов достигается при сочетании не только повышенного содержания гумуса и оснований в почве (2-я ось), но и хотя бы периодически промывного водного режима (4-я ось) и наличия близкой верховодки (3-я ось). Наличие близкой верховодки при отсутствии торфонакопления (сочетание отрицательных значений 3-й и 4-й осей) может обусловливать рост обилия требовательных к трофности видов (рис. 26). Для того чтобы все виды этой группы присутствовали в фитоценозе недостаточно только высокой трофности: при недостаточном увлажнении сныть и вороний глаз останутся в фитоценозе, а таволга и борец выпадут. Также недостаточно только повышенного (например, пойменного) увлажнения: сныть и вороний глаз при слишком большом избытке влаги исчезнут. Недостаточно и только промывного режима с возможностью оподзоливания: сформируется сообщество чисто бореального облика. Таким образом, соотношение видов трав с противоположной требовательностью к трофности местообитания является результатом эмерджентного эффекта совместного действия нескольких факторов.

Для сравнительного анализа структуры внутриуровенных межкомпонентных связей предлагается два способа:

а) расчет сумм коэффициентов детерминации (КД) (или среднего коэффициента детерминации) группы свойств компонента группой свойств других компонентов),

б) канонический анализ.

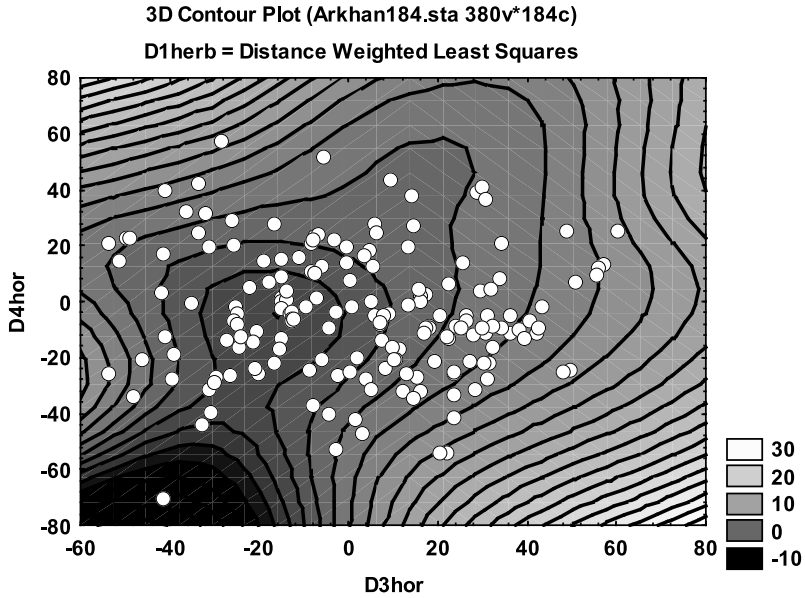

Рис. 26. Эмерджентный эффект близкого залегания верховодки и отсутствия торфонакопления для обилия неморальных и нитрофильных видов травостоя в Архангельской области (среднетаежный полигон «Заячья»). Наличие близкой верховодки при отсутствии торфонакопления (сочетание отрицательных значений 3-й и 4-й осей) может обусловливать повышение обилия требовательных к трофности видов.

Оперирование не отдельными осями-свойствами, а совокупностью осей позволяет давать целостную оценку компонента в отношениях его с другими компонентами. Необходимо принимать во внимание, что индивидуальные признаки (обилия конкретных видов, мощность или механический состав того или иного почвенного горизонта и др.) могут подчиняться сразу нескольким экологическим градиентам, выражаемым осями. Тем самым мы получаем возможность оценивать степень общности компонентов ландшафта, охарактеризованных множеством признаков, которые отражают суперпозицию нескольких экологических факторов.

Первый из способов начинается с расчета коэффициентов детерминации для каждой из четырех осей, характеризующих связь компонента (древостой, травостой, мощности почвенных горизонтов и т.д.), с совокупным действием четырех осей дифференциации каждого из остальных компонентов. Затем осуществляем осреднение полученных коэффициентов детерминации с целью охарактеризовать среднюю чувствительность компонента по всей совокупности его признаков с другим компонентом. Наконец, сравниваем осредненные коэффициенты детерминации, характеризующие связи данного компонента со всеми остальными компонентами. Определяем максимальный осредненный коэффициент детерминации среди связей данного компонента со всеми остальными. Ему придается смысл наивысшей сопряженности с исследуемым компонентом. Строго говоря, наивысший осредненный КД необязательно означает причинно-следственную связь-взаимодействие, а скорее высокую *общность факторов дифференциации*. Отражаем на схеме стрелками (рис. 27) приоритетную межкомпонентную связь для данного компонента (при близких значениях осредненного коэффициента детерминации возможны несколько приоритетных связей), делая пометку о принадлежности к региону, в котором зафиксирован данный факт. Аналогично выявляем и наносим на схему приоритетные связи для каждого компонента. Выделяем *связи, которые можно интерпретировать как двусторонние*: то есть *для каждого из двух компонентов данная связь является приоритетной* (т.е. существует наивысшая общность факторов дифференциации) и поэтому можно предполагать причинно-следственную обратную связь. На этом этапе мы пока не можем рассуждать о причинах этой общности: объясняется ли она взаимодействиями по принципу обратной связи, общей подчиненностью некому третьему компоненту или определяющим влиянием рамочных условий со стороны одной или нескольких вмещающих геосистем. Допустим вариант объяснения с вкладами всех перечисленных причин с разной значимостью. Такие объяснения будут рассматриваться в данной работе на более поздних этапах полимасштабного анализа.

Процедура повторяется для других полигонов. В результате на схеме (рис. 27) отражено, какие межкомпонентные связи являются приоритетными в нескольких или во всех регионах и потому могут считаться универсальными, а какие следует относить к регионально специфичным. Двусторонние стрелки означают, что данная пара компонентов может в некоторых регионах (обозначенных жирным курсивом) быть взаимно приоритетной. Иначе говоря, для обоих компонентов нет более прочных связей, чем друг с другом. Простым курсивом обозначены регионы, в которых наблюдается односторонне приоритетная связь. Это означает, что для одного компонента связь с другим является приоритетной среди других связей, но не наоборот. Тогда цифра, обозначающая регион, расположена на рисунке ближе к тому компоненту, ля которого данная

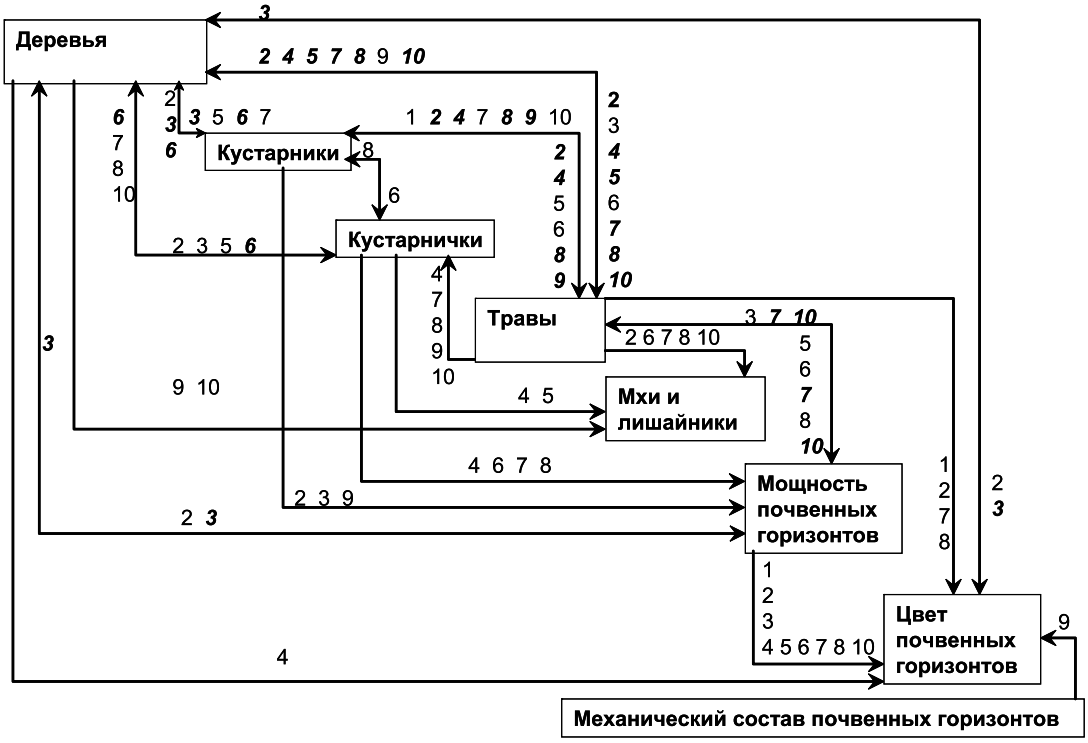

Рис. 27. Региональная специфика межкомпонентных связей (пояснения см. в тексте).
Полигоны исследования: 1 — Буртинская степь (С), 2 — Куршская коса (ХШЛ), 3 — Удмуртия (ХШЛ), 4 — Кострома (ЮТ), 5 — Кологрив (ЮТ), 6 — Архангельск-Заячья (СТ), 7 — Архангельск-Медвежий (СТ), 8 — Архангельск-трансект (СТ), 9 — Архангельск-Козловка (СТ), 10 — Обь (СТ). С — степь, ХШЛ — хвойно-широколиственные леса, ЮТ — южная тайга, СТ — средняя тайга.

связь является приоритетной. Если данная связь не бывает двусторонне приоритетной, то односторонняя стрелка направлена к тому компоненту, для которого она является приоритетной. Таким способом мы проверяем межкомпонентные связи на устойчивость в разных регионах и при разных территориальных охватах данных (точнее — уровнях ландшафтного разнообразия)

Второй способ подразумевает расчет канонических коэффициентов корреляции между группами свойств, характеризующими каждый компонент.

Предметами сравнительного анализа межрегиональной устойчивости межкомпонентных связей служат:

а) наиболее сильно влияющие компоненты — с наиболее высокой вероятностью управляемые теми же факторами, что и зависимый компонент;

б) регион, в котором зависимость от того или иного компонента проявляется в наибольшей степени, т.е. с наибольшей вероятностью существует общность факторов дифференциации;

в) степень ландшафтного разнообразия, при которой максимальна зависимость от того или иного компонента (количество типов, родов, видов ПТК; степень сопряженности-близости описанных ПТК в пространстве).

Опишем результаты анализа межрегиональной устойчивости межкомпонентных связей на примере травяного яруса фитоценоза.

Травостой — компонент (а точнее — свойство компонента «фитоценоз»), отличающийся наибольшим количеством описываемых признаков. Видовое богатство отражает множество действующих факторов, основные из которых, по гипотезе, совпадают с факторами, контролирующими состояние других компонентов (рис. 8). С одной стороны травостой должен испытывать влияние вышестоящих (в буквальном смысле) ярусов растительного покрова — деревьев и кустарников — через затенение, биохимическое влияние, генетическое и географическое (по месту происхождения видов) родство. Хорошо известны, например, понятия «спутники ели, дуба, сосны» и др., которые частично отражаются объединением видов трав в разные эколого-ценотические группы. С другой стороны, травостой, как и другие ярусы, потребляет элементы питания, воду, кислород из почвы и должен в какой-то степени зависеть от строения почвенного профиля, например степени гумусированности, оподзоленности, оглеения, аэрированности, плотности и т.д. С третьей стороны, есть ярусы растительного покрова, которые могут конкурировать с травостоем за пространство как над почвой, так и в корнеобитаемом слое почвы. Конкуренция возможна в силу сходства характерных размеров и положения на близком расстоянии от поверхности почвы и от крон деревьев и кустарников. К этой категории относятся ярусы кустарничков, напочвенных мхов, лишайников.

Результаты, полученные описанными выше способами (табл. 10), показывают, что *во всех регионах, независимо от зональной принадлежности, степени континентальности и генезиса ландшафта наиболее связанным или одним из двух наиболее связанных с травостоем компонентов является древостой.* Особенно выделяется связь с древостоем в средней тайге Западной Сибири (средний КД 0,33) и на Куршской косе (средний КД 0,30). Это объясняется сопряженной радикальной сменой видового состава обоих ярусов при смене суходольных урочищ болотными: в Западной Сибири сосна может преобладать только на болотах, а на Куршской косе это относится к черной ольхе, так как преобладают низинные болота. На остальных полигонах видовой состав древостоя меняется не столь радикально за счет присутствия и даже возможного преобладания сосны в обеих группах урочищ. Итак, практически универсальное значение имеют тесные внутрифитоценотические связи травостоя с эдификаторами лесных сообществ. Кроме того, в пару наиболее сопряженных с травостоем компонентов в большинстве регионов (за исключением Удмуртии) входит кустарниковый ярус. Следовательно, кустарниковый ярус имеет высокую степень общности факторов дифференциации с травостоем, и с высокой вероятностью оба они сопряжены с древесным ярусом. Об этом можно судить по большому сходству списка полигонов, где связи трех ярусов являются взаимно приоритетными. Физически возможен механизм обратного влияния травостоя на кустарниковый и древесный ярусы, так как хорошо развитый плотный травостой может препятствовать возобновлению некоторых видов деревьев (Погребняк, 1968).

Таблица. 10.

Средняя доля описанной дисперсии (коэффициент детерминации*100) в мультирегрессионном уравнении межкомпонентной связи. Зависимая переменная — оси дифференциации компонента А. Независимые переменные — 4 оси дифференциации компонента Б.

Зависимая переменная — компонент А	Независимые переменные — компонент Б	Буртинская степт	Куршская коса	Удмуртия	Костромская область	Кологривский район	Архангельская область. Полигон»Заячья»	Архангельская область. Полигон «Медвежий»	Архангельская область. Полигон «Трансект»	Архангельская область. Полигон «Козловка»	Обь
1	***2***	***3***	***4***	***5***	***6***	***7***	***8***	***9***	***10***	***11***	***12***
Травы (осреднение по 8 осям)	Мхи		14		3	6	10	14	17	9	26
	Кустарнички		13	4	17	19	20	23	26	7	27
	Кустарники	17	33	9	18	22	27	21	27	12	17
	Деревья		30	10	18	23	22	25	26	9	33
	Цвет почв	19	18	7	11	12	11	21	15	9	17
	Горизонты	23	16	13	10	15	22	27	22	10	28
	Мех.состав	8		7	11	12	8	8	10	10	
Деревья (4 оси)	Мхи		11		9	13	8	15	14	13	35
	Травы		33	10	26	36	22	39	25	22	39
	Кустарнички		17	8	20	29	26	30	20	10	37
	Кустарники		35	22	19	22	29	20	18	19	18
	Цвет почв		20	17	8	15	10	16	12	19	25
	Горизонты		16	20	10	17	20	27	15	17	31
	Мех.состав			10	11	7	7	8	11	13	
Кустарники (4 оси)	Мхи		8		8	6	10	14	8	10	9
	Травы	29	42	11	25	19	32	31	32	23	22
	Кустарнички		10	6	15	17	24	21	27	18	16
	Деревья		32	19	16	23	37	30	22	16	16
	Цвет почв	18	17	12	11	4	13	15	11	15	7
	Горизонты	21	19	17	13	11	13	13	9	23	11
	Мех.состав	8		12	8	13	8	13	8	17	
Кустарнички (4 оси)	Мхи		18		11	7	11	25	17	12	28
	Травы		24	4	30	20	23	36	37	16	37
	Кустарники		15	6	14	23	28	17	27	15	13
	Деревья		36	6	22	26	28	32	24	10	33
	Цвет почв		12	3	11	9	11	28	21	5	25
	Горизонты		25	5	17	20	20	32	25	13	31
	Мех.состав			4	8	8	11	8	11	8	

Таблица (*окончание*)

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*
Мхи (2 оси)	Травы		36		14	12	21	53	38	36	44
	Кустарники		28		10	10	17	13	14	9	14
	Кустарнички		8		22	20	17	48	27	13	36
	Деревья		29		21	16	15	33	25	38	42
	Цвет почв		18		15	11	19	44	27	13	27
	Горизонты		18		16	21	21	54	34	17	37
	Мех.состав				13	12	11	8	12	21	
Горизонты почв (4 оси)	Мхи		12		8	11	12	27	17	4	34
	Травы		21	9	12	19	22	36	24	20	37
	Кустарнички		16	5	18	16	20	29	22	11	32
	Кустарники		17	15	11	13	17	15	12	25	14
	Деревья		22	15	10	15	18	27	12	16	33
	Цвет почв		24	27	20	20	22	33	21	21	28
	Мех.состав			12	11	11	13	11	14	20	
Цвет почв (4 оси)	Мхи		10		7	5	8	20	11	6	12
	Травы	23	25	7	12	12	16	28	22	13	15
	Кустарнички		9	4	11	9	11	23	19	7	16
	Кустарники	16	24	11	10	6	14	16	8	19	6
	Деревья		20	11	16	8	11	16	15	13	16
	Горизонты	31	25	25	18	23	26	33	25	21	21
	Мех.состав	13		11	9	10	16	14	15	26	

Кустарничковый и мохово-лишайниковый ярусы, в отличие от древесного и кустарникового почти во всех регионах (за исключением Обского полигона) имеют гораздо меньшую общность факторов дифференциации с травостоем. Точнее говоря, травостой на целом ряде полигонов может выступать как ведущий фактор для кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов, но с существенно более низкими значениями КД по сравнению с сопряженностью с деревьями и кустарниками. При этом невозможно, чтобы кустарничковый и мохово-лишайниковый ярусы выступали как важнейшие детерминанты травяного яруса. На наш взгляд, в этом факте отражается «конкуренция за пространство» видов с близкими размерами и положением в структуре фитоценоза. Возможно, подчиняться разным факторам, по крайней мере, частично, — это и есть способ сократить конкурентные отношения и сосуществовать в пространстве. В средней тайге сопряженность мхов и кустарничков с травостоем несколько большая (средние КД в интервале 0,10–0,27) , чем в зоне смешанных лесов и южной тайге (КД в интервале 0,06–0,18).

Эти закономерности в целом выдерживаются и по результатам анализа канонических корреляций (табл. 11). На южнотаежных полигонах связь травяного яруса с кустарничковым более тесная, чем с кустарниковым, а в масштабе Кологривского района выходит на первое место. В средней тайге Архангельской области приоритетность связей для травяного яруса зависит от территориального охвата, т.е. ландшафтного разнообразия. При уменьшении территориального охвата до уровня местности (полигон «Трансект») и группы урочищ (полигон «Медвежий») связи травяного яруса с тремя остальными практически сопоставимы, а для трансекта на первое место по общности

с травами выходит кустарниковый ярус. В масштабе всего среднетаежного ландшафта (полигон «Заячья») и одного водораздельного урочища (полигон «Козловка») сохраняется вышеописанная общая закономерность. Следует отметить, что в масштабе урочища (полигон «Козловка») общность факторов заметно снижена по сравнению с масштабами ландшафта (полигон «Заячья»), местности (полигон «Трансект») и группы урочищ (полигон «Медвежий»). *Судя по взаимосопряженности ярусов фитоценоза, единство закономерностей ландшафтной дифференциации в наибольшей степени свойственно уровням местности и группы урочищ, несколько ослабевает на уровне ландшафта («у каждой местности свои закономерности») и минимально на внутриурочищном уровне («межфациальные комбинации свойств имеют большую степень свободы»)*. Более подробно вопрос о значимости иерархического уровня геосистем для результатов анализа межкомпонентных связей анализируется в разделе 4.3.

Таблица. 11.

Канонические корреляции (*100) между группами свойств компонентов на полигонах исследования

А. Удмуртия

	Деревья	Кустарники	Кустарнички	Травы	Мхи	Цвет	Горизонты	Мехсостав
Деревья		47	37	34		51	42	29
Кустарники			23	39		31	37	26
Кустарнички				22		13	19	22
Травы						19	34	26
Мхи								
Цвет							56	28
Горизонты								29

Б. Костромская область

	Деревья	Кустарники	Кустарнички	Травы	Мхи	Цвет	Горизонты	Мехсостав
Деревья		46	55	68	36	43	54	23
Кустарники			40	48	38	30	37	32
Кустарнички				59	36	33	39	24
Травы					38	40	46	36
Мхи						33	33	32
Цвет							61	34
Горизонты								31

В. Кологривский район

	Деревья	Кустарники	Кустарнички	Травы	Мхи (2)	Цвет	Горизонты	Мехсостав
Деревья		46	55	52	36	26	33	33
Кустарники			52	50	22	13	38	22
Кустарнички				54	25	31	43	30
Травы					29	33	41	28
Мхи						28	34	31
Цвет							58	36
Горизонты								34

Таблица (*продолжение*)

Г. Архангельская область. Полигон «Заячья»

	Деревья	Кустарники	Кустарнички	Травы	Мхи	Цвет	Горизонты	Мехсостав
Деревья		69	65	61	26	31	61	31
Кустарники			66	64	36	36	51	21
Кустарнички				58	42	31	61	37
Травы					33	37	60	30
Мхи						37	47	32
Цвет							58	43
Горизонты								43

Д. Архангельская область. Полигон «Медвежий»

	Деревья	Кустарники	Кустарнички	Травы	Мхи	Цвет	Горизонты	Мехсостав
Деревья		51	67	66	51	55	64	26
Кустарники			50	60	44	37	36	33
Кустарнички				66	69	72	73	22
Травы					69	65	69	34
Мхи						73	72	23
Цвет							80	45
Горизонты								35

Е. Архангельская область. Полигон «Трансект»

	Деревья	Кустарники	Кустарнички	Травы	Мхи	Цвет	Горизонты	Мехсостав
Деревья		58	50	64	45	42	38	38
Кустарники			60	73	39	29	35	24
Кустарнички				67	48	57	52	36
Травы					58	56	53	39
Мхи						54	60	36
Цвет							62	38
Горизонты								38

Ж. Архангельская область. Полигон «Козловка»

	Деревья	Кустарники	Кустарнички (2)	Травы	Мхи (2)	Цвет	Горизонты	Мехсостав
Деревья		27	23	47	6	19	24	19
Кустарники			45	38	8	39	61	19
Кустарнички				33	6	8	22	8
Травы					29	26	35	17
Мхи						10	6	18
Цвет							41	44
Горизонты								31

Таблица (*продолжение*)

З. Куршская коса

	Деревья	Кустарники	Кустарнички	Травы	Мхи	Цвет	Горизонты
Деревья		64	57	72	46	56	53
Кустарники			43	61	27	52	**48**
Кустарнички				**45**	15	30	38
Травы					54	62	46
Мхи						34	44
Цвет							62

И. Куршская коса (при мощности органогенных горизонтов менее 10 см)

	Деревья	Кустарники	Кустарнички	Травы	Мхи	Цвет	Горизонты
Деревья		64	54	73	**51**	57	**62**
Кустарники			43	63	22	47	38
Кустарнички				38	17	**46**	35
Травы					58	64	**58**
Мхи						39	**56**
Цвет							65

К. Обь

	Деревья	Кустарники	Кустарнички	Травы	Мхи	Цвет	Горизонты
Биттерлих	88	51	70	75	70	51	71
Деревья		55	77	80	75	53	70
Кустарники 3			50	65	46	28	40
Кустарнички				76	71	55	69
Травы					75	54	74
Мхи (3 оси)						51	68
Цвет							58

Л. Обь (при мощности органогенных горизонтов менее 20 см)

	Деревья	Кустарники	Кустарнички	Травы	Мхи	Цвет	Горизонты
Биттерлих	85	41	53	55	55	39	25
Деревья		46	65	60	58	31	27
Кустарники 3			48	61	38	24	24
Кустарнички				59	39	26	37
Травы					55	26	44
Мхи (3 оси)						23	25
Цвет							36

Таблица (*окончание*)

М. Обь (при мощности органогенных горизонтов менее 10 см)

	Деревья	Кустарники	Кустарнички	Травы	Мхи	Цвет	Горизонты
Биттерлих	85	37	47	45	55	24	37
Деревья		42	62	49	56	32	**35**
Кустарники 3			50	60	31	27	25
Кустарнички				57	31	30	28
Травы					53	28	42
Мхи (3 оси)						23	**34**
Цвет							44

Н. Оренбургская область, Буртинская степь

	Кустарники	Травы	Цвет	Горизонты	Мехсостав
Кустарники		54	50	57	26
Травы			68	66	29
Цвет				68	30
Горизонты					28

Травостой имеет больше общих факторов со строением почвенного профиля (КД 0,10–0,28), чем с мохово-лишайниковым ярусом (КД 0,03–0,25). Связи сопоставимо малозначимы (и в основном недостоверны) в средней тайге и на уровне межфациального варьирования внутри урочища (полигон «Козловка»). Однако почти везде (за исключением Удмуртии) *сопряженность свойств травостоя с почвенным профилем ниже, чем с древостоем и кустарниковым ярусом* (в последнем случае исключение также — Обский полигон). Здесь мы безусловно сталкиваемся с унаследованностью строения почвенного профиля от исчезнувших ландшафтных обстановок либо с отставанием набора и мощности почвенных горизонтов от сукцессионных изменений фитоценозов. Например, в Архангельской области наблюдается наследие относительно недавней распашки в лесах и реликты подзолистого профиля в заболачиваемых урочищах.

Встают два вопроса, касающиеся чувствительности растительного покрова к почвенным условиям. Первый — можно ли рассматривать цветовые характеристики как относительно мобильные признаки, имеющие более сопоставимые с ярусами фитоценоза характерные времена? Второй — может ли такой гораздо более инертный признак как механический состав почв быть совершенно не связанным с пространственным варьированием свойств фитоценоза или наоборот жестко детерминировать последние?

Для всех регионов и полигонов оказалось, что механический состав и цветовые характеристики почв менее значимы для дифференциации травостоя, по сравнению с внутрифитоценотическими влияниями. Средние КД составили, соответственно, 0,07–0,12 и 0,07–0,21, т.е. для большинства осей значения на грани достоверности или недостоверны. Эти признаки никогда не становятся первыми по общности факторов с ярусами фитоценоза. Результат несколько парадоксален, по крайней мере, для механического состава, так как связь фитоценозов с этой характеристикой общеизвестна и хорошо изучена. Поэтому понадобится проверка гипотез о неполной адекватности выбранного способа факторного представления механического состава и о приемле-

мости дискретного представления этой характеристики для отражения ее связи с фитоценозом. Пока ограничимся предположением, что факторное представление недостаточно чувствительно к почвам с монотонным по профилю механическим составом. В то же время осями дифференциации хорошо разделяются почвы с противоположными тенденциями смены механического состава с глубиной, которые могут быть не всегда достаточно контрастными сигналами для ярусов фитоценоза.

Некоторым исключением из правила относительного безразличия травостоя и других ярусов к цвету и механическому составу почв являются ландшафты Куршской косы. На этом полигоне факторы, управляющие цветовыми характеристиками почв и травостоем, более близки, чем факторы дифференциации травостоя, кустарничков и мхов. Обращает на себя внимание сопряженность оси нитрофильности (КД 0,40) и оси влажности (КД 0,22) с совокупностью цветовых характеристик почв (рис. 28). Признаки высокой ожелезненности (большое значение цветности Chroma), окисленности (низкие значения оттенка Hue), со значительным и глубоким (до 15 см) гумусонакоплением (низкие значения яркости Value) соответствуют почвам влажных, но не заболоченных черноольхово-широколиственных лесов с высоким обилием нитрофильных видов: гравилата речного, лунника, сныти, таволги вязолистной. При этом с глубиной в почвах значение оттенка растет, цветности (ожелезненности) — падает, а яркости — возрастает, что индицирует появление признаков глееватости. Высокую ожелезненность следуется связывать с осаждением железа на кислородном барьере при контакте близко залегающих грунтовых вод с дренированной верхней толщей почв. Видимо, нитрофильность фитоценоза объясняется именно современным привносом азота с разгружающимися грунтовыми водами. Поскольку цветовые характеристики в данном случае достаточно точно отражают современный гидрогеологический процесс, то наблюдается хорошая связь динамичных цветовых характеристик почв со свойствами фитоценоза. 1-я ось дифференциации древостоя, отделяющая черноольхово-широколиственные от сосновых лесов, и 1-я ось дифференциации кустарников также достоверно чувствительны к цветовым характеристикам, которые в совокупности описывают, соответственно, 34 и 29% варьирования их значений. Однако остальные оси дифференциации древостоя, кустарников, и все оси, описывающие варьирование кустарничков, мхов и лишайников к цветовым характеристикам безразличны. Наиболее вероятно, что это подтверждает одно из ограничений используемой методологии, не включающей характеристики кратковременных динамических состояний ландшафта. Цветовые характеристики подвержены сезонным изменениям, особенно в периодически переувлажненных почвах тайги. Летний сезон, в который проводились исследования, видимо, не вполне репрезентативен для определения связи свойств фитоценозов с цветовыми характеристиками.

Обнаружены зональные различия сопряженности свойств травостоя с другими ярусами фитоценоза и почвами.

Средняя тайга. *Ландшафты среднетаежной подзоны характеризуются наибольшей сопряженностью травостоя с другими компонентами.* Это правило не зависит от степени заболоченности, так как сохраняется при исключении из расчета точек с мощностью торфянистого горизонта более 10 см (табл. 11). Внутрифитоценотические связи (особенно в мохово-травяно-кустарничковой группе ярусов) в средней тайге сильнее, чем в южной тайге и в смешаннолесной зоне. Тесная связь мохово-лишайникового и травяного ярусов объясняется, видимо, большой ролью мохового покрова

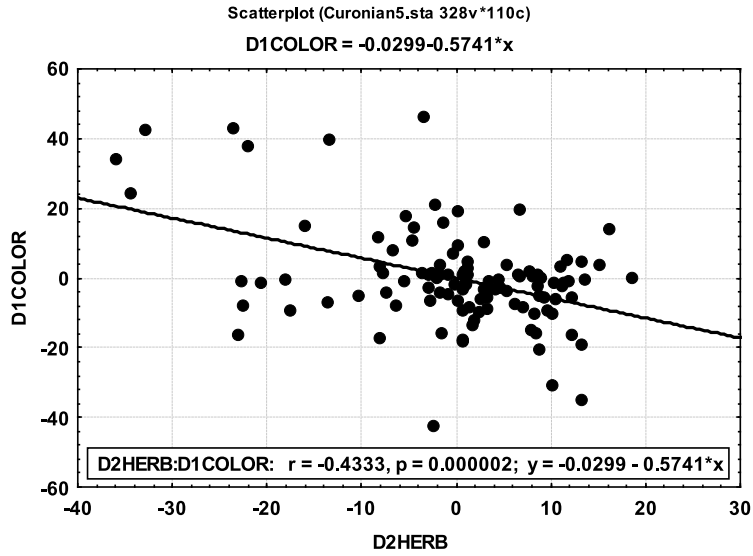

Рис. 28. Связь оси нитрофильности травостоя (d2herb) с главной осью дифференциации цветовых характеристик почв (d1color) в смешаннолесном ландшафте Куршской косы. Нитрофильные влаголюбивые сообщества приурочены к ожелезненным окисленным почвам с признаками оглеения в нижней части под широколиственно-черноольховыми лесами низкой пальве.

как средообразователя для бореального мелкотравья и низких гидрофильных видов. Она реализуется за счет вклада в кислотность почв, накопление торфа, аккумуляцию влаги, и особенно — изоляцию дневной поверхности от минеральной поверхности. Древесный, кустарниковый и травяный ярусы образуют прочную плеяду. Ее участники в разной степени чувствительны к почвам: травы в наибольшей степени (6 осей из 8 достоверно описываются совокупностью характеристик почвенного профиля), деревья — существенно слабее (2 оси из 4), кустарники — в наименьшей. В то же время связь кустарников с деревьями максимальна (средний КД 0,37), что заставляет утверждать, что *кустарниковый ярус адаптируется исключительно к структуре древесного яруса и почти игнорирует почвенные различия. Травы же воспринимают относительно независимые сигналы как от древесного яруса, так и от почв.* Отметим, что 2-я и 4-я оси дифференциации травостоя для полигона «Заячья» (ландшафтный масштаб) интерпретируются как чувствительность к влажности, однако 2-я ось гораздо лучше описывается совокупностью характеристик древостоя, а 4-я — почвенного профиля. Причины, очевидно, кроются в подчинении процессам с разными характерными временами, сущность которых предстоит вскрыть ниже с проверкой гипотезы об обусловленности характеристиками рельефа вмещающих геосистем, то есть межуровневыми связями (раздел 4.4).

С почвой в наибольшей степени связаны низкие ярусы фитоценоза (травы и кустарнички, в Западной Сибири — мхи). Значимость строения почвенного профиля и яруса кустарничков для травостоя сопоставимы. Поэтому можно констатировать наличие характерной плеяды свойств, связывающей травостой, кустарнички и почвенный про-

филь, что указывает на сопоставимость их характерных времен. Кустарничковый ярус достаточно прочно связан как с древесным и травяным, так и со строением почвенного профиля. В наибольшей степени из всех ярусов со строением почвенного профиля (набором и мощностью горизонтов) сопряжен травостой. Это правило сохраняет значение и в южной тайге. Почвенные горизонты в средней тайге служат более сильным фактором, чем в южной тайге для всех ярусов, кроме кустарников,. Механический состав почв не является сколько-нибудь существенным фактором, влияющим на ярусы фитоценоза: ни на одном из среднетаежных полигонов каноническая корреляция не превышает 0,39. Значимость цветовых характеристик для ярусов фитоценоза очень сильно зависит от масштаба расчета. Она весьма велика для фациально-урочищного масштаба (полигон «Медвежий») с максимальной канонической корреляцией с травяным и кустарничковым ярусами (соответственно, 0,65 и 0,72), слаба в ландшафтном масштабе (0,31–0,37) и минимальна в фациальном (полигон «Козловка») за исключением связи с кустарниковым ярусом. На Обском полигоне цветовые характеристики достаточно прочно коррелируют с ярусами фитоценоза в ландшафтном масштабе (ККК более 0,50), но слабо — при исключении из расчета болотных урочищ (ККК менее 0,35).

Южная тайга. *В южной тайге общность факторов дифференциации ярусов фитоценоза и строения почвенного профиля гораздо ниже, чем в средней тайге.* Канонические корреляции в южнотаежных ландшафтах Кологривского района и в целом Костромской области лишь в одном случае превышают 0,50 (связь строения профиля с древесным ярусом для Костромской области), в то время как для среднетаежных полигонов «Заячья», «Медвежий», «Обь» почти не опускаются ниже 0,50. Из 15 пар канонических корреляций типа «горизонты – ярусы фитоценоза» среднетаежных полигонов исключение составляют связки «горизонты – мхи» для ландшафтного масштаба (полигон «Заячья»), «горизонты – кустарники» для урочищного масштаба (полигон «Медвежий») и «горизонты – кустарники» для полигона «Обь». *В южной тайге наблюдается взаимонезависимость мохового и травяного ярусов, что нехарактерно для средней тайги*. Моховый покров играет более скромную средообразующую роль за счет неповсеместного распространения. Поэтому травяный ярус, не изолированный от минеральной толщи, может более чутко реагировать на другие факторы, в частности возрастает (хотя и на грани достоверности), по сравнению со средней тайгой, чувствительность к механическому составу почв для некоторых осей. Распределение мхов слабо связано со свойствами почв и других ярусов фитоценоза, но имеет общие факторы дифференциации с кустарничками. Плеяда, связывающая кустарничковый, травяный и древесный ярусы, выражена слабее, чем в средней тайге. В то же время сопряженность свойств кустарничкового яруса со строением почвенного профиля остается на том же уровне.

Смешанные леса. Несмотря на существенное различие сопряженности компонентов в Удмуртии и на Куршской косе (прежде всего из-за большей контрастности ландшафта последней), выделяется общее правило. *Устойчивую плеяду с взаимообусловленными свойствами образуют ярусы деревьев, кустарников и трав.* В плеяде «травы – кустарнички», типичной для средней тайги, связь становится «односторонней». Травы имеют больше общих факторов дифференциации с деревьями, кустарниками, мхами. Кустарнички относительно сопряжены только с древесным ярусом, причем слабее, чем травы. Это означает, видимо, *снижение напряженности конкурентных отношений в связи с ростом разнообразия, высоты, продуктивности травяного яруса с приближением к по-*

лосе оптимального увлажнения. Фактически травяный и кустарничковый ярусы расходятся в вертикальной структуре фитоценоза.

Тем не менее, в сравнении с полигонами в других зонах, ландшафты пластовых равнин зоны смешанных лесов Удмуртии характеризуются наибольшей независимостью травостоя от других компонентов. В то же время только там строение почвенного профиля оказывается наиболее сильно сопряженным с травостоем свойством. Скорее всего, это следует связывать с большой геохимической контрастностью почв.

На фоне среднетаежных и южнотаежных ландшафтов несколько выделяется повышенная сопряженность строения почвенного профиля и цветовых характеристик почв с видовым составом древесного и кустарникового ярусов. Причина заключается в контрасте сообществ на бедных дренированных почвах, близких к таежным (сосна, можжевельник, шиповник), и обогащенных органическими веществами почвах (черная ольха, дуб, клен, лещина, бузина, черемуха). *Сообщества с более богатым видовым составом, свойственные смешанным лесам, оказываются менее пластичными в отношении к почвам, по сравнению с таежными*.

Обратим внимание, что все же наши материалы не дают достаточного количества оснований для выведения общего правила сопряженности компонентов для зоны смешанных лесов, так как влияние почвенного профиля на ярусы фитоценоза и внутрифитоценотические связи существенно выше на Куршской косе, чем в Удмуртии. Причины таких различий предстоит установить при проверке серии гипотез о вкладе факторов, контролируемых рельефом вмещающих геосистем (раздел 4.4).

Итак, установлены некоторые универсальные правила внутриуровенных межкомпонентных связей, позволяющие уточнить подходы к ландшафтной индикации для лесной зоны.

В целом нет оснований утверждать, что в геосистемах всех уровней от фации до ландшафта существует всеобщие строго детерминированные связи между компонентами. В то же время существуют устойчивые плеяды свойств, состав которых различается между ландшафтными зонами (рис. 29). Их можно считать реализацией парциальных геосистем, единство которых обусловлено общностью факторов пространственной дифференциации. Назовем их *парциальными геосистемами первого порядка*. Связь кустарников с травами и деревьев с травами можно считать наиболее устойчивой плеядой, которая сохраняется в смешанных лесах, южной тайге и средней тайге. Каждый из этих ярусов может выступать как ведущий для другого. Индикация строения почвенного профиля по свойствам ярусов фитоценоза возможна, но наилучшие индикаторы различаются по регионам, что важно учитывать при лесоустроительных работах. В заболоченной средней тайге Западной Сибири наилучшим индикатором может служить моховый ярус, в средней тайге Архангельской области и в южной тайге – травы и кустарнички, в смешанных лесах – деревья и кустарники.

Однако пока мы не проводили строгого разделения вкладов механизмов межкомпонентных отношений, заключенных внутри ПТК и оказывающих влияние с более высокого иерархического уровня. Следующий уровень уточнения механизмов межкомпонентных связей должен не просто констатировать факт связанности компонентов, но конкретизировать плеяды свойств компонентов, подчиняющиеся одним и тем же ландшафтообразующим процессам. Этому сюжету посвящены следующие разделы нашей работы.

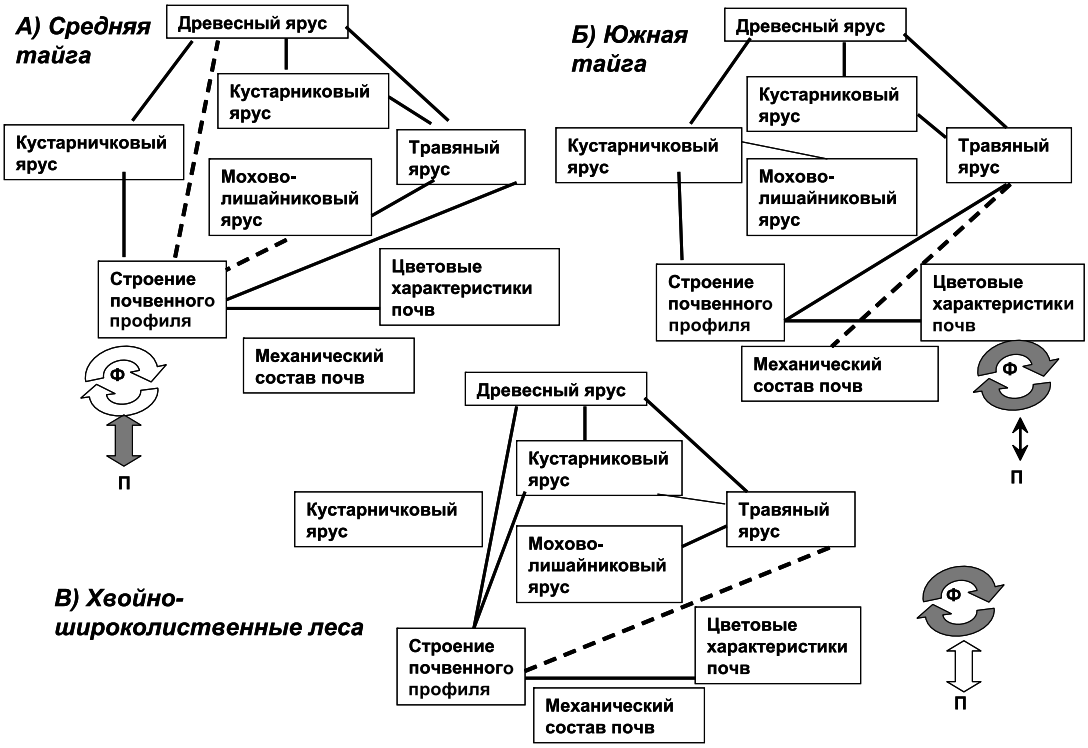

Рис. 29. Зональная специфика внутриуровенных межкомпонентных связей в средней тайге (А), южной тайге (Б), хвойно-широколиственных лесах (В).
Толщина линии символически отображает плотность связей. Ф — фитоценоз. П — почва.

С точки зрения методологии полученные на данном этапе результаты позволяют утверждать следующее. Сравнивая статистические модели внутриуровенных связей, построенные для разных сочетаний свойств компонентов, мы можем установить:

- ✓ какие компоненты ландшафта тесно сопряжены с варьированием других компонентов и потому могут быть подвержены быстрому изменению при изменении их состояния, например, при пожаре, вырубке, заболачивании и др., а какие относительно независимы или толерантны к широкому диапазону их варьирования;
- ✓ какие ярусы фитоценоза подчиняются в большей степени внутрифитоценотическим связям (либо прямо зависят от свойств других ярусов, либо воспринимают сигнал абиотических и биокосных компонентов только через реакцию других ярусов), а какие строго связаны с варьированием свойств почв и почвенных вод;
- ✓ какие свойства компонентов ландшафта не связаны с большинством других свойств и поэтому могут рассматриваться как подчиняющиеся процессам с принципиально иными характерными временами;
- ✓ какая группа свойств может считаться «узлом» межкомпонентных внутриуровенных связей и в наилучшей степени служит индикатором либо эдификатором свойств других компонентов;

- ✓ являются ли наиболее значимые факторы дифференциации каждого компонента одновременно наиболее тесно связанными со свойствами других компонентов (и, следовательно, существует единое для всех компонентов общее главное правило пространственной дифференциации) либо есть компоненты, которые в первую очередь подвержены саморазвитию или лишь на этом фоне второстепенное значение имеет влияние других компонентов.

4.3. Зависимость внутриуровенных межкомпонентных связей от уровня ландшафтного разнообразия

Высокие показатели плотности межкомпонентных связей свидетельствуют о наличии внутренних различий состояния компонентов внутри массива данных. Исключение из массива данных той или иной категории элементов (например, фаций определенного типа) или компактной части территории (например, какой-либо местности из числа представленных в ландшафте) может показать либо увеличение, либо уменьшение качества модели. Первый случай свидетельствует о возрастании однородности (в буквальном смысле — от слова «род», т.е. «происхождение», а не «одинаковость» элементов) оставшихся данных в том смысле, что существует выявленное достоверной моделью единое правило, объясняющее внутренние различия, а следовательно и существование геосистемы с единым организующим пространство процессом. Второй случай свидетельствует о том, что среди оставшихся данных нет строгого взаимосоответствия компонентов.

Для исследования вопроса о влиянии уровня ландшафтного разнообразия на плотность межкомпонентных связей проведено сравнения канонических корреляций и качества мультирегресионных уравнений по нескольким группам массивов данных. Каждая из этих групп включает массивы для одной территории, но полученные либо при разном территориальном охвате, либо с разной представленностью групп урочищ.

Для Архангельского среднетаежного ландшафта сравнивались модели межкомпонентных связей для полигонов на частично пересекающихся территориях (см. также раздел 3.1), каждая из которых представляет свой уровень ландшафтного разнообразия и охарактеризована серией описаний со специфичной плотностью расположения.

А) Ландшафтный уровень — полигон «Заячья» (22 группы урочищ, 90 видов урочищ)

Б) Местностной уровень — полигон «Трансект» (12 групп урочищ, 21 вид урочищ),

В) Фациально-урочищный — полигон «Медвежий» (12 групп урочищ, 34 вида урочищ),

Г) Фациальный уровень — полигон «Козловка» (3 группы урочищ, 5 видов урочищ).

Для Обского среднетаежного ландшафта сравнивались модели межкомпонентных связей, полученные путем последовательного исключения из одного и того же массива, представляющего лесо-болотный ландшафт (всего 201 описание), болотных урочищ с мощностью торфа более 20 см (остается 169 описаний урочищ незаболоченных и заболоченных лесов), фаций с мощностью торфа 10–20 см (остается 132 описания фаций незаболоченных лесов).

Для Костромского южнотаежного региона сравнивались модели межкомпонентных связей, полученные для области в целом (3 физико-географические провинции, 17

физико-географических районов, 165 описаний) и для расположенного в ее пределах Кологривского административного района (1 физико-географическая провинция, 2 физико-географических района, 165 описаний).

Для Куршского хвойно-широколиственнолесного ландшафта сравнивались модели межкомпонентных связей, полученные для лесо-болотного ландшафта (всего 110 описаний) и для группы лесных урочищ после исключения урочищ с мощностью торфа более 10 см (остается 85 описаний).

Исследуемая в этом разделе полимасштабная система связей схематически иллюстрируется на рис. 30 для условного ландшафта с тремя местностями; ось X символизирует пространственные координаты, ось Y — обилие условных видов. Травы, мхи и цветовые характеристики почв варьируют в пределах каждой из местностей 1 и 2 сопряженно друг с другом, но тип связи различен в разных местностях. При этом нет сопряженности с остальными ярусами. Один и тот же тип отношений выдерживается только в пределах каждой местности, но не ландшафта в целом. Поэтому связь считается ослабевающей от фациально-урочищного к ландшафтному уровню. В пределах местности 3 наблюдается сопряженное варьирование всех характеристик — характерная только для этой местности межкомпонентная связь фациально-урочищного уровня. Деревья, кустарники и кустарнички таким же образом сопряженно варьируют в пределах двух других местностей, т.е. тип отношений сохраняется в пределах всего ландшафта. Кроме того, обилия видов этих трех ярусов резко отличаются между тремя местностями, причем резкое изменение обилия при переходе из одной местности в другую происходит также сопряженно. Амплитуда варьирования обилия между местностями (на ландшафтном уровне) превышает амплитуду варьирования в пределах каждой местности. Поэтому сопряженное варьирование ландшафтного уровня считается более значимым, чем варьирование фациально-урочищного уровня: связи трех ярусов более прочные.

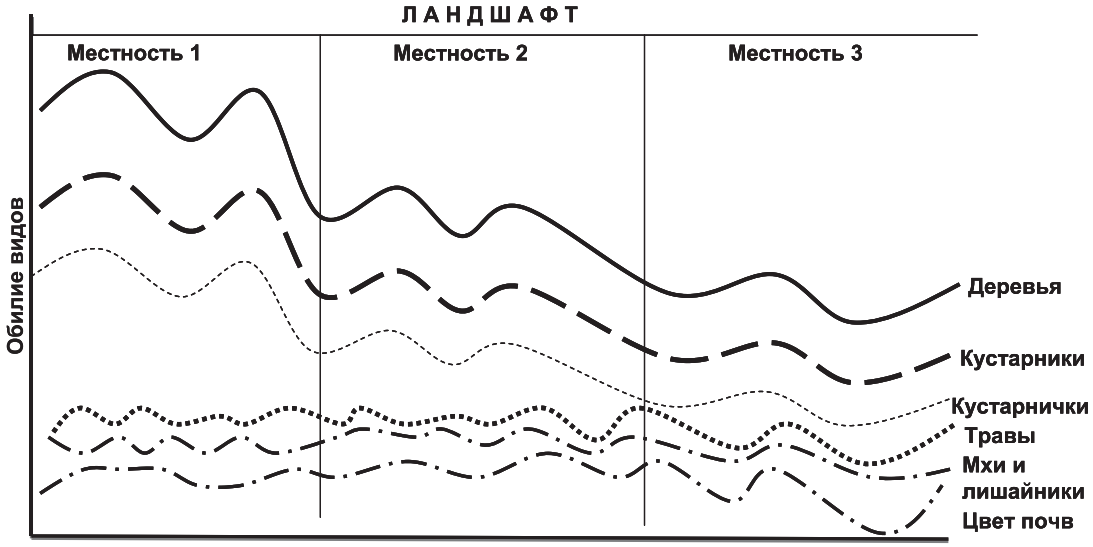

Рис. 30. Полимасштабная система межкомпонентных связей. Пояснения см. в тексте.

Теперь перейдем к анализу региональных примеров.

Архангельский среднетаежный ландшафт. Диапазон уровней «урочище – ландшафт». При сравнении коэффициентов канонической корреляции по парам компонентов, рассчитанных для трех уровней ландшафтного разнообразия в Архангельском среднетаежном ландшафте (табл. 11), установлены две четко различающихся плеяды компонентов (рис. 31). С одной стороны, от ландшафтного («Заячья») к местностному («Трансект») и фациально-урочищному («Медвежий») уровню монотонно возрастает сопряженность варьирования видов мохово-лишайникового яруса, травяного яруса, цветовых характеристик почв, мощности горизонтов почв. С другой стороны внутри плеяды «древесный ярус – кустарниковый ярус – кустарничковый ярус» сопряженность варьирования возрастает в обратном направлении и максимальна на ландшафтном уровне.

Для объяснения причин возрастания связи древесного и кустарникового ярусов на ландшафтном уровне возможны несколько гипотез: чисто внутрифитоценотические отношения, возрастание разнообразия почвенных условий, антропогенные воздействия на растительный покров, зависимость от свойств вмещающих геосистем. В данном случае гипотеза о влиянии роста разнообразия почвенных условий прямо не подтверждается, так как связь со строением почвенного профиля и цветовых характеристик на ландшафтном уровне ослабевает. Сравнение гистограмм обилия видов кустарников и деревьев (рис. 32, рис. 33) показывает, что для большинства кустарников разнообразие градаций обилия возрастает от фациально-урочищного к местностному и, особенно, — к ландшафтному уровню. На ландшафтном уровне, охватывающем шесть местностей, чаще встречаются урочища с высоким обилием осины, ольхи серой, березы и участием или высоким обилием нитрофильных кустарников малины, смородины черной, черемухи. Этот факт индицирует: а) возрастание вклада антропогенного фактора в формировании ландшафтной структуры западного сектора (Ростовская местность); б) рост доли высокотрофных местообитаний в местах разгрузки жестких грунтовых вод; в) рост доли урочищ с пониженной мощностью или отсутствием песчано-супесчаного чехла. Группа урочищ, охваченная территорией полигона «Медвежий» (фациально-урочищный уровень), более однообразна в отношении присутствия перечисленных видов. Однако эта территория выделяется повышенной встречаемостью сосняков с обильным можжевельником в подлеске, что указывает на своеобразие, связанное с повышенной (до 50–60 см) мощностью песчано-супесчаного чехла. Таким образом, рост связи на ландшафтном уровне должен интерпретироваться как результат расширения диапазона возможных обилий видов древесного и кустарникового ярусов вследствие антропогенных воздействий на растительный покров и косвенно — на химические свойства почв, которые не отражаются прямо в строении почвенного профиля. В частности, при наличии одинакового по мощности старопахотного горизонта в нескольких урочищах, его химические свойства могут различаться из-за разной в прошлом интенсивности внесения удобрений, что и обусловливает присутствие или отсутствие в кустарниковом ярусе нитрофильных видов, а в древесном — ольхи серой (*Alnus incana*). Например, на полигоне на месте пашни могут сформироваться как сероольхово-сосновые, так и березово-сосновые леса при одинаковых литологических и геоморфологических условиях (рис. 34). Гипотеза о вкладе вмещающих геосистем будет рассматриваться ниже (раздел 4.4).

В то же время все три члена плеяды «древесный ярус – кустарниковый ярус – кустарничковый ярус» участвуют также в иной системе связей, которая достигает макси-

мального проявления на фациально-урочищном уровне. Так, связи древесного яруса с моховым и травяным, а также с цветовыми характеристиками почв максимальны на фациально-урочищном уровне. Кустарниковый и кустарничковый ярусы варьируют наиболее сопряженно с моховым также на фациально-урочищном уровне. Таким образом, мы имеем дело с полимасштабной системой межкомпонентных связей, в которую вовлечены три яруса фитоценоза.

Итак, видим, что территориальная близость точек опробования, а, следовательно, и относительно невысокая степень ландшафтного разнообразия, способствует более высокой сопряженности травяного, мохово-лишайникового ярусов со всеми свойствами ярусов растительного покрова и почв. Это свидетельствует *о локальном характере однотипных межкомпонентных отношений и частой смене типов отношений в пространстве*. На территории, охватывающей разнообразие ландшафтного уровня (полигон «Заячья»), проявляются разнообразные типы межкомпонентных отношений, нивелирующие друг друга. Противоположная закономерность характерна для связей между древесным, кустарниковым и кустарничковым ярусами. *В целом сопряженность свойств компонентов на ландшафтном уровне снижается по сравнению с местностным и, особенно, фациально-урочищным уровнями*.

Теперь рассмотрим эффекты влияния ландшафтного разнообразия на тесноту межкомпонентных связей на примере двух ландшафтов, расположенных в разных зонах и при разной степени континентальности, но частично сходных по происхождению исходной морфолитогенной основы и современному «противостоянию» лесных и болотных урочищ, — Обского и Куршского. Основное их сходство заключается в доминировании бугристого рельефа эолового происхождения, резком контрасте хорошо

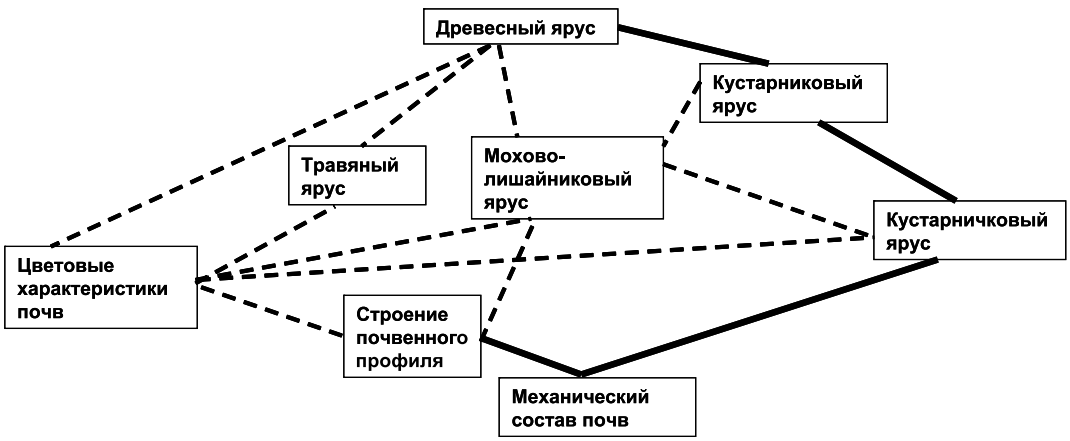

Рис. 31. Изменение канонических коэффициентов корреляции между свойствами ярусов фитоценоза и почв в ряду «фациально-урочищный уровень – местностной уровень – ландшафтный уровень». Среднетаежный ландшафт, Архангельская область.

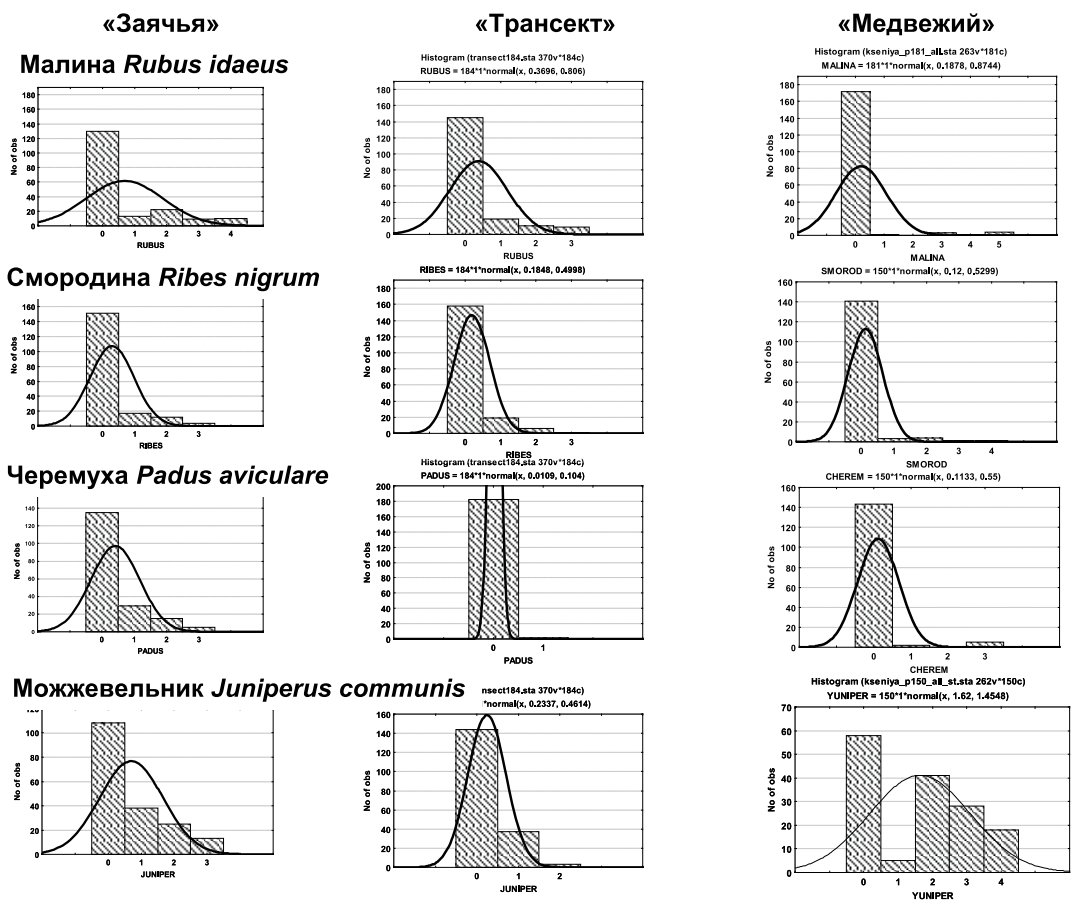

Рис. 32. Гистограммы обилий кустарников по 5 балльной шкале (0–4) для ландшафтного («Заячья»), местностного («Трансект») и фациально-урочищного («Медвежий») иерархических уровней.

дренированных бугров и заболоченных дефляционных понижений, монотонности почвообразующих пород в пределах ландшафта (лессовидных суглинков на Обском полигоне, песков — на Куршском).

Обский среднетаежный ландшафт. Диапазон «уровней «урочище – ландшафт». В Обском ландшафте канонические коэффициенты корреляции между группами свойств компонентов (табл. 11) монотонно снижаются по мере сокращения ландшафтного разнообразия выборки. Максимальных значений почти во всех парах групп свойств канонические корреляции достигают для выборки, охватывающей все разнообразие репрезентативных урочищ лесо-болотного ландшафта, в которой 16% наблюдений приходится на болотные урочища, что соответствует их площадной доле на исследованной территории ландшафта. Коэффициенты монотонно убывают при исключении сначала фаций с мощностью торфа более 20 см (то есть в группе фаций не-

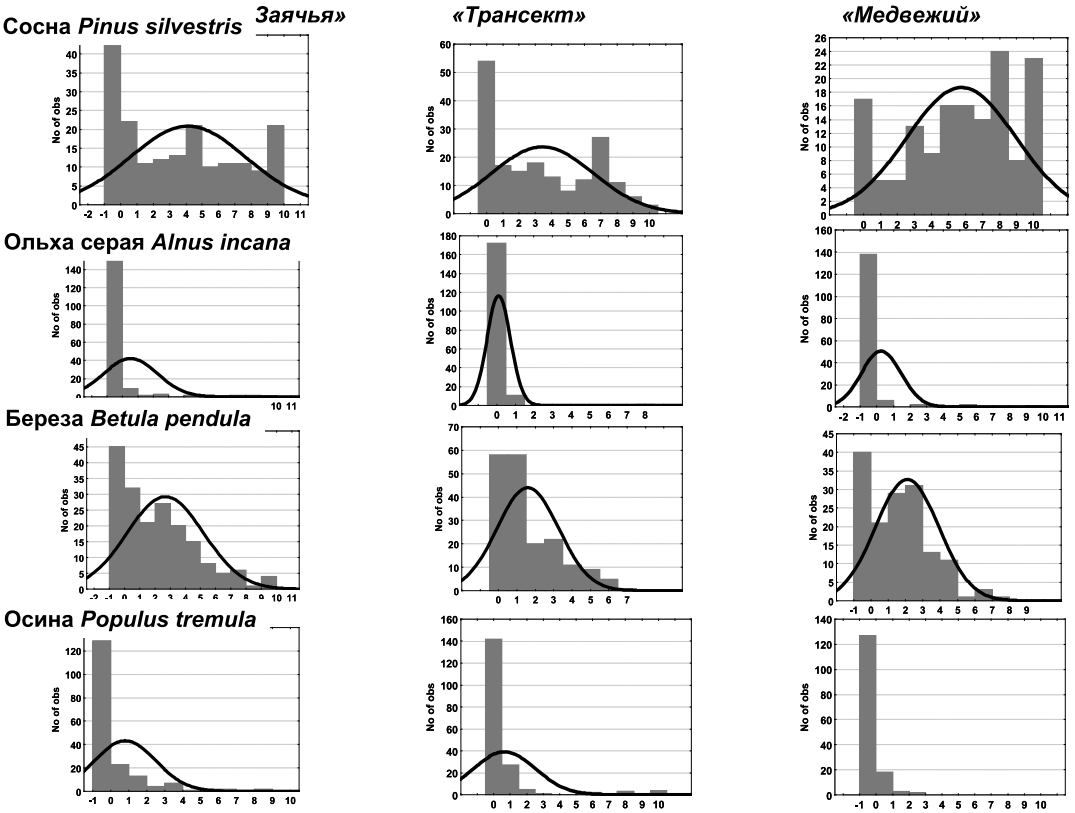

Рис. 33. Гистограммы обилий деревьев по 11 балльной шкале (0–10) для ландшафтного («Заячья»), местностного «Трансект») и фациально-урочищного («Медвежий») иерархических уровней.

заболоченных и заболоченных лесов), а затем — с мощностью торфа 10–20 см (то есть в группе фаций только незаболоченных лесов). Однако исключением из этого правила выступает совокупность осей, характеризующих мощности почвенных горизонтов. Эта характеристика имеет минимальные корреляции с древесным, кустарниковым, моховым ярусами в группе фаций незаболоченных и заболоченных лесов. Травяный ярус тоже можно отнести к этой группе исключений, так как разница в канонических корреляциях между двумя выборками минимальна. Очевидно, что фации с мощностью торфа 10–20 см, приуроченные к окраинам болот и подножьям палеоэоловых бугров, вносят основной вклад в размывание связей между почвами и ярусами фитоценоза вследствие высокого разнообразия почвенных профилей с переходными свойствами от светлоземов к торфяно-глееземам.

Таким образом, видим, что в суходольных урочищах разнообразие сочетаний свойств почв и фитоценозов значительно возрастает по сравнению с лесо-болотным ландшафтом в целом, что отражается на снижении канонических корреляций. Иначе говоря, в первом приближении, *эта группа урочищ допускает нестрогую взаимоадап-*

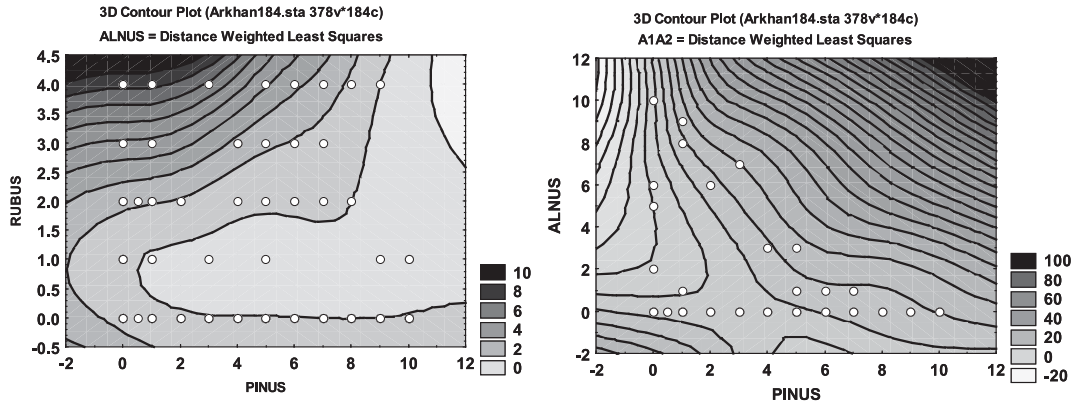

Рис. 34. Совместная встречаемость сосны, серой ольхи и малины на старопахотных почвах. Участие серой ольхи (ALNUS) в сообществе с сосной (PINUS) возможно при условии относительно невысокого обилия сосны, что обычно характерно для вторичных средневозрастных лесов на относительно богатых почвах, допускающих впоследствии доминирование ели. Возрастание обилия ольхи сопровождается ростом обилия нитрофильного вида малины (RUBUS), что доказывает в большинстве случаев наследие пахотных режимов с внесением удобрений. Совместное присутствие сосны и ольхи в древостое возможно только на почвах с ненулевой мощностью старопахотного горизонта почв (A1A2).

тацию компонентов. Однако этот результат может не иметь универсального значения для всех свойств компонентов, выражаемых конкретными осями дифференциации. Поэтому необходим более подробный анализ устойчивости плеяд свойств при изменении размера выборки.

При изменении размера анализируемой выборки появляется возможность и необходимость сравнить исходную и новую выборки по типам статистического распределения данных. С точки зрения изучения структуры ландшафтов это означает проверку гипотезы о уравновешенных отклонениях значений свойства от средних значений, то есть об отсутствии одного или нескольких ведущих ландшафтных процессов.

Допустим (пока только теоретически), что на Обском полигоне есть фоновые преобладающие значения увлажненности почв, формирующие зеленомошные типы лесов с доминированием *Hylocomium splendens*. Однако в силу палеоэолового расчленения ландшафта на бугры и межбугровые понижения и эрозионного расчленения малыми долинами имеются участки как менее, так и более увлажненные по сравнению с фоном. Однако фации с активным оттоком влаги (вершины бугров, крутые склоны долин) компенсируются фациями с накоплением влаги (межбугровые понижения, вогнутые перегибы склонов, микрозападины). В целом геосистема, включающие фоновые плоские междуречные поверхности, выпуклые и вогнутые формы рельефа, может иметь постоянный баланс прихода и расхода влаги и поэтому не подвергаться прогрессирующему заболачиванию или иссушению. Влага, скапливающаяся в микропонижениях, попадает в единый горизонт почвенно-грунтовых вод, которые по механизму отрицательной обратной связи поддерживают определенный уровень влажности и в примыкающих фациях повышений, теряющих влагу, например, при весеннем стоке

по промерзшей почве. Чем больше значения влажности отклоняются от средних, тем реже они встречаются, но обязательно в симметричном количестве в интервалах положительных и отрицательных отклонений. Если удается выделить территорию, в пределах которой высока корреляция нормально распределенных нескольких свойств, это означает, что данная группа свойств варьирует в пространстве под действием единого ландшафтоформирующего процесса. Если, как в приведенном выше примере, варьирует влажность почв, то параллельно будут варьировать состав коррелирующих между собой ярусов фитоценоза. Важно, что при этом должно сохраняться во времени постоянство соотношений фоновых элементов и компенсирующих друг друга элементов с отрицательными и положительными отклонениями. Иными словами геосистема будет сохранять во времени свою пространственную структуру. При этом не исключено «превращение» положительных и отрицательных отклонений от фона друг в друга, то есть своеобразная «миграция» типов пространственных элементов с сохранением их пропорции. Наиболее легко такую «мерцающую мозаику» (Likens, Bormann, 1995) представить в виде оконной динамики древостоя и связанных с ним кустарникового, травяного, мохового и других ярусов. Если же отклонения нескомпенсированы, то будет нарастать частота сильно отклоняющихся от средних значений; распределение может приобретать бимодальность с «провалом» в интервале средних значений или асимметричность. Тогда распределение перестает быть нормальным, что и должно использоваться как индикатор нарастающих изменений в ландшафте под действием какого-то сильного фактора.

Для ландшафта обской террасы можно представить прогрессирующее накопление влаги в межбугровых понижениях, формирование торфяных горизонтов почв под сосновым мелколесьем, вытеснение исходных кедрачей, постепенный захват этими комплексами подножий и склонов холмов. В результате будет сокращаться доля фоновых зеленомошных фаций и отклонений от фона в сторону сухости (например, мелкотравных лесов) и нарастать доля отклонений в сторону влажности. Будет формироваться асимметрия распределения, утрата нормальности распределения. Со временем фации с болотным обликом начнут преобладать, бугры почти «утонут» в торфе и превратятся в редкие отклонения от нового «болотного» фона в сторону сухости. То есть сформируется принципиально иной ландшафт с другими параметрами распределения. В нем на фоне торфяных болот с некоторыми средними значениями влажности будут присутствовать уравновешивающие друг друга «сухие» минеральные острова (вершины погребенных в торфе бугров) и участки с максимальным (наиболее рано начавшимся) торфонакоплением. В сущности именно такой ландшафт и преобладает на огромных пространствах 3-й и 4-й левых террас Оби.

Для Обского ландшафта характерно сочетание болотных и суходольных урочищ, которые можно рассматривать как следствие дивергенции бугристого ландшафта. Болотные урочища отличаются от суходольных по всему набору свойств компонентов. Присутствие в массиве данных обоих типов урочищ дает высокие коэффициенты детерминации мультирегрессионная модель, в основном за счет контраста свойств двух групп урочищ, вызванных различиями водного режима и сопряженных с ним свойств (теплового режима, окислительно-восстановительной обстановки, микроклимата и т.п.). Исключение из модели фаций с ясно выраженным торфонакоплением (более 20 см) дает снижение коэффициентов детерминации при том, что количество степеней свободы снижается (Хорошев, 2012в). Например, качество наилучших в ландшафтном

масштабе моделей зависимости обилия видов фитоценоза от четырех осей строения почвенного профиля меняется следующим образом: для мохово-лишайникового яруса от 62% описанной дисперсии до 17%, для травяного — от 49 до 28%, для древесного — от 35 до 6%, для кустарничкового — от 55 до 10% (табл. 12). Отметим, что гораздо более обычна ситуация, когда уменьшение числа степеней свободы (зависящее от количества данных) приводит к возрастанию качества модели за счет большей однородности данных.

Таблица. 12.

Сравнение почвенно-фитоценотических связей в заболоченных и суходольных фациях Обской террасы и Куршской косы. Доля описанной дисперсии по мультирегрессионной модели второй степени зависимости оси дифференциации яруса фитоценоза от совокупности четырех осей дифференциации мощности почвенных горизонтов.
Жирным курсивом выделены достоверные модели.

Ландшафт	Обский		Куршская коса	
Уровень ландшафтного разнообразия	Лесо-болотный ландшафт (201 описание)	Группа лесных урочищ (мощность торфа менее 20 см, 169 описаний)	Лесо-болотный ландшафт (110 описаний)	Группа лесных урочищ (мощность торфа менее 20 см, 97 описаний)
% описаний в болотных урочищах	16	0	15	0
Оси дифференциации (ярус и порядковый номер				
Деревья 1	***38***	***17***	***34***	***38***
Деревья 2	***35***	6	8	8
Кустарники 1	5	6	16	***25***
Кустарники 2	***18***	10	***31***	***24***
Травы 1	***36***	***20***	18	18
Травы 2	***49***	***28***	***32***	***32***
Кустарнички 1	***55***	10	19	17
Кустарнички 2	11	10	***29***	23
Мхи 1	***62***	***17***	***22***	***26***
Мхи 2	11	***16***	13	16

Таким образом, оказывается, что в пределах группы суходольных урочищ имеет место высокое разнообразие сочетаний состояний почв и растительности, то есть почвы позволяют существовать разнообразным фитоценозам. Различие фитоценозов (кедровники, пихтарники, ельники, осинники; гилокомиумовые, мелкотравные; черничные, брусничные и т.п.) может быть объяснено другими факторами, не связанными с почвами, в том числе чисто фитоценотическими. По совокупности свойств нескольких компонентов строго доказывается интуитивно понятный факт, что внутренние различия группы суходольных урочищ (эоловые бугры, плоские междуречья, малые долины) имеют более низкий ранг, чем отличия в целом суходольных и болотных урочищ. Следовательно, необходимо строить иную модель почвенно-растительных связей для группы суходольных урочищ, построенную на другой гипотезе (например, влияние не

морфологических, а химических свойств почв, различий сезонных режимов промерзания, прогревания, переувлажнения и т.п.).

Сравнение попарных непараметрических коэффициентов корреляции Спирмена показывает, что при исключении болотных урочищ из анализа большинство почвенно-фитоценотических связей «растворяется». Соотношение сосняков и пихтарников (1-я ось дифференциации древостоя), противоположно распределенных по гигротопам, в группе лесных урочищ меняется сопряженно с группой травяных растений, включающих, с одной стороны, бореальные виды щитовник, майник и голокучник, с другой — плаун сплюснутый, княженика, звездчатка (7-я ось дифференциации травостоя). Пространственное распределение указанной группы травяных растений контролируется формами мезорельефа, расстоянием до основного дренирующего водотока и распределением длительно-мерзлых горизонтов почв, что заставляет предполагать подчиненность микроклиматическим контрастам, обусловленным мезорельефом. Однако, связи с инертными характеристиками почвенного профиля (набором и мощностью почвенных горизонтов) отсутствуют. Следовательно, на «внутриместностном» уровне (в группе лесных урочищ) в качестве фактора дифференциации фитоценоза может выступать микроклиматический режим, не отраженный в строении почв морфологически, но, видимо, влияющий на некоторые физические свойства почв. Связь существует в высокосомкнутых древостоях, примерно соответствующих зональной норме. К сожалению, автор не располагает достаточным количеством данных, прежде всего — о сезонном промерзании почв, для проверки этой гипотезы.

Другой пример возрастания плотности связи при переходе на более низкий иерархический уровень организации ландшафта (от лесоболотного ландшафта к группе лесных урочищ) представляют отношения между древесным (4-я ось дифференциации древостоя — ось сукцессии) и травяным ярусами (2-я и 3-я оси дифференциации травостоя — оси влажности и освещенности). Этот пример в большей степени, чем предыдущий, отражает почвенные контрасты, так как одновременно увеличивается плотность связи 4-й оси древостоя с 1-й и 3-й осями дифференциации почвенных горизонтов (соответственно, осями влажности и сукцессионных изменений). Существует достоверная связь контролируемых этими осями-факторами почвенных свойств (степени развития дернины, гумусированности почвы) с сомкнутостью крон, проективным покрытием травостоя, количеством травяных видов, проективным покрытием мхов, а также с пространственным распределением гигротопов. Таким образом, ряд свойств почв и количественных характеристик степени развития ярусов фитоценоза зависит от локальных различий влажности. Порядковый номер связанных в описываемой плеяде осей дифференциации древостоя (4-й) и травостоя (2-й и 3-й) указывает на существование процесса перераспределения влаги более низкого порядка, чем основной, обусловливающий дифференциацию заболоченных котловин и дренированных междуречий. Плеяда отражает перераспределение влаги между вершинами, склонами и подножьями бугров, приводящее к формированию: на одном полюсе — пихтово-осиновых сообществ свежих гигротопов с плауном годичным, воронцом, голокучником, кислицей, звездчаткой на гумусированных почвах с развитой дерниной; на другом полюсе — елово-кедровых сообществ влажных гигротопов с плауном булавовидным, осоками на почвах с более развитыми подзолистыми горизонтами.

Покажем на примерах нескольких плеяд свойств, какую информацию дает изменение иерархического уровня анализа, то есть охваченного ландшафтного разнообразия.

Плеяды образованы группами свойств с высокими коэффициентами корреляции Спирмена.

Первая плеяда объединяет 4-ю ось дифференциации древостоя, 3-ю — мхов, 1-ю — травостоя, 2-ю — кустарничков. Плеяда слабо связана с почвенно-гидрологическими условиями и отражает внутрифитоценотические отношения, связанные с различиями пологосклонных и крутосклонных поверхностей. На крутых склонах растет обилие костяники, плевроциума Шребера, пихты и осины, на пологих — падает. Распределение значений этих осей при исключении заболоченных фаций отклоняется от нормального. Это свидетельствует о неравновесности ландшафтоформирующего процесса в пределах группы лесных урочищ, в отличие от равновесности его на более высоком иерархическом уровне лесоболотного ландшафта. Распределения приобретают отрицательный эксцесс и асимметрию. «Недостаток» средних значений индицирует «разбалансированность» свойств вследствие принципиально разных механизмов формирования свойств на пологих и крутых склонах при «норме» состояния на плоских поверхностях. Вероятно, плеяда отражает различия в трофности местообитаний, в частности сокращение глубины оподзоливания на крутых склонах и увеличение — на пологих, порожденные различными особенностями выщелачивания в зависимости от уклонов. Судя по слабым связям с морфологическими свойствами почв, перечисленные свойства фитоценозов чувствительны к некоторым неописанным характеристикам почв.

Вторая плеяда объединяет 1-ю, 7-ю, и 8-ю оси дифференциации древостоя, 5-ю и 7-ю травостоя, 1-ю и 4-ю — мощности почвенных горизонтов, 1-3-ю – цветовых характеристик почв. Плеяда отражает сопряженные изменения почвенного и растительного по мере старения древостоя в интервале 60–180 лет. В почвах в течение этого периода деградируют горизонты EL и ELB, нарастает торф (рис. 35), слабо выражено нарастание AY, растет покрытие мхов, особенно гилокомиума. Плеяда этих факторов при исключении заболоченных фаций приближается к нормальному распределению, что свидетельствует о наличии единого правила равновесной дифференциации этих свойств в группе лесных урочищ. Свойства ландшафта отражают процессы, свойственные зональным среднетаежным ландшафтам и несвойственные болотным и заболоченным урочищам (или протекающие в них по-другому). Имеются общие преобладающие в пространстве зональные (таежные) фоновые характеристики, при которых каждый из задействованных в плеяде факторов не действует или имеет средние значения и уравновешивается действием остальных факторов. Имеются также более или менее симметричные отклонения от фона в ту и другую сторону, обусловленные, видимо, положением фаций на разных стадиях послепожарной восстановительной сукцессии.

Таким образом, *внутрифитоценотические связи на Обском полигоне достаточно прочны как в масштабе лесоболотного ландшафта, так и внутри группы лесных урочищ. Почвенно-фитоценотические связи резко ослабевают в группе лесных урочищ*, что свидетельствует о несопряженной дифференциации компонентов в группе лесных урочищ. Существует внутренняя иерархия фитоценозов (возможно связанная с разнообразием сукцессионных стадий), но почвенный покров при этом либо можно считать несущественно контрастным для фитоценоза, либо однородным.

Аналогичные оценки на других полигонах дали иные результаты. Ни на одном из полигонов исследования в средней тайге, южной тайге, зоне смешанных лесов не зафиксировано такого резкого снижения качества модели почвенно-растительных связей при исключении категории болотных фаций, как в Западной Сибири. Возможно, это

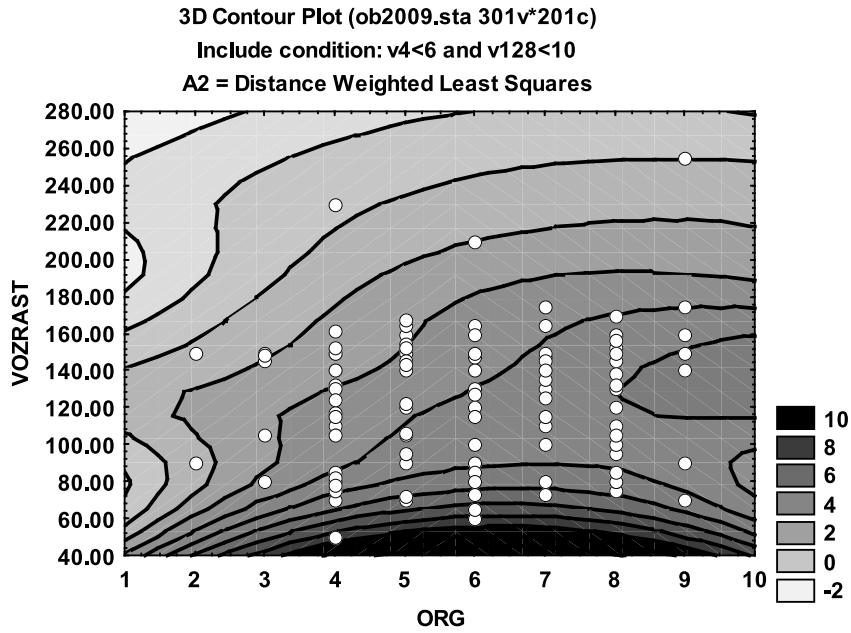

Рис. 35. Снижение мощности элювиального горизонта почв (A2) и нарастание торфа (ORG) в неболотных урочищах по мере старения древостоя (VOZRAST) в среднетаежном ландшафте Обской террасы.

объясняется более глубокой дивергенцией свойств урочищ в условиях континентального климата, иным уровнем конкурентоспособности некоторых видов растений (например, сосны, ели), а также отсутствием антропогенной нарушенности лесных сообществ на исследованном участке западносибирской тайги.

Куршский хвойно-широколиственнолесной ландшафт. Диапазон уровней «урочище – ландшафт». На Куршской косе большинство осей дифференциации компонентов ландшафта не подчиняется нормальному распределению. Следовательно, нельзя говорить о сопоставимых вкладах процессов в ландшафтную дифференциацию. Однако при исключении из выборки фаций с накоплением неразложившегося органического вещества более 10 см (то есть нехарактерных для зональных смешаннолесных ландшафтов, а более характерных для таежных или болотных) многие ключевые оси дифференциации травостоя (с порядковыми номерами 1, 3, 4, 7, 8), древостоя (6, 7, 8), почвенных горизонтов (1, 2, 4) приобретают нормальное распределение. Оподзоливание и гумусонакопление, одновременно выраженные в зональных условиях смешанных лесов, уравновешены за пределами заболоченных участков (2-я ось дифференциации почвенных горизонтов). Наиболее типичны песчаные почвы с очень слабой дифференциацией профиля на маломощные гумусовый и подзолистый горизонты. Они соответствуют условиям высокой дренированности бедных песчаных почв дюн и плоских поверхностей высокой пальве, составляющим основной фон. Отклонения от средних значений в сторону отрицательных значений связаны с развитием хорошо гумусированных почв на «моренном острове» и в урочищах низкой пальве с относитель-

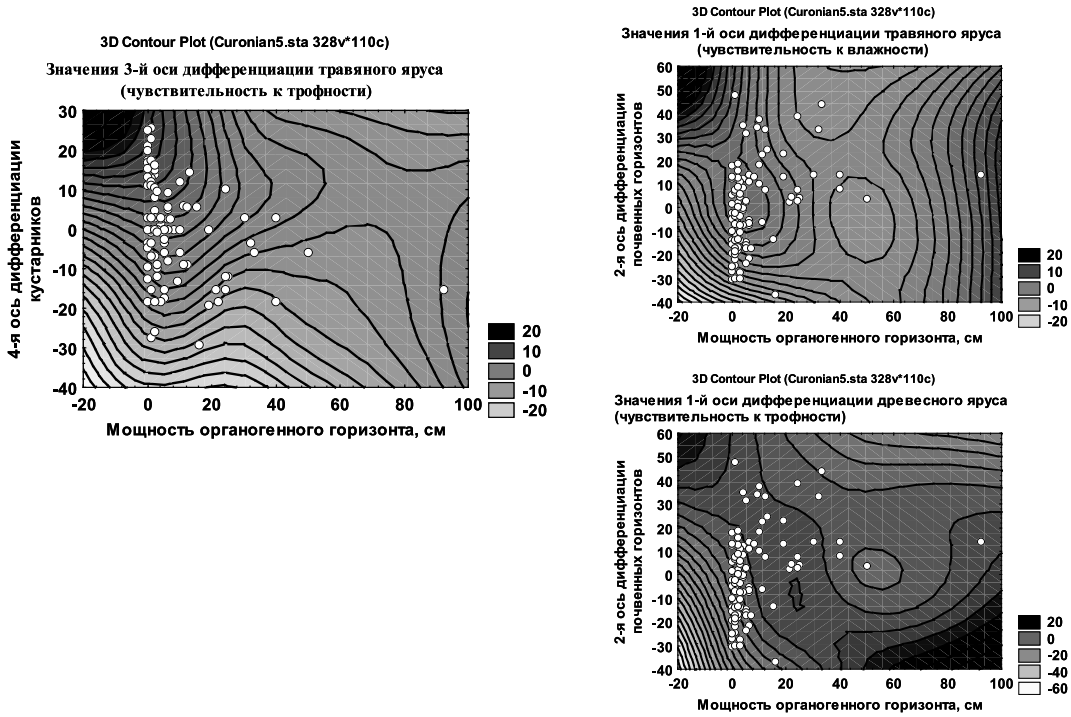

Рис. 36. Разрушение почвенно-фитоценотических связей при нарастании мощности органогенного горизонта почв в смешаннолесном ландшафте Куршской косы.
При слаборазвитых до 10 см органогенных горизонтах существуют почвенно-фитоценотические и внутрифитоценотические связи. При накоплении органического вещества в почвах связи разрушаются.

но близким положением богатых грунтовых вод. Отклонения в сторону положительных значений фактора связаны с развитием подзолистого процесса на сухих вершинах дюн. Отклонения от фоновых значений сопровождаются параллельными изменениями древесного (соотношение хвойных и широколиственных пород), травяного (соотношение ксеромезофитных и мезофитных видов) и мохово-лишайникового (соотношение лишайников и зеленых мхов) ярусов.

Распределение азотного питания почв также уравновешено за пределами заболоченных участков. Накопление в нитрофильных местообитаниях компенсируется выносом из боровых местообитаний. Вариации сопровождаются параллельными изменениями древесного, травяного и мохового ярусов (соотношение видов боровых и нитрофильных местообитаний).

Сравнение плотности связей в группе лесных урочищ и в лесоболотном ландшафте в целом дает на Куршской косе иные результаты, по сравнению с лесоболотным ландшафтом Обской террасы. Почвенно-фитоценотические связи могут возрастать в группе лесных урочищ, т.е. при мощности органогенного горизонта менее 10 см (рис. 36). Прежде всего, это касается связи набора и мощности почвенных горизонтов с видовым составом древесного, травяного и мохово-лишайникового ярусов, а цветовых характе-

ристик почв — с видовым составом кустарничкового яруса. Кустарниковый ярус на этом иерархическом уровне наоборот становятся более независимыми по отношению к почвам и взаимодействует почти исключительно с другими ярусами фитоценоза.

Сравнение ландшафтов Куршской косы и Обской террасы показывает неодинаковую степень интеграции лесоболотного ландшафта.

1. На Куршской косе практически нет осей дифференциации свойств, которые имели бы нормальное распределение в лесоболотном ландшафте. На Обской террасе таких осей довольно много (8), что показывает наличие общих единых процессов. Однако все оси, значения которых распределены нормально в лесоболотном ландшафте, относятся к числу третьестепенных, то есть определяют очень небольшую долю варьирования.

2. На Обской террасе абсолютное большинство осей, взаимосвязанных в лесной группе урочищ (увеличивающих корреляцию при исключении болот), подчиняется нормальному распределению, что свидетельствует об уравновешенности ландшафтоформирующих процессов. К ним относятся сукцессионный фактор, что отражает единое время формирования растительного покрова (после пожара 1864 г.). Отклонения связаны с периодической локальной оконной динамикой и, возможно, сохранением наследия допожарных древостоев.

3. На Обской террасе в суходольных урочищах существенные контрасты почвенно-растительных комбинаций еще не сформировались. Велико пересечение ареалов почвенных и растительных признаков, не выражена специализация фитоценозов по почвенным условиям. Имеет место относительная независимость большинства изученных почвенных и растительных признаков до некоторой возрастной стадии (около 80 лет). Имеет место разнообразие сукцессионных состояний фитоценозов, в некоторой степени связанное с ходом процессов оподзоливания и гумусонакопления. Но тогда следует трактовать разнообразие как положение на разных стадиях развития и ожидать тенденцию к нарастанию контрастов по мере старения фитоценоза (который еще не достиг возраста формирования первого яруса древостоя зонального типа с преобладанием кедра). Сопряженное саморазвитие почв и фитоценоза должно привести к росту внутренней контрастности группы лесных урочищ. Но исходная почвенно-литогенная дифференциация не является в группе лесных урочищ фактором дифференциации фитоценозов. Фитоценоз, видимо, постепенно сам создает эту дифференциацию. Геоморфологические различия менее существенны для первых по значимости осей дифференциации древостоя, мхов, почвенных горизонтов, цвета почв. Следует подчеркнуть, что речь идет о процессах, специфичных именно для группы лесных урочищ и действующих именно на этом иерархическом уровне. Они проявляются на фоне мощных факторов дифференциации более высокого иерархического уровня, охватывающие весь лесоболотный ландшафт, прежде всего — фактора перераспределения влаги между эоловыми буграми и межбугровыми понижениями.

4. Общее правило ослабевания связей при переходе с уровня лесоболотного ландшафта на уровень группы лесных урочищ на обоих полигонах свидетельствует о фундаментальном значении неравновесных ландшафтоформирующих процессов. В обоих случаях они связаны с прогрессирующей дивергенцией лесных и болотных урочищ. Обособление этих групп обязано общему в масштабах обоих ландшафтов процессу перераспределения влаги между палеоэоловыми положительными и отрицательными формами рельефа.

5. Развитие органогенных горизонтов мощностью более 10 см на Обской террасе и Куршской косе разрушает почвенно-фитоценотические и внутрифитоценотические связи, существующие при отсутствии органонакопления. Органическое вещество экранирует влияние свойств минеральных горизонтов почв на фитоценоз: фитоценоз одинаков даже при различном строении минеральной части почв. В большинстве случаев отсутствие связи в лесоболотном ландшафте объясняется «эффектом шипа» на точечном графике, то есть большим разбросом значений свойства при слабом накоплении или отсутствии органогенных горизонтов и сужением диапазона возможных значений оси с обеих сторон от 0. Это свидетельствует о нейтрализации действия большинства фактора при накоплении органики.

4.4. Межуровневые связи как индикатор полимасштабности ландшафтной организации

Каждый ПТК (ранга примерно фации при размере ОТЕ 10 или 30 м или урочища при размере ОТЕ 400 м) по выдвинутой гипотезе находится в рамочных условиях, заданных некоторой вмещающей геосистемой неизвестного размера Определение размера вмещающей геосистемы представляет специальную задачу, которая ранее в ландшафтоведении не ставилась. Для этого делается допущение, что *если изменятся характеристики рельефа в некоторой окрестности операционной территориальной единицы (ОТЕ), соответствующей вмещающей геосистеме более высокого ранга, то должны измениться и характеристики самой ОТЕ*. Разные характеристики компонентов ландшафта могут оказаться чувствительны к свойствам окрестности разного размера. Окрестность, к которой наиболее чувствительно то или иное свойство, характеризует пространство развития некоторого процесса. Такой процесс на разных участках может проявляться с разной интенсивностью и создает на каждом таком участке специфическое закономерное сочетание элементов рельефа и сопряженных с рельефом свойств компонентов, т.е. формирует мозаику геосистем.

Приведенные ниже рассуждения основаны на результатах сравнительного анализа серии статистических моделей, объясняющих свойства ОТЕ свойствами окрестностей разного размера, то есть гипотетических вмещающих геосистем. Напомним, что показателем качества применяемых в данной работе нелинейных мультирегрессионных моделей второй степени считается высокое, стремящееся к 1, значение коэффициента детерминации при стремящемся к нулю значению ошибки первого рода p. Значительное превышение значения коэффициента детерминации модели, составленной для какой-либо окрестности, по сравнению с моделями для окрестностей других размеров, индицирует «резонансные» отношения, т.е. подчиненность исследуемого свойства ОТЕ свойствам вмещающей геосистемы данного размера. В таком случае вмещающая геосистема считалась уже не гипотетической, а реально существующей. Таким образом, выявляются и количественно оцениваются *межуровневые связи*, т.е. наличие рамочных условий, навязываемых природно-территориальному комплексу геосистемой более высокого ранга.

В исследованных регионах характеристики вмещающих геосистем меняются постепенно по мере удаления от водоразделов (обычно слабовыраженных на плоских междуречьях) и роста расчлененности рельефа в направлении речных долин. На всех участках (кроме Куршской косы и Приобья) короткие глубокорасчлененные крутые склоны (большие горизонтальная и вертикальная расчлененность и кривизны), соседствующие с относительно плоскими

междуречьями (малые горизонтальная и вертикальная расчленненность и кривизны), свидетельствуют о ведущей роли неотектонического фактора ландшафтной дифференциации. Поднятие сопровождается формированием глубоких разрывных нарушений, вскрывающих по бортам долин пласты коренных карбонатных пород пермского (в Архангельской области и Удмуртии), мелового, юрского или триасового (в Костромской области и в ее Кологривском районе) возраста. Результатом являются высокие показатели вертикальной и горизонтальной расчлененности рельефа. Более пологие слаборасчлененные длинные склоны, как правило, соответствуют ареалам проявления процессов ледниковой или водноледниковой аккумуляции по бортам долин, нивелирующей контрасты доледникового рельефа. Густая сеть равномерно распределенных в пространстве слабоврезанных ложбин стока с пологим продольным профилем (большая горизонтальная и малая вертикальная расчлененность) в пределах небольшой окрестности индицирует господствующую роль для ландшафтной дифференциации современной эрозии с самоорганизацией гидрографической сети. Последний процесс подробно рассматривался в ландшафтоведении (Арманд, 1988; Викторов, 1998).

Продемонстрируем на региональных примерах три аспекта понятия «полимасштабная организация географического ландшафта» применительно к межуровневым связям. Графическое изображение приоритетных (резонансных) межуровневых связей для каждой оси дифференциации свойств компонентов ландшафта представлено на серии рисунков (рис. 37–41).

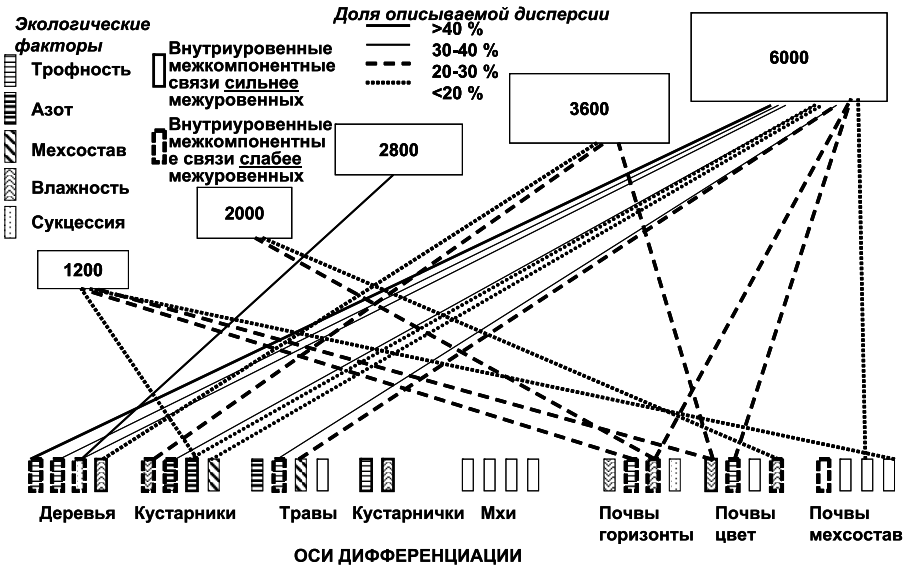

Рис. 37. Межуровневые связи для свойств компонентов хвойно-широколиственнолесного ландшафта в Удмуртии.

Цифры в прямоугольниках – линейный размер квадратной окрестности, м. Линии — доля дисперсии оси, описываемой мультирегрессионным уравнением 2-й степени, в котором зависимая переменная — значение оси (меры чувствительности компонента к экологическому градиенту) в ПТК, независимые переменные – четыре морфометрические характеристики рельефа (вертикальная и горизонтальная расчлененность, вертикальная и горизонтальная кривизна) в квадратной окрестности.

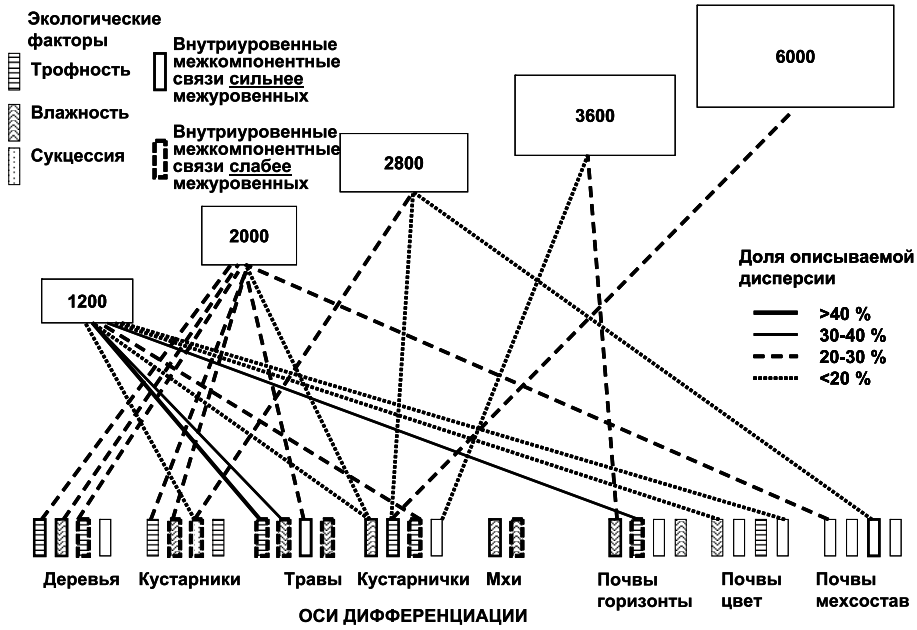

Рис. 38. Межуровневые связи для свойств компонентов среднетаежного ландшафта в Архангельской области (полигон «Заячья»). Условные обозначения — см. рис. 37.

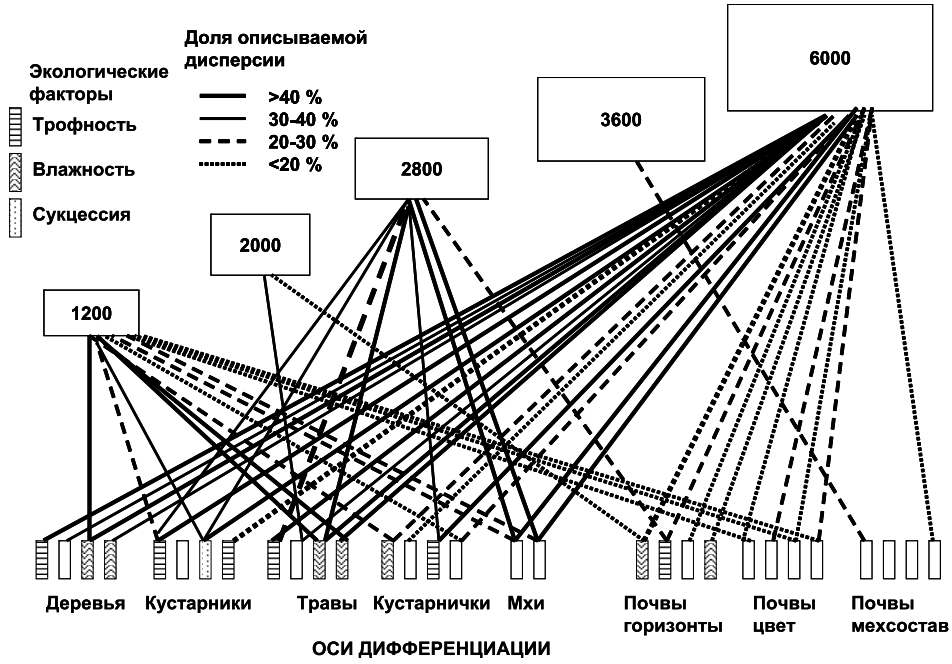

Рис. 39. Межуровневые связи для свойств компонентов Гридинской местности среднетаежного ландшафта в Архангельской области (полигон «Трансект»). Условные обозначения — см. рис. 37.

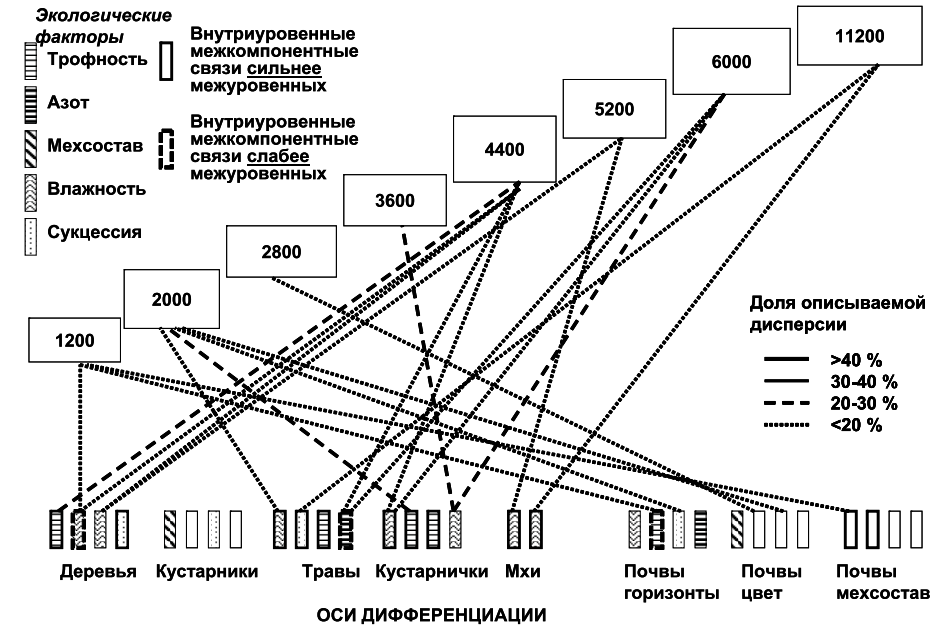

Рис. 40. Межуровневые связи для свойств компонентов южнотаежного ландшафта в Кологривском районе Костромской области. Условные обозначения — см. рис. 37.

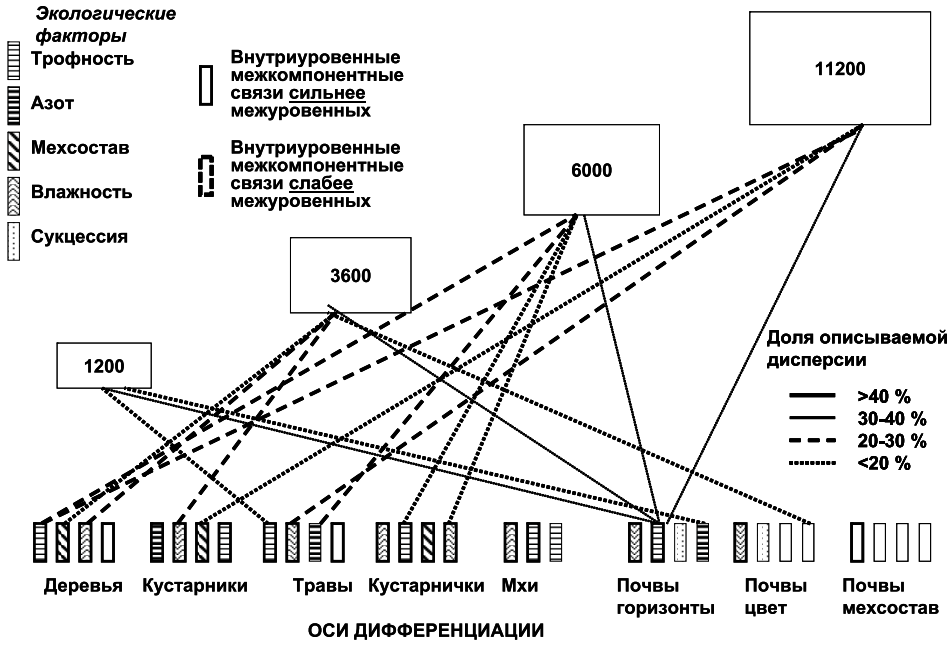

Рис. 41. Межуровневые связи для свойств компонентов южнотаежных ландшафтов в Костромской области. Условные обозначения — см. рис. 37.

4.4.1. Подчиненность разных свойств ПТК разномасштабным процессам

Первый аспект полимасштабной организации геосистемных взаимодействий — подчиненность разных свойств одного и того же ПТК разномасштабным процессам и возможность наличия некоторого «контролирующего» иерархического уровня геосистем. Чувствительность разных свойств одного компонента ландшафта к характеристикам пространства разных размеров показывает участие их в разномасштабных современных процессах или унаследованность пространственного варьирования от разномасштабных палеопроцессов. Основная задача исследования межуровневых взаимодействий сводится к выявлению «резонансного» уровня вмещающей геосистемы, который является наиболее значимым для каждого свойства.

В ***Удмуртии*** примером могут служить 2-я и 3-я оси дифференциации травяного яруса, отражающие чувствительность, соответственно, к трофности и к механическому составу почв (рис. 37). Соотношение видов травостоя, чувствительных к трофности почвообразующих отложений (богатых покровных суглинков и бедных песков), наилучшим образом описывается морфометрическими характеристиками окрестности 6000 м. Коэффициент детерминации монотонно возрастает при подстановке в регрессионное уравнение в качестве независимых переменных характеристик окрестностей возрастающего размера (табл. 13). Следовательно, травостой принципиально различен в зависимости от положения в пределах плоских поверхностей или нижних частей склонов коренных увалов, из которых первые были подвержены палеопроцессу накопления покровов лессовидных суглинков, а вторые — водноледниковых песков (рис. 42, В). Вообще максимальную чувствительность к структурам рельефа со средними размерами 6000 м имеет большая группа осей (рис. 37). Практически все они интерпретируются как оси трофности и различают богатые лессовидно-суглинистые и относительно бедные песчаные местообитания. В первом случае возникают леса с участием широколиственных пород, пихты, с неморальным травостоем, с лещиной, калиной, черемухой на глубокогумусированных почвах. Во втором – преимущественно на склонах долин и террасах — сосняки с можжевельником, жимолостью, шиповником с хорошо развитым подзолистым горизонтом.

3-я ось дифференциации почвенных горизонтов и 4-я ось дифференциации цвета почв отзывчивы к варьированию структур рельефа размером 2000 м. Физически максимальные значения этих взаимосвязанных свойств соответствуют замедленному преобразованию подстилки в гумус при слегка избыточном натечном (но не застойном) увлажнении, ослабленном прокрашивании гумусом верхних горизонтов почвы (5–15 см), повышенном ожелезнении средних горизонтов почв (30–40 см), ослабленном ожелезнении — нижних горизонтов (50–60 см). Для обоих свойств выражена параболическая связь с вертикальной расчлененностью (рис. 43). Это означает, что максимальных значений оба свойства достигают при либо минимальной расчлененности (центральные части плоских междуречий шириной не менее 2 км), либо — при максимальной (как правило, крутые глубокорасчлененные оврагами склоны увалов). Оба свойства достигают максимальных значений скачком при переходе от свежих к влажным и сырым гигротопам. Таким образом, устанавливаются два варианта формирования влажных почв. Первый вариант соответствует застою влаги на междуречьях (возможно также в нераспознаваемых при разрешении ЦМР 400 м водосборных понижениях и междуреч-

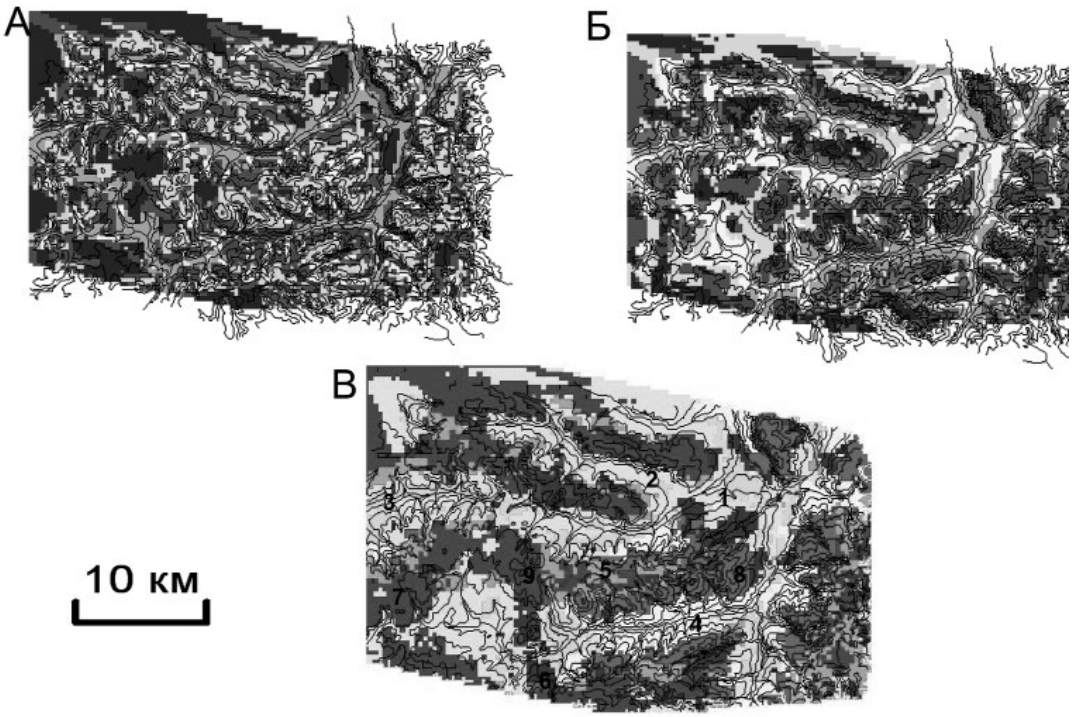

Рис. 42. Классификация рельефа хвойно-широколиственнолесного ландшафта бассейнов р. Ныша и р. Сюга в Удмуртии, выделенных методом к-средних по четырем морфометрическим характеристикам в квадратной окрестности каждого пиксела. Разрешение цифровой модели рельефа 400 м. А — квадратная окрестность со стороной 1200 м, Б — со стороной 2800 м, В — со стороной 6000 м (цифры — см. в тексте, раздел 4.8.2).

ных котловинах). Второй вариант — при разгрузке щелочных грунтовых вод в нижней части склонов увалов близ контакта с террасами, в том числе, в овраги и малые долины, хорошо распознаваемые классификацией рельефа по окрестности 2,0 и 2,8 км (рис. 42, Б). Минимальные значения, достигаемые на пологих слаборасчлененных склонах и на узких междуречьях, соответствуют, наоборот, интенсивному гумусонакоплению при ослабленном накоплении подстилки, т.е. более или менее зональным условиям почвообразования.

Своеобразная группа свойств — 4-я ось дифференциации древостоя, 1-я ось дифференциации кустарников, 1-я ось дифференциации цвета почв — соответствует случаю резонансных отношений со структурами рельефа размерами 3600 м. Наиболее велика их связь с вертикальной кривизной. Общая особенность этих свойств — чувствительность к условиям увлажнения (например, формированию глеевой или окислительной среды в почвах). Формирование признаков глеевой обстановки в почвах происходит при минимальной вертикальной кривизне рельефа. Особенность классификации рельефа по признакам окрестности 3600 м — генерализация индивидуальных малых долин, балок и оврагов и выделение в качестве целостных образований склонов увалов, в той или иной степени расчлененных, основных долин и поверхностей увалов. Иначе говоря, для

Таблица. 13.

Зависимость осей дифференциации компонентов от морфометрических характеристик рельефа в квадратной окрестности операционной территориальной единицы, обеспеченной полевыми описаниями. Доля описанной дисперсии (коэффициент детерминации * 100) в мультирегрессионном уравнении. Разрешение цифровой модели рельефа 400 м. Удмуртия, смешаннолесной ландшафт. Жирным курсивом выделены достоверные уравнения. Условные обозначения — см. табл. 6.

Удмуртия	Линейный размер квадратной окрестности, м				
	1200	2000	2800	3600	6000
D1herb	10	8	7	10	9
D2herb	***20***	***22***	***22***	***24***	***34***
D3herb	10	12	***14***	***20***	***27***
D4herb	12	13	12	12	9
D5herb	6	6	6	5	9
D6herb	11	11	8	6	12
D7herb	8	9	12	8	5
D8herb	8	12	9	12	11
D1tree	***28***	***28***	***27***	***28***	***48***
D2tree	***18***	***22***	***20***	***20***	***34***
D3tree	***30***	***29***	***35***	***32***	***36***
D4tree	11	***14***	***14***	***18***	***14***
D5tree	***15***	12	***16***	13	*17*
D6tree	8	9	9	9	7
D7tree	8	8	7	9	***15***
D8tree	***17***	12	11	11	***27***
D1low	12	11	11	11	12
D2low	4	6	9	9	9
D1bush	12	***15***	***18***	***21***	***16***
D2bush	10	***19***	***22***	***22***	***34***
D3bush	***14***	10	10	9	***17***
D4bush	10	11	10	12	***17***
D1col	***20***	***14***	11	***22***	***19***
D2col	***19***	***19***	***17***	***18***	***21***
D3col	9	7	9	10	11
D4col	7	***14***	13	9	15
D1hor	7	4	3	6	12
D2hor	***20***	11	12	13	10
D3hor	***19***	***24***	***22***	***18***	***27***
D4hor	11	13	13	11	9
D1text	6	11	10	12	10
D2text	4	8	6	4	5
D3text	14	12	8	13	***18***
D4text	***16***	***14***	10	5	7

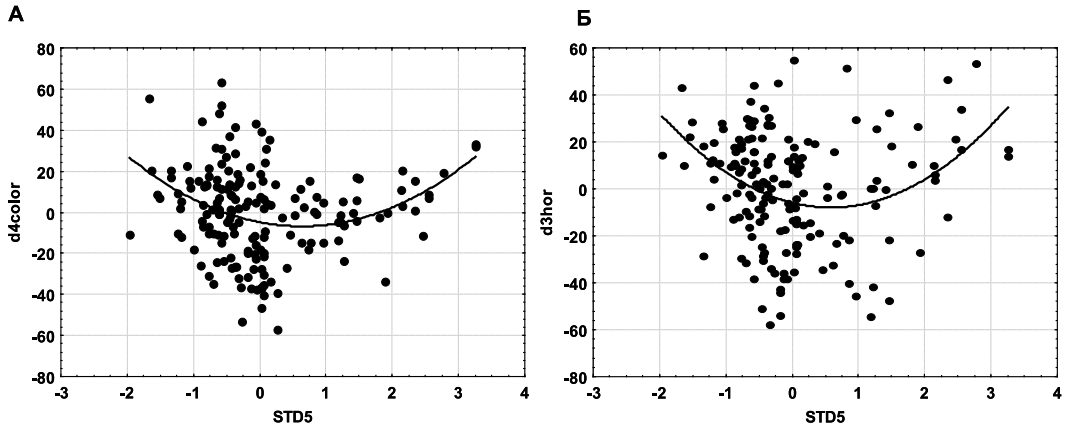

Рис. 43. Параболическая зависимость осей дифференциации цвета почв (А) и мощностей почвенных горизонтов (Б) в Удмуртии от вертикальной расчлененности рельефа в окрестности со стороной 2000 м.

свойств ландшафта, чувствительных к этому уровню, безразличны конкретные эрозионные формы, а важно само положение в пределах центрального сектора расчлененной склоновой местности, вблизи перегиба к нижележащей террасе (т.е. в местах разгрузки грунтовых вод) или перегиба к водораздельной поверхности. Поскольку основная смысловая интерпретация этой группы факторов — влажность, единство склоновой местности следует связывать с общим глубоким положением грунтовых вод. Противоположными свойствами обладают местности с нулевой или отрицательной вертикальной кривизной. Это водораздельные и пойменно-террасовые (особенно у тыловых швов) местности, более благоприятные для появления влаголюбивых или выносливых к переувлажнению видов деревьев (береза, ольха серая) и кустарников (смородина черная и красная, крушина, малина) и для формирования восстановительной среды в почвах, в том числе с накоплением перегноя. Иначе говоря, если эти признаки и встречаются, то не в густорасчлененных местностях с выпуклыми склонами. При этом совершенно необязательна повсеместная оглеенность почв водораздельных поверхностей, пойм и террас. Речь идет лишь о повышенной встречаемости этих признаков.

Итак, *для исследованных районов южной Удмуртии геосистемы со средними линейными размерами 6000 м следует признать создающими наиболее сильно действующие рамочные условия для основной группы свойств операционных территориальных единиц. Крупные структуры рельефа создают наиболее значимый для территории ландшафтный контраст — между богатыми лессовидно-суглинистыми и бедными песчаными местообитаниями*. Обособление столь крупных вмещающих геосистем объясняется двумя группами палеопроцессов: неотектоническими движениями, создавшими контраст увалов и долин, и аллювиально-водноледниковой аккумуляцией, обеспечившей бедный песчаный субстрат в нижних частях склонов и днищах долин.

В ***Архангельской области (полигон «Заячья»)*** уровень рельефа со средними линейными размерами структур 1200 м является резонансным для группы осей, ответствен-

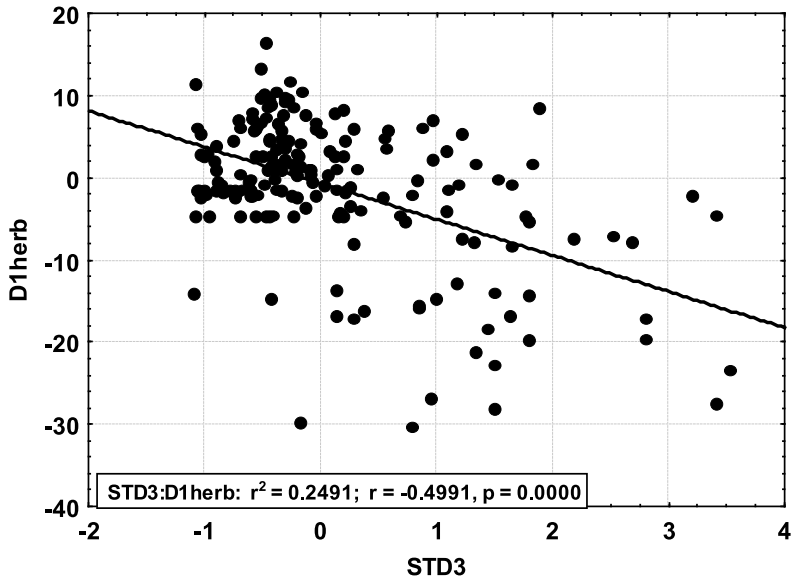

Рис. 44. Варьирование соотношения бореальных и субнеморально-нитрофильных ассоциаций травяного яруса (1-я ось дифференциации) в зависимости от вертикальной расчлененности рельефа в квадратной окрестности со стороной 1200 м. Среднетаежный ландшафт, Архангельская область, полигон «Заячья».

ных за дифференциацию травостоя (1-я, 2-я и 6-я оси), кустарничкового яруса (1-я и 3-я оси), кустарникового яруса (3-я ось), почв (3-я ось горизонтов, 1-я и 4-я оси дифференциации цветовых характеристик) (рис. 38). Обращает на себя внимание наличие в этом списке первых по значимости осей, а также отсутствие осей дифференциации древостоя и мхов.

Интерпретация этих осей различна, но легко сводится к двум группам процессов, ареалы которых могут совпадать в пространстве: перераспределения влажности и пространственной дифференциации трофности. Геологическое строение территории таково, что рост дренированности связан с увеличением густоты и глубины разрывных нарушений, приближающих к поверхности богатые карбонатами пермские мергели. На плохо дренированных слаборасчлененных поверхностях, как правило, богатые мергели и относительно богатые карбонатные моренные суглинки экранированы супесчаным чехлом или торфяными отложениями. Поэтому наблюдается совмещение в пространстве влажных и бедных местообитаний. Судя по размерам структур рельефа, основной фактор, определяющий дифференциацию части свойств почвенно-растительного покрова — современное эрозионное расчленение внутри крупных неотектонических блоков разного высотного положения (Хорошев, 2003б). Процесс эрозионного расчленения достаточно динамичный, по сравнению с временем формирования неотектонических блоков. Он может вызывать относительно быстрые изменения пространственной структуры ландшафта, следствием которых становятся:

✓ рост дренированности выпуклых форм рельефа,

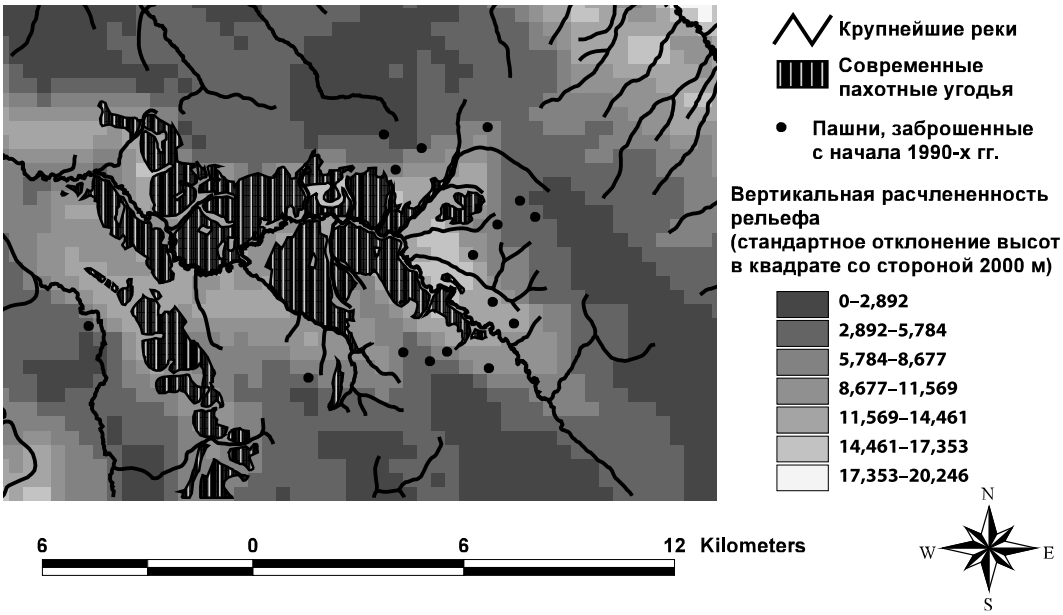

Рис. 45. Расположение заброшенных в 1990-е гг. сельскохозяйственных угодий, зарастающих древесно-кустарниковой растительностью, в связи с вертикальной расчлененностью рельефа в квадратной окрестности со стороной 2000 м. Среднетаежный ландшафт, Архангельская область, полигон «Заячья».

- ✓ смыв экранирующего чехла обедненных основаниями озерно-ледниковых отложений с выпуклых форм,
- ✓ приближение к поверхности богатых основаниями мергелей и моренных суглинков,
- ✓ формирование зон разгрузки богатых грунтовых вод в вогнутых позициях формах рельефа,
- ✓ улучшение условий накопления гумуса и перегноя,
- ✓ ухудшение условий оподзоливания и торфонакопления,
- ✓ соответствующие всему вышеперечисленному сдвиги пропорций бореальных, суббореальных и нитрофильных растительных сообществ (рис. 44).

Антропогенная деятельность довольно четко вписывается в рамочные условия, диктуемые эрозионным расчленением, так как наиболее дренированные и богатые местообитания подвергались в течение XX века распашке и мелиорациям. В строении почвы это отразилось в росте глубины гумусированности профиля за счет формирования пахотного горизонта (рис. 45). Вырубки в наиболее доступных дренированных местах вызвали рост доли мелколиственных пород в современном древостое, что, в свою очередь, способствовало увеличению сомкнутости травяного яруса и гумусонакоплению в почвах.

Имеющийся обильный материал полевых исследований в Архангельской тайге позволяет проверить гипотезу о единообразном влиянии вмещающих геосистем на все элементарные ПТК, находящиеся в пределах одной ОТЕ. Для этого проведено специальное исследование на участке «Трансект» с дробным шагом (25 м) описания

элементарных геосистем ранга фаций (Хорошев, 2002), который обеспечивает решение этой задачи применительно к ОТЕ ранга примерно урочища с размерами 400 м. В один пиксел (ОТЕ) укладывается 16 исходных точек описаний (всего их — 309), а с учетом разреживания, сделанного с целью сопоставимости размера массивов для всех участков в Архангельской тайге, — в среднем 9. Сочетание трансектных данных и данных цифровой модели рельефа с разрешением 400 м позволяет ответить на следующий вопрос. Если изменятся свойства геосистемы группы урочищ, то изменятся ли согласованно все фации внутри урочища, находящегося в центре этой группы урочищ?

Допустим, некоторую фацию, мы считаем репрезентативной для ОТЕ (пиксела ЦМР) с линейным размером 400 м, примерно соответствующей по размерам рангу традиционного урочища. Фация может оказаться и не вполне репрезентативной. Тогда мы неоправданно объясним ее свойства свойствами вмещающей геосистемы, в то время как на самом деле она для данной вмещающей геосистемы нетипична в силу мощного действия некоторого фактора локального масштаба (например, выхода грунтовых вод, небольшого ветровала или вырубки). Если же каждая ОТЕ охарактеризована не единственным, а несколькими описаниями, то легко проверяется, существуют ли некоторые общие свойства ОТЕ, благодаря которым можно ее рассматривать как одно целое, жестко контролируемое своим окружением. Близкий смысл вкладывался В.Б. Сочавой (1978) и А.А. Крауклисом (1979) в разделение понятий «коренная фация» и «мнимокоренная фация». Если межуровневая связь между свойствами фаций и свойствами вмещающих геосистем отсутствует, то подтвердится гипотеза об отсутствии целостности урочища как системы, воспринимающей сигнал от вышестоящей геосистемы и передающей это «руководящее указание» всем своим составным частям, то есть фациям. В большинстве случаев это будет означать наличие мнимокоренных фаций внутри урочища. Если связь будет обнаружена, то подтвердится гипотеза о согласованном поведении в пространстве фаций, входящих в урочище, в зависимости от варьирования свойств более крупной геосистемы.

С одной стороны, повторение морфометрических характеристик в примыкающих друг к другу элементарных геосистемах трансекта может влиять на результирующие показатели связи. С другой стороны, эта ситуация отражает реальность: в пределах одного условного «урочища» с размерами 400 м могут существовать фации как похожие друг на друга, так и довольно контрастные. Более того, внутриурочищная вариабельность может быть сопоставима или даже превышать вариабельность единиц более высокого ранга, что было показано еще в 1970-х гг. в исследованиях Сибирского института географии (Крауклис, 1979).

При анализе межкомпонентных связей и выявлении иерархии геосистем для Архангельского трансекта выявлено несколько особенностей по сравнению с исследованием в ландшафтном масштабе, т.е. в пределах участка «Заячья» (табл. 14). Во-первых, повторяются морфометрические характеристики на целых отрезках трансекта. Во-вторых, коэффициенты детерминации намного выше, чем в ландшафтном масштабе. В-третьих, большинство характеристик достоверно связано с рельефом почти любой окрестности. В-четвертых, практически для всех изученных свойств ландшафта (осей дифференциации почвенно-растительного покрова) характерен один и тот же резонансный уровень с линейными размерами вмещающей геосистемы 6000 м (рис. 39).

Таблица. 14.

*Зависимость осей дифференциации компонентов от морфометрических характеристик рельефа в квадратной окрестности операционной территориальной единицы, обеспеченной полевыми описаниями. Доля описанной дисперсии (коэффициент детерминации * 100) в мультирегрессионном уравнении. Разрешение цифровой модели рельефа 400 м. Архангельская область, среднетаежный ландшафт. Полигон «Трансект». Жирным курсивом выделены достоверные уравнения. Условные обозначения — см. табл. 6.*

Ось дифференциации	Линейный размер квадратной окрестности, м				
	1200	2000	2800	3600	6000
D1tree	***27***	***39***	***43***	***47***	***48***
D2tree	***35***	***39***	***29***	***35***	***32***
D3tree	***59***	***59***	***63***	***67***	***68***
D4tree	***17***	***30***	***30***	***32***	***32***
D1herb	***50***	***52***	***39***	***47***	***47***
D2herb	***34***	***36***	***38***	***39***	***36***
D3herb	***52***	***45***	***46***	***59***	***61***
D4herb	***56***	***52***	***55***	***58***	***57***
D5herb	***16***	***22***	***24***	***26***	***19***
D6herb	***34***	***27***	***30***	***30***	***28***
D7herb	11	***14***	***14***	8	11
D8herb	***13***	***20***	***17***	***22***	***23***
D1bush	***41***	***41***	***40***	***40***	***41***
D2bush	12	11	11	***13***	***14***
D3bush	***39***	***42***	***36***	***41***	***39***
D4bush	11	***16***	***14***	10	***14***
D1low	***22***	***19***	***17***	***25***	***22***
D2low	***18***	***15***	***14***	***21***	***20***
D3low	***45***	***38***	***37***	***37***	***40***
D4low	***20***	***21***	***21***	***27***	***22***
D1moss	***24***	***42***	***36***	***39***	***40***
D2moss	***30***	***34***	***33***	***36***	***38***
D1hor	7	***22***	***17***	***21***	***21***
D2hor	***22***	***24***	***18***	***28***	***27***
D3hor	12	***14***	11	9	9
D4hor	11	***13***	***14***	***15***	***14***
D1col	***15***	***15***	***19***	***20***	***18***
D2col	***20***	***15***	***18***	***23***	***22***
D3col	12	***19***	***15***	***23***	***17***
D4col	***16***	***25***	***22***	***26***	***21***
D5col	10	***13***	12	***13***	***14***
D6col	***17***	***14***	***18***	***19***	***18***
D1text	***19***	***25***	***25***	***27***	***22***
D2text	10	8	10	7	8
D3text	8	12	***13***	9	11
D4text	***16***	11	***14***	***14***	***15***

При попытке выявить резонансный уровень межуровневых связей по значениям коэффициентов детерминации обнаруживается довольно «смазанная» картина. По многим осям при наличии общего максимума коэффициентов детерминации для уровня 6000 м наблюдается «синусоидальное» распределение значений коэффициентов детерминации, то есть чередование повышений и понижений значений при переходе к модели следующей по размерам окрестности. Значимость отдельных морфометрических характеристик меняется при переходе от одной окрестности к другой. Чувствительность большинства осей к вертикальному расчленению наиболее велика при окрестности со стороной либо 6000 м, либо 1200 м. Чувствительность к горизонтальной расчлененности может быть максимальной при разных окрестностях. Для горизонтальной кривизны характерна смена знака связи с осями при переходе от малых окрестностей к большим. Пики значимости для связей с этой величиной характерны для окрестностей со стороной 2000 и 3600 м, минимумы — для окрестностей со стороной 2800 и 6000 м. Вертикальная расчлененность оказывает максимальное воздействие в окрестности 6000 м, минимальное — в окрестности 2800 м; для ряда факторов характерен также пик чувствительности к окрестностям 2000 и 3600 м. Таким образом, видно, что особое значение приобретают характеристики кривизны в окрестности 3600 м. Для горизонтальной расчлененности в ландшафте это соответствует «полосчатым» структурам, пересекающим его в юго-восточном направлении. Они соответствуют чередованию продольных долин и ступенчатых поверхностей междуречий, связанных с неотектоническими блоками, поверхность которых в целом понижается в юго-западном направлении. Их проявление в ландшафтах на разных иерархических уровнях подробно описаны в ряде публикаций (Хорошев, 2003а, б; Пузаченко и др., 2003).

Исходной гипотезой нашего анализа предусматривается, что значения каждого свойства могут формироваться под действием процессов, происходящих на разных иерархических уровнях. Тогда недоописанная моделью определенного масштаба часть варьирования может быть представлена как результат наложения эффекта другого иерархического уровня. Иными словами, модель уровня А (например, связывающая свойства геосистемы уровня «0» с предположительными размерами около 25 м со свойствами вмещающей геосистемы уровня «+1» размерами около 1200 м) прогнозирует значение свойства (например, обилие бореальных видов травостоя) существенно выше или ниже, чем наблюдаемое на самом деле. Ход рассуждений следующий: «При таких наблюдаемых характеристиках рельефа в окрестности 1200 м (600 м от точки описания в каждую сторону) бореальных видов должно быть больше». Это несоответствие можно объяснить одновременной подчиненностью «рамочным условиям», заданным геосистемой уровня «+2» (например, с размерами 3600 м). Тогда возможно попытаться объяснить варьирование остатков от модели А (мера несоответствия между наблюдаемыми и предсказанными значениями) с варьированием свойств геосистемы уровня «+2» (модель Б). Если модель Б окажется достоверной, это будет означать, что реальные значения свойства зависят от накладывающегося влияния двух иерархических уровней вмещающих геосистем.

Проиллюстрируем сказанное на примере факторов дифференциации травостоя на трансекте. Ось 3 интерпретируется как чувствительность видов к степени гидроморфности местообитания. Для нее получены достаточно высокие достоверные значения коэффициента детерминации для всех окрестностей (табл. 14). Однако максимальная зависимость выявлена для геосистем с размерами 1200 и 6000 м. Остатки от модели для

уровня 1200 м никоим образом не объясняются свойствами геосистем более высоких уровней. Однако остатки от модели для окрестности 2800 м (коэффициент детерминации 0,48) обнаруживают достоверную связь со свойствами геосистем уровня 6000 м (коэффициент детерминации 0,23), 3600 м (коэффициент детерминации 0,21), 1200 м (коэффициент детерминации 0,17). Следовательно, качество модели резко улучшается при привлечении в качестве объяснения свойств рельефа в окрестности 6000 м. Ярким примером служит отрезок трансекта при пересечении поперечной депрессии верховьев ручья Большого (рис. 46). Основная модель для окрестности 2800 м прогнозирует сырой гигротоп (с ятрышником, ситником), хотя в реальности представлен свежий (с господством бореального мелкотравья из кислицы, седмичника, майника, грушанки). Однако поперечное по отношению к трансекту вилкообразное разветвление верховий долины является частью крупной наклонной дренированной ступени рельефа, примыкающей снизу к основной слабодренированной водораздельной поверхности. Эта ступень хорошо выделяется классификацией рельефа по окрестности 6000 м и не выделяется классификацией для окрестности 2800 м (рис. 47). Уклон создает менее влажное местобитание, чем прогнозируется моделью «2800 м», учитывающей положение в долине и предполагающей наличие в ней мест разгрузки грунтовых вод, но не учитывающей ее принадлежность к более крупной дренированной геоморфологичесой структуре. Таким образом, качество модели «2800 м» искажается действием рамочных условий, или констант, заданных более широкоохватным фактором (процессом, действующим на более высоком иерархическом уровне «6000 м»).

Противоположный эффект — влияния более узколокальных факторов, искажающих модель, — покажем на примере главной оси дифференциации травостоя (рис. 48). 1-я ось дифференциации травостоя интерпретируется как чувствительность к трофности. Она наилучшим образом объясняется свойствами геосистем размерами 6000 м, то есть сопоставимыми со структурами, созданными наиболее крупными разрывными нарушениями (им соответствуют долины Заячьей, Соденьги, Пукомы). Остатки от модели, однако, невозможно объяснить какими-либо более локальными процессами, происходящими в геосистемах размерами 1200, 2000, 2800, 3600 м. Модель для окрестности 2800 м вполне достоверна с коэффициентом детерминации 0,26. Однако анализ причин повышенных (по модулю) значений остатков показывает, что часто они связаны с действием факторов более локального проявления, чем для окрестности 2800 м. Максимальные по модулю остатки (то есть преувеличенно мегатрофные или преувеличенно олиготрофные местообитания) соответствуют участкам трансекта, где наиболее велика горизонтальная расчлененность рельефа в окрестности 1200 м (рис. 48). В местах сгущения поперечных впадин, связанных с неотектоническими нарушениями низкого порядка, качество модели зависимости фактора трофности травостоя от окрестности 2800 м снижается (большие остатки). Модель предсказывает олиготрофные местообитания, характерные в целом для центральных частей водораздельных поверхностей. Привлечение данных о рельефе более узкой окрестности 1200 м показывает наличие близких эрозионных форм, в водосборах которых может сокращаться мощность песчано-супесчаного чехла и уменьшаться глубина выщелачивания карбонатов из моренных суглинков. В результате формируется относительно богатый травостой с грушанкой круглолистной, звездчаткой дубравной, гравилатом речным.

Модель «2800 м» не делает различия между эрозионными формами (например, верховьями долины Пукомы) и примыкающими участками междуречья, выделяя лишь

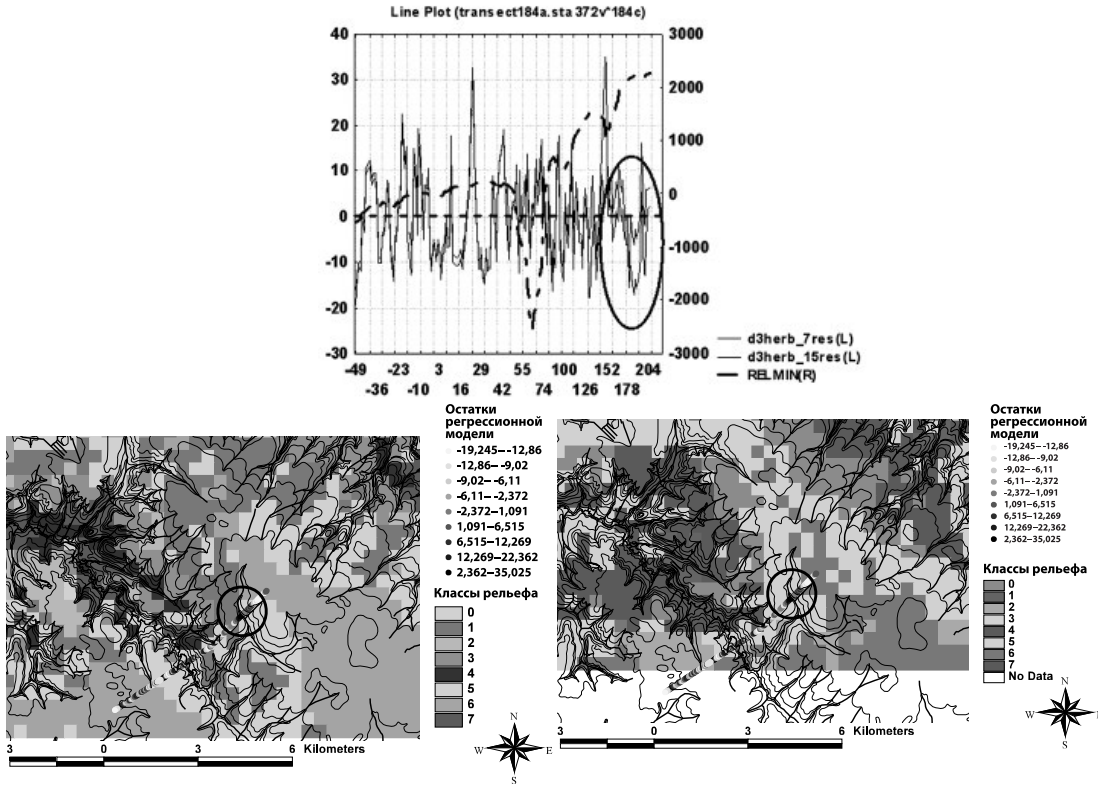

Рис. 46. Ось влажности травостоя (d3herb) на полигоне «Трансект» в Архангельской области: влияние структур рельефа разной размерности.
Обведена зона, с разной точностью описываемая моделями. А — варьирование остатков мультирегрессионных моделей 2-й степени уравнений зависимости по трансекту. Тонкая кривая (d3herb_7res) — уравнение зависимости от морфометрических характеристик рельефа в квадратной окрестности со стороной 2800 м. Жирная кривая (d3herb_15res) — то же со стороной 6000 м. Пунктир — гипсометрический профиль по трансекту. Прямая прерывистая линия — нулевые остатки (совпадение предсказанных уравнением и наблюдаемых значений). Б — модель зависимости от рельефа в окрестности 2800 м предсказывает более сухие местообитания в верховьях ручья Большого, чем наблюдаемые. Модель 2800 м «видит» долину, но «не видит» принадлежность ее к более крупной структуре. В — модель для окрестности 6000 м выявляет крупную тектоническую ступень с разгрузкой грунтовых вод на склоне долины, что создает влажное местообитание. Большие остатки от модели 2800 м объясняются процессами более высокого иерархического уровня 6000 м.

центральные наиболее слаборасчлененные части (рис. 47). Более узколокальная модель «1200 м» четко разделяет собственно малую долину Пукомы, придолинные части с дренирующимися в долину заболоченными депрессиями и возвышенные части междуречья. Наиболее высокотрофные местообитания приурочены к склонам эрозионных форм, где либо понижена мощность песчано-супесчаного чехла, либо на поверхности

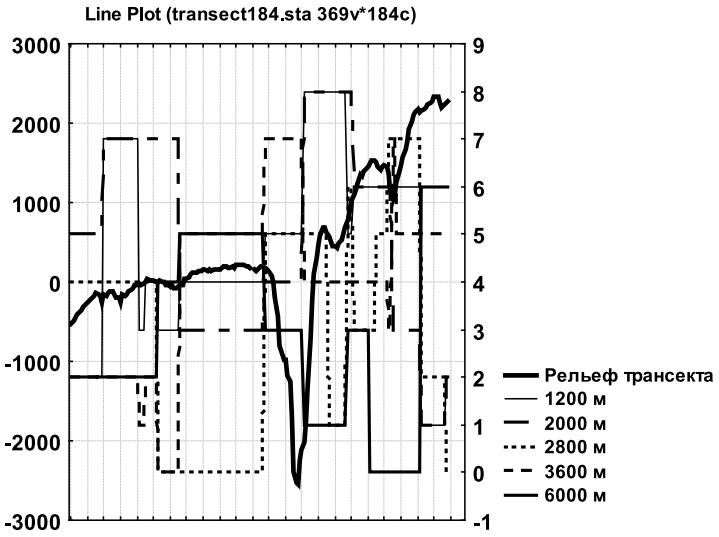

Рис. 47. Классификация рельефа трансекта при разрешении 400 м в разных окрестностях. Среднетаежный полигон «Трансект» в Архангельской области.

находятся карбонатные моренные суглинки или карбонатные пермские мергели. Еще более локально действующие факторы не отражаются моделью «1200 м» с разрешением 400 м. Можно предполагать, например, наличие на некоторых участках склонов долин не богатых основаниями моренных отложений, а мощного чехла озерно-аллювиальных песков, создающих олиготрофные местообитания с преобладанием сосны и бореального мелкотравья. Для этого требуется модель более высокого разрешения, которая будет способна отразить морфометрические различия в пределах склонов, террас, пойм узких долин, которые при разрешении 400 м «умещаются» в один пиксел.

Итак, *для участков исследования в Архангельской области для ОТЕ с разрешением 400 м наиболее характерный линейный размер вмещающих геосистем оценен в 1200 м. Уменьшение территориального охвата, расстояний между описанными фациями и ландшафтного разнообразия приводит к возрастанию тесноты межуровневых связей. Снижение качества моделей межуровневых связей на некоторых участках объясняется наложением эффектов влияния вмещающих геосистем иного иерархического уровня*.

В ***Кологривском районе Костромской области*** резонансный уровень отношений между характеристиками рельефа вмещающих геосистем и осями дифференциации компонентов выявляется достаточно четко для большинства осей дифференциации растительности, редко — для почв (табл. 15). Формы рельефа ближайших окрестностей (3–7-кратных), которые ассоциируются с индивидуальными эрозионными и ледниковыми формами, оказываются менее существенными, чем рельеф окрестностей, объединяющих группы форм рельефа (9–29-кратных). Наиболее часто рамочные условия создаются геосистемами со стороной 4400 м (рис. 40). Классификация по свойствам рельефа в таком квадрате различает генетически различные территории с разной густотой расчленения, зависящей от соотношения моренных, водноледниковых, эро-

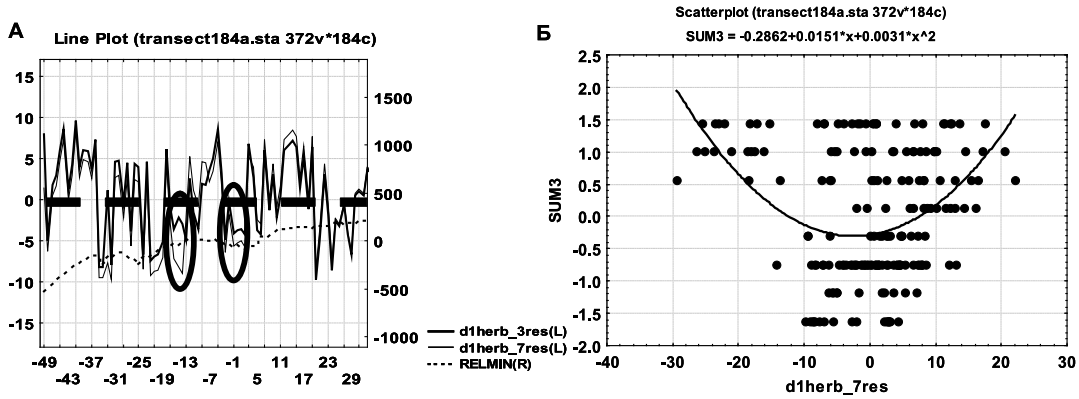

Рис. 48. Ось трофности травостоя (d1herb) на полигоне «Трансект» в Архангельской области: влияние структур рельефа разной размерности.
А — варьирование остатков мультирегрессионных моделей 2-й степени уравнений зависимости по трансекту. Тонкая кривая (d1herb_7res) — уравнение зависимости от морфометрических характеристик рельефа в квадратной окрестности со стороной 2800 м. Жирная кривая (d3herb_3res) — то же со стороной 1200 м. Пунктир — гипсометрический профиль по трансекту. Прямая прерывистая линия — нулевые остатки (совпадение предсказанных уравнением и наблюдаемых значений). Б — большие остатки от модели 2800 м объясняются высокими значениями горизонтальной расчлененности в квадратной окрестности 1200 м. В — в местах поперечных впадин, связанных с неотектоническими нарушениями низкого порядка, качество модели зависимости фактора трофности травостоя от окрестности 2800 м снижается (большие остатки). Модель предсказывает более высокотрофные местообитания, чем на самом деле. Привлечение данных о рельефе более узкой окрестности 1200 м показывает наличие депрессий и их склонов с олиготрофной растительностью.

зионных, структурных форм (рис. 49). Хорошо различаются: а) плоские моренно-водноледниковые водораздельные поверхности диаметром около 5–10 км; б) густо расчлененные малыми эрозионными формами борта долины с выходами коренных пород; в) неглубокорасчлененные моренно-водноледниковые слабонаклонные местности; г) краевые части междуречий с сосредоточением водосборных понижений и верховьев долин.

Четко обособляется группа осей, совершенно нечувствительных к рельефу и одновременно — к механическому составу почв, т.е. индифферентных к морфолитогенной основе ландшафта. Практически все они характеризуют процессы восстановительных сукцессий: значения осей обнаруживают достоверные корреляции с возрастом древостоев, сомкнутостью крон, диаметрами, высотами древостоя (4-я и 6-я оси дифференциации древостоя, 2-я — травяного яруса). В то же время оси, характеризующие разный ход восстановительных сукцессий при разных условиях минерального питания (например, восстановление ельников через сосну или осину — 5-я ось дифференциации древостоя), имеют характерный уровень связи с рельефом (3600 м).

Механический состав почв в континуальном представлении через четыре оси многомерного шкалирования не дает возможности выявить зависимость от него расти-

Таблица. 15.

Зависимость осей дифференциации компонентов от морфометрических характеристик рельефа в квадратной окрестности операционной территориальной единицы, обеспеченной полевыми описаниями.

Доля описанной дисперсии (коэффициент детерминации * 100) в мультирегрессионном уравнении. Разрешение цифровой модели рельефа 400 м. Костромская область, Кологривский район, южнотаежные ландшафты.

Жирным курсивом выделены достоверные уравнения. Условные обозначения — см. табл. 6.

Оси дифференциации	Линейный размер квадратной окрестности, м							
	1200	2000	2800	3600	4400	5200	6000	11600
D1 herb	8	***18***	***16***	14	14	14	13	11
D2 herb	5	7	9	7	12	11	14	**16**
D3 herb	3	6	8	9	11	12	10	14
D4 herb	5	11	12	***16***	***19***	***17***	***19***	***17***
D5 herb	13	9	11	13	***18***	***15***	13	14
D6 herb	5	9	7	10	10	9	9	8
D7 herb	5	10	7	5	8	8	8	11
D8 herb	***15***	13	9	11	10	2	10	5
D1tree	6	11	14	***16***	***26***	***21***	***20***	***19***
D2tree	***18***	13	12	13	***18***	***17***	***15***	10
D3tree	8	14	14	14	***20***	***20***	***17***	*19*
D4tree	7	8	7	7	10	10	9	5
D5tree	11	12	14	***20***	***19***	***15***	13	***21***
D6tree	10	8	8	8	6	7	5	6
D7tree	14	11	12	12	***16***	***20***	***20***	***19***
D8tree	7	7	6	8	10	11	14	13
D1low	5	11	10	13	***14***	13	***15***	10
D2low	9	***22***	***17***	***16***	14	10	9	8
D3low	3	4	4	8	9	8	8	7
D4low	12	***19***	***23***	***29***	***26***	***25***	***27***	***21***
D1bush	5	4	13	***15***	***17***	***16***	***18***	***17***
D2bush	13	8	13	13	***16***	8	12	10
D3bush	8	11	12	14	***16***	***15***	***16***	10
D4bush	13	14	10	11	13	12	10	12
D1moss	13	10	9	13	13	***14***	9	13
D2moss	8	12	11	13	14	13	11	***16***
D3moss								
D1col	6	8	6	11	5	8	10	8
D2col	8	9	***15***	11	7	9	10	11
D3col	12	***17***	***15***	***15***	12	8	9	7
D4col	6	6	7	6	13	10	9	6
D1hor	7	7	9	10	10	10	9	13
D2hor	***15***	10	14	12	12	8	11	13
D3hor	12	***15***	10	8	10	10	9	12
D4hor	6	8	11	10	12	10	9	10
D1text	***15***	8	9	9	7	6	5	12
D2text	6	7	9	6	7	6	5	13
D3text	7	12	4	6	7	6	4	3
D4text	10	6	6	4	5	3	5	5

тельного покрова. Однако при дискретизации состояний почвенного профиля по механическому составу для многих осей дифференциации методом дисперсионного анализа легко выявляется какой-либо класс механического состава, при котором значения фактора резко отличаются от остальных классов. Это позволяет выявлять пороговые значения характеристик литогенной основы, при превышении которых проявляется реакция растительности или других свойств почв. Так, минимальная закустаренность и восстановление ели через сосну встречается на песках террас Унжи, повышенное обилие широколиственных древесных пород характерны для лессовидных легких суглинков (в том числе в ядре заповедника «Кологривский лес»), оподзоливание ослаблено на суглинках моренных равнин (рис. 50).

Оси дифференциации свойств компонентов объединяются в несколько групп. Достаточно хорошо разделяются группы осей, чувствительных к влажности (и одновременно к механическому составу), к богатству почв и к стадии сукцессии. Несколько групп осей трудно интерпретируемы. Есть некоторое сходство в резонансных уровнях чувствительности к рельефу осей, входящих в одну группу. Оси, характеризующие перераспределение влажности (большинство из них являются главными для своих компонентов), в основном чувствительны к окрестности 4400–5200 м. Оси, чувствительные

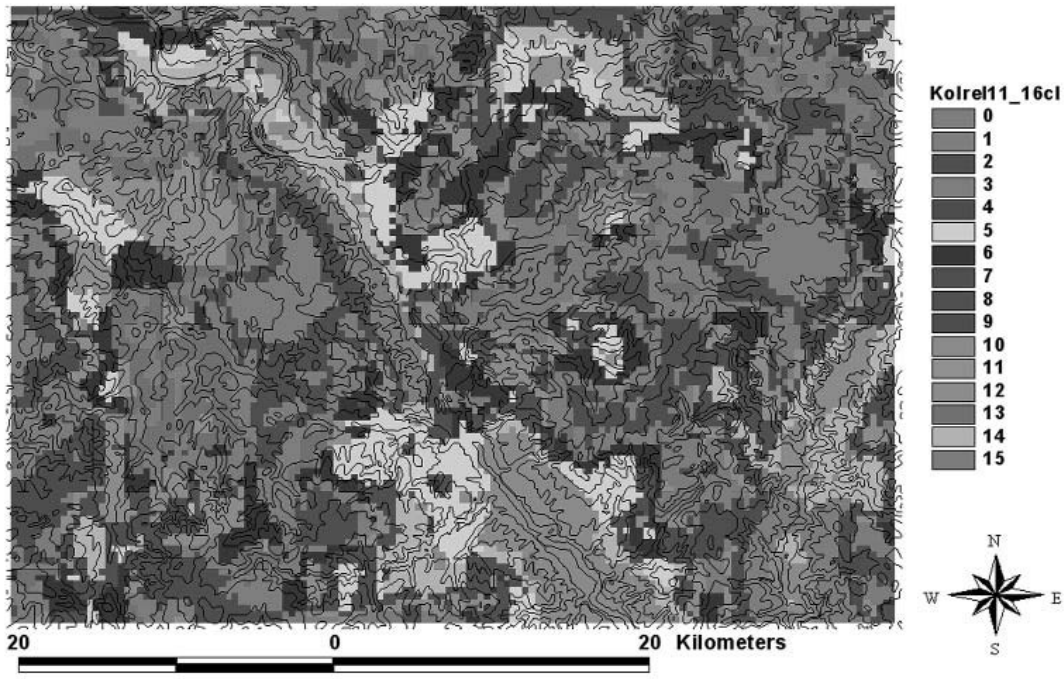

Рис. 49. Классификация рельефа южнотаежных ландшафтов Кологривского района Костромской области.
16 классов, выделенных методом к-средних по четырем морфометрическим характеристикам в квадратной окрестности каждого пиксела. Разрешение цифровой модели рельефа 400 м. Квадратная окрестность со стороной 4400 м.

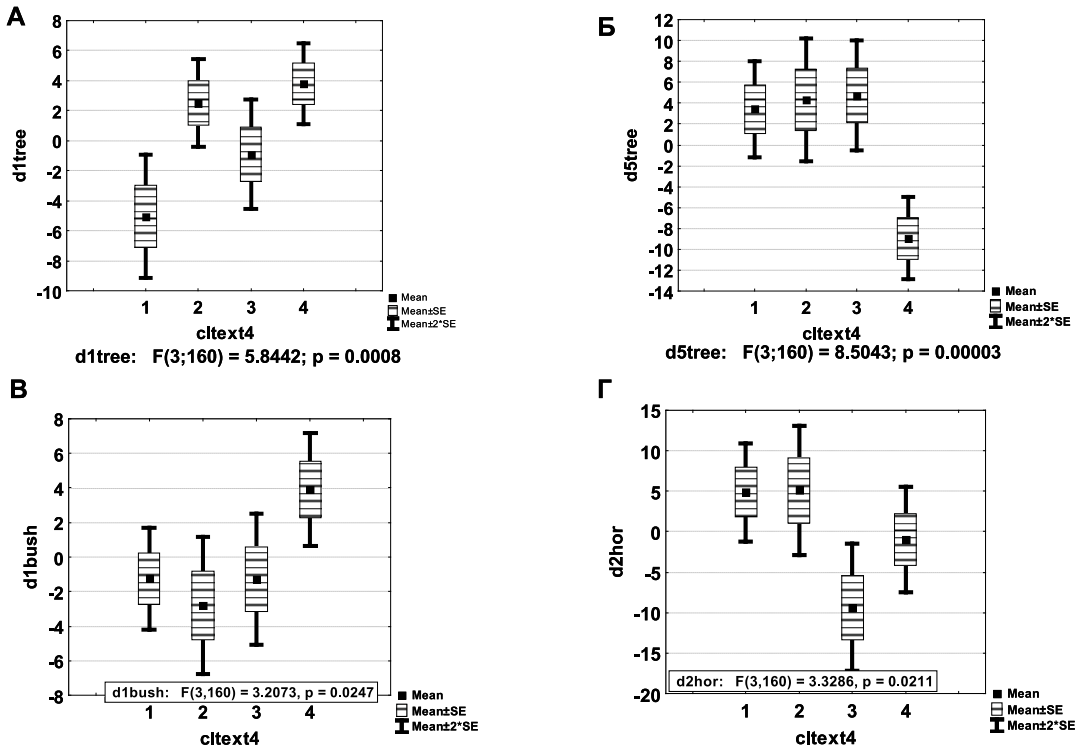

Рис. 50. Зависимость свойств фитоценозов и почв в Кологривском районе Костромской области от классов механического состава почв.
1 — лёссовидные суглинки, 2 — двучленные песчано-суглинистые отложения, 3 — суглинки, 4 — пески. А — господство широколиственных древесных пород (отрицательные значения оси d1tree) характерны для лессовидных легких суглинков (группа 1). Б — восстановление ели через сосну (отрицательные значения оси d5tree) характерно на мощных песках (группа 4). В — закустаренность (положительные значения оси d1bush) минимальна на песках (группа 4). Г — оподзоливание (отрицательные значения оси d2hor) ослаблено на суглинках (группа 3).

к богатству, находятся в резонансе с рельефом в окрестности либо 1200, либо 4400 м, т.е. существуют два уровня процессов распределения трофности (Хорошев, 2010б). Однако, нет оснований утверждать, что всегда в одну группу входят оси дифференциации разных компонентов с единством резонансного уровня отношений с рельефом вмещающей геосистемы. Очевидно, сопряженное варьирование в пространстве осей, объединяющихся в один кластер, объясняется более сложными геосистемными взаимодействиями, которые предстоит выявить (раздел 4.5).

Почвы при выбранном размере ОТЕ 400 м в Кологривском районе вообще не описываются рельефом вмещающих геосистем. Это указывает либо на определяющее влияние локальных процессов подурочищного или фациального уровней (что требует анализа связей с характеристиками рельефа, рассчитанными для более дробной ЦМР), либо на значительный вклад саморазвития, либо на антропогенную нарушенность. Последнее вероятно в местах искусственного лесовозобновления с обработкой почвы.

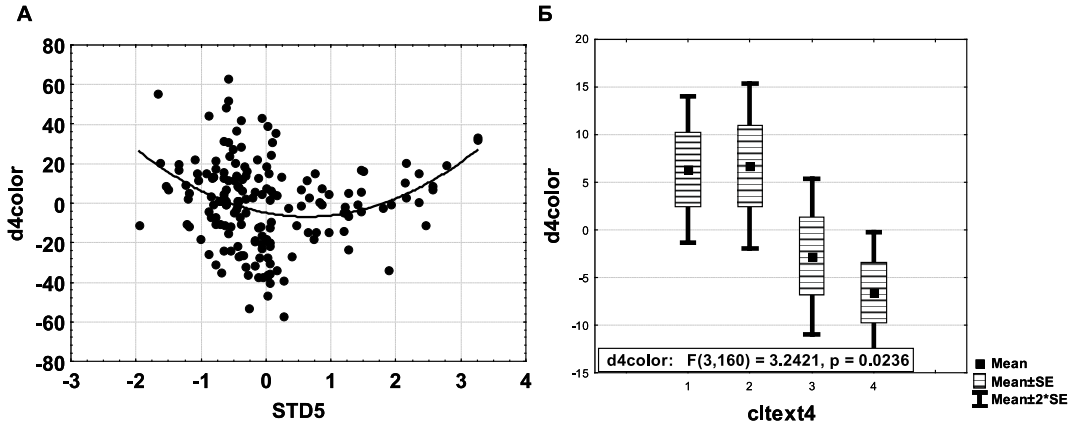

Рис. 51. Чувствительность цветовых характеристик почв Кологривского района Костромской области к дискретным состояниям (классам) механического состава почв.
1 — лёссовидные суглинки, 2 — двучленные песчано-суглинистые отложения, 3 — суглинки, 4 — пески. А — оглеенные почвы (положительные значения оси d1color) встречаются только на суглинках (группа 3). Б — почвы с наиболее яркими признаками отбеливания верхних оподзоленных горизонтов (отрицательные значения оси d4color) встречаются на суглинках (группа 3) или песках (группа 4)

При этом два фактора дифференциации цвета (фактор окисленности и фактор иллювирования гумуса), нечувствительные к рельефу, определяются механическим составом (рис. 51). Ниже в разделе 4.7 приводятся результаты проверки гипотезы о чувствительности свойств почв к более дробному уровню дифференциации рельефа на примере ландшафта заповедника «Кологривский лес».

Таким образом, *в Кологривском районе сопряженность факторов дифференциации компонентов с рельефом в целом ниже, чем в других регионах, но сопоставима с региональным масштабом (Костромская область в целом). Это, безусловно, следует связывать с увеличенным, по сравнению с другими регионами, территориальным охватом наблюдений и более высоким разнообразием территории*.

4.4.2. Подчиненность свойства ПТК процессам, происходящим на нескольких вышестоящих уровнях пространственной организации

Второй аспект полимасштабной организации геосистемных взаимодействий – подчиненность одного и того же свойства ПТК процессам, происходящим на нескольких вышестоящих уровнях пространственной организации.

При описании первого аспекта полимасштабной организации уже были упомянуты эффекты недостаточности единственного резонансного уровня для объяснения варьирования ряда свойств ландшафта. Однако это относилось к случаям, когда один из резонансных уровней имел явный приоритет, а другой вносил второстепенный вклад, с помощью которого оказалось возможным объяснить

локальные ошибки первой модели. Однако, как показал сравнительный анализ межуровневых моделей, возможно равноправное влияние нескольких уровней вмещающих геосистем на свойства ОТЕ. Приведем данные, свидетельствующие в пользу этого положения.

В Удмуртии соотношение процессов окисления и оглеения почв, отражаемое значениями 1-й оси дифференциации цвета почв, контролируется, по крайней мере, двумя уровнями вышестоящих геосистем (рис. 37). Характеристики горизонтальной расчлененности влияют на эти процессы в окрестности со стороной 1200 м, а характеристики вертикальной расчлененности — в окрестности со стороной 3600 м. Это иллюстрирует иерархию геосистемных взаимодействий. Процессы оглеения/окисления на уровне урочища, во-первых, определяются современным процессом самоорганизации стока, охватывающим ряд пространственно сопряженных урочищ (окрестность 1200 м), а во-вторых — наследием палеопроцесса тектонической дифференциации, сформировавшим разные условия для окисления-оглеения в крупных долинах, на склонах и на плоских поверхностях увалов (окрестность 3600 м). В классификации осей (рис. 52) хорошо выделяется группа осей дифференциации древостоя, связанных так или иначе с сукцессионным состоянием (d3tree, d5tree), для

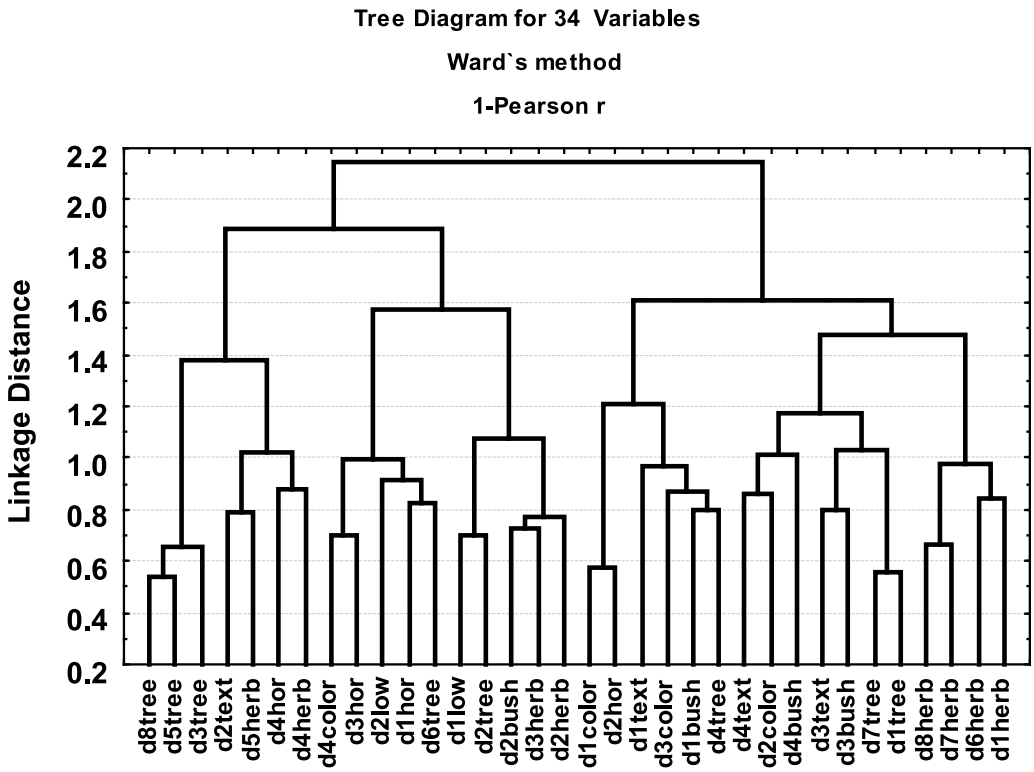

Рис. 52. Классификация осей дифференциации свойств компонентов методом Варда по метрике Пирсона. Смешаннолесной ландшафт в Удмуртии.

которых наблюдаются два резонансных уровня — 2800 и 6000 м. Это, безусловно, показывает смену приоритетов в выборе урочищ для лесозаготовок и лесопосадок в разные периоды. Так, уровень 6000 м различает, прежде всего, поверхности увалов, плоские междуречья и широкие долины (Вала, Ныша, Сюга, Казанка) (рис. 42). При этом на плоских междуречьях в районе пос. Люга преобладают 20–30-летние леса с господством вторичных широколиственных и мелколиственных пород (липа, береза), а на покатых склонах увалов сохранены старовозрастные темнохвойные леса. Отметим, что к этой же группе осей, отражающих антропогенное влияние, относятся 4-я и 5-я оси дифференциации травостоя и 4-я ось дифференциации почвенных горизонтов, ответственная за наличие старопахотных горизонтов. Характерно, что они совершенно нечувствительны к рельефу, т.е. отражают наследие неадаптированного к ландшафтной структуре природопользования.

В Архангельской области (участки «Полигон» и «Трансект») наличие двух контролирующих уровней нехарактерно ни для одного свойства. В Кологривском районе это свойственно оси дифференциации древостоя, ответственным за ход сукцессий в зависимости от трофности (5-я ось).

4.4.3. Различие характера межкомпонентных связей и стоящих за ними процессов во вложенных и вмещающих ПТК

Третий аспект полимасштабной организации геосистемных взаимодействий — различие характера межкомпонентных связей и стоящих за ними процессов во вложенных и вмещающих ПТК.

Все предыдущие рассуждения об аспектах полимасштабной организации относились к достаточно крупным операционным территориальным единицам с линейными размерами 400 м. Они интерпретировались как геосистемы ранга сопоставимого с урочищем. Очевидно, что при таком разрешении не могут быть исчерпывающе описаны межуровневые взаимодействия. Требуется проверка гипотез о значимости более дробных уровней организации ландшафта, адекватных для отражения более локальных межфациальных и межурочищных взаимодействий. Иными словами, требуется найти размеры той элементарной пространственной единицы, которая адекватно отражает комбинацию форм рельефа, обусловливающую возникновение конкретного свойства в конкретной ОТЕ (рис. 53). Для этого необходим сравнительный анализ моделей межуровневых взаимодействий, построенных на основе более грубой и более подробной цифровых моделей рельефа. Это позволит приблизиться к решению фундаментальных вопросов ландшафтных исследований — каковы контролирующие уровни для каждого свойства почвенно-растительного покрова, какие ландшафтные процессы взаимообусловлены близостью характерных времен и какого уровня планирования требует управление хозяйственно-ценными свойствами. Решение поставленных вопросов находится в контексте поиска подходов к уже упоминавшейся проблеме меняющейся пространственной единицы (проблема MAUP) (Openshaw, 1977; Hay et al., 2001; Burnett, Blaschke, 2003).

В ***Архангельской области*** сравнительное исследование межуровневых связей проведено в пределах полигона «Заячья» на фациально-урочищном уровне в луговой балке Становской и на лесном узком междуречье рек Козловка и Стругница при разрешении цифровой модели рельефа 10 и 30 м на основе топографической карты масштаба 1 :

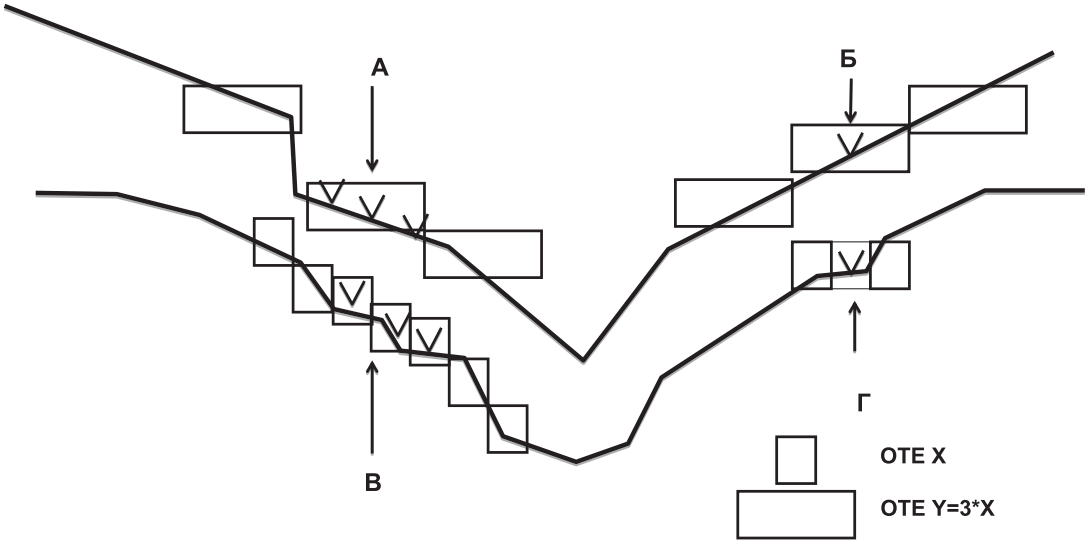

Рис. 53. Значимость размеров ОТЕ для объяснения появления свойства ландшафта.
А — появление свойства объяснимо окрестностью 3*Y, т.к. отражается наличие вогнутого участка склона. Б — появление свойства необъяснимо окрестностью 3*Y, т.к. рельеф неизменен. В — появление свойства необъяснимо окрестностью 3*X, т.к. свойства одинаковы на трех разных формах рельефа, но объяснимо окрестностью 7*X, которая отражает наличие вогнутого участка склона. Г — появление свойства объяснимо окрестностью 3*X, т.к. отражается наличие вогнутого участка склона.

10 000. Проверялись гипотезы о существовании внутри урочища (в классическом понимании) внутренней иерархии геосистем. В этой иерархии как ОТЕ выступают единицы с линейными размерами 10 и 30 м, а как вмещающие — геосистемы с размерами, крутными 10 и 30 м. Наличие иерархии проверяется для каждого из рассматриваемых в этой работе свойств ландшафта. Виды статистических моделей и ход рассуждений аналогичны описанным выше для моделей с размером ОТЕ 400 м.

Для сравнительного исследования выбраны два ПТК различного генезиса – балка Становская (длиной 500 м и шириной 300 м, площадь 0,04 км^2, ниже — полигон «Становская балка») и слабовыпуклое междуречье рек Козловка и Стругница (длиной 1900 м и шириной 400 м, площадь 0,9 км^2 , ниже — полигон «Козловка»). Урочища расположены в пределах Ростовской местности (см. раздел 3.1.1). «Зеркальность» выбранных урочищ по положению в рельефе позволяет оценивать разнонаправленные механизмы взаимодействий между ПТК разных гипсометрических уровней. В обоих случаях исследуется дальность влияния соседних ПТК, но в первом случае — косвенное влияние соседних долинных ПТК через степень дренированности, а во втором — прямое влияние соседних междуречных ПТК через нисходящие потоки вещества. Амплитуда высот территории от вершины междуречий до днищ эрозионных форм одинакова и составляет около 40 м.

Если балка является классическим примером урочища с четко выраженными, обусловленными рельефом, границами подурочищ и фаций, то междуречье исследуется как

объект с неявным влиянием рельефа на мобильные компоненты. По обычным представлениям оно целиком должно быть отнесено к одному урочищу, ограниченному бровками склонов долин. Однако влияние примыкающих урочищ может передаваться в форме информации «снизу вверх» по рельефу через уровень грунтовых вод. В связи с этим выдвигается гипотеза об усложнении внутренней ландшафтной структуры плоского междуречья под влиянием соседних ПТК.

Набор линейных размеров скользящего квадрата (с шагом 60 м) для расчета характеристик рельефа отражает выдвинутые гипотезы о размерах окрестности (вмещающей геосистемы), состояние которой влияет на вертикальную структуру описанных фаций. Минимальный размер — 90 м — характеризует состояние ПТК, непосредственно контактирующих с описанными фациями; максимальный — 330 м — близок к среднему размеру урочищ на Архангельском полигоне и характеризует возможное влияние соседних урочищ. Для каждого из урочищ составлено по 100 комплексных ландшафтных описаний. На междуречье описания проводились по квазирегулярной сетке с шагом около 100 м, в балке — пропорционально площади, занимаемой элементами мезоформ рельефа с некоторым сгущением в днище. Описания в балке, помимо стандартных для данной работы сведений, снабжены данными химического анализа почв на всех 100 точках: содержаний обменных оснований, водорода и алюминия, содержания гумуса. pH, гигроскопической влаги. Это дало возможность включить в анализ еще одну группу свойств — химических свойств почвы, также выраженных через оси дифференциации, рассчитанных методом многомерного шкалирования. Классификация рельефа проводилась методом к-средних (программа FRACDIM) по стандартизованным значениям вертикальной расчлененности, горизонтальной расчлененности, вертикальной кривизны и горизонтальной кривизны в окрестности каждого пиксела (ОТЕ), линейный размер которой варьировал от 90 до 330 м.

При отображении рельефа с размером пиксела 400 м междуречье (полигон «Козловка») рассматривается как единое образование без различения внутренних неоднородностей. Междуречье в ЦМР с разрешением 400 м противопоставляется соседним долинам рек Козловки и Стругницы, врезанность которых уменьшается в направлении в запада на восток. Изменение форм соседних долин и, соответственно, степени выпуклости междуречья и напряженность латеральных связей, отражается классификацией рельефа с размером окрестности 1200 м (3 пиксела). Наибольшую чувствительность к этому уровню организации рельефа в ландшафтном масштабе (на полигоне «Заячья») имеют 1-я и 2-я оси дифференциации травостоя, 1-я и 3-я — кустарничков, 1-я и 4-я — цветовых характеристик почв. В этой группу входят свойства, чувствительные, в основном, к влажности.

На полигоне «Козловка» основная часть точек описания попадает в пределы двух урочищ: 1) сильновыпуклого междуречья с крутыми высокими склонами с интенсивным разнонаправленным оттоком влаги (рис. 54, А); 2) слабовыпуклого междуречья с менее и интенсивным оттоком влаги в соседние слабоврезанные верховья долин и возможностью локального формирования застойных режимов (рис. 54, Б). Небольшая группа точек принадлежит наклонным участкам междуречья с нарастающей к краям крутизной с однонаправленным стоком в водосборные понижения ручьев (рис. 54, В). Изменение поперечного профиля долин и заключенного между ними междуречья объясняется пересечением долинами поперечных неотектонических нарушений, которые маркируются вытянутыми в прямую линию долинами их притоков. Именно по

этим нарушениям, видимо, происходило опускание западных секторов, обусловившее бурное развитие эрозии на склонах, смыв моренного чехла и обнажение на наиболее крутых участках коренных мергелей. Повышенное плодородие почв на дренированных склонах с близким залеганием карбонатных пород послужило причиной не только естественного роста гумусированности почвенного профиля, но и распашки почв с последующим образованием и частичным смывом пахотных горизонтов. В противоположность западному сектору междуречья, более увлажненный и менее плодородный восточный сохранил больше участков с естественными торфянисто-подзолистыми почвами под лесными сообществами с повышенной долей коренных хвойных пород — ели и сосны — и пониженной — вторичных мелколиственных пород. Это различие западного и восточного секторов междуречья отражается также в истории хозяйственного освоения. Ее особенность заключается в том, что дренированный западный сектор распахивался до 1940-х гг., в то время как внутрение части восточного сектора были заброшены в начале XX века.

Классификация рельефа при размере пиксела 30 м и окрестности 330 м (рис. 55) отражает интенсивность современных эрозионных процессов: наличие урочищ малых эрозионных форм (для наиболее широких — отдельно — днищ и склонов), водосборных понижений, небольшие изменения формы склонов, придолинные склоны и выположенные подножья склонов. Фактически отражаются взаимоотношения соседних фаций посредством потоков вещества в катенах низкого ранга. В этом масштабе реализуется большинство сезонных процессов: распределение потоков влаги после дождей и во время снеготаяния, неравномерное залегание снежного покрова и промерзания почв, вывалы древостоя, варьирование проективного покрытия травостоя и мхов из-за различий освещенности и др. Классификация для окрестности 210 м не выделяет индивидуальные урочища эрозионных форм, но более адекватна для отражения ярусов рельефа, отличающихся по глубине расчленения и включающих закономерное сочетание урочищ малых эрозионных форм и участков склонов между ними (рис. 56). Например, в один класс объединяется относительно мелкорасчлененный верхний ярус склона с неглубокими секторами лощин в пределах моренного чехла (А), а в другой — нижележаший сектор с резким ростом глубины врезания тех же лощин и увеличением крутизны примыкающих склонов на уровне врезания их в коренные мергели (Б).

Из характеристик рельефа наибольший вклад в варьирование свойств мобильных компонентов вносит горизонтальная и вертикальная расчлененность (рис. 57). Это указывает на ключевое значение плотности стоковых систем, регулирующих концентрацию или рассеивание влаги и зависящих от густоты разрывных нарушений и самоорганизации стока. Согласно мультирегрессионным моделям (табл. 16), для междуречья наиболее тесную связь с характеристиками дренированности обнаруживают оси свойств травяного, кустарничкового, мохового и кустарникового ярусов фитоценоза (коэффициенты детерминации КД 0,3–0,4), более слабую — оси древесного яруса и мощности почвенных горизонтов (КД 0,1–0,2). Практически нечувствительны к вариациям рельефа вмещающих геосистем механический состав отложений и цветовые характеристики почв, что, служит свидетельством в пользу подчиненности их процессам другого, скорее всего более узколокального, масштаба и иного характерного времени.

Таблица. 16.

Зависимость осей дифференциации компонентов от морфометрических характеристик рельефа в квадратной окрестности операционной территориальной единицы (ОТЕ), обеспеченной полевыми описаниями. Доля описанной дисперсии (коэффициент детерминации * 100) в мультирегрессионном уравнении. Среднетаежный ландшафт в Архангельской области. Полигон «Козловка. Жирным курсивом выделены достоверные уравнения. Условные обозначения — см. табл. 6.

Оси дифференциации компонентов	Размер ОТЕ Разрешение цифровой модели рельефа					
	10 м				30 м	
	Окрестность					
	30 м	70 м	110 м	90 м	210 м	330 м
D1 herb	18	**29**	**29**	**26**	24	21
D2 herb	29	33	**37**	**38**	28	27
D3 herb	24	***26***	24	**26**	23	19
D4 herb	28	31	***33***	32	**38**	34
D5 herb	34	38	***39***	34	**38**	***38***
D1 tree	14	10	16	12	18	16
D2 tree	17	17	17	16	21	18
D3 tree	28	29	27	31	28	***32***
D4 tree	18	12	12	15	12	15
D1 bush	24	*29*	27	26	24	26
D2 bush	17	24	***27***	***32***	29	26
D3 bush	13	06	4	10	9	16
D4 bush	22	24	***28***	19	24	***31***
D1 low	37	41	***44***	***44***	42	34
D2 low	16	17	16	17	11	15
D1 moss	***21***	16	16	15	***20***	16
D2 moss	14	14	14	12	12	17
D1 col	**23**	20	21	13	19	20
D2 col	09	16	16	16	16	14
D3 col	20	22	22	20	20	26
D4 col	14	15	15	10	15	11
D1 hor	***25***	24	21	21	26	***30***
D2 hor	22	***25***	22	22	24	***28***
D3 hor	16	17	14	12	18	20
D4 hor	21	***28***	27	28	***32***	31
D1 text	14	15	15	17	15	18
D2 text	15	18	18	19	17	***23***
D3 text	13	16	18	15	18	20
D4 text	16	18	17	20	15	19

Более высокие значения коэффициентов детерминации для большинства осей достигаются при размере ОТЕ 30 м по сравнению с ОТЕ 10 м. Так как этот результат относится в равной мере к нескольким компонентам ландшафта, то линейный размер целостного ПТК низшего ранга на междуречье следует оценить как минимум в 30 м. Более дробные различия отражаются лишь на отдельных свойствах, но не на ПТК в целом. Этот результат подтверждается и при дискретном представлении рельефа. Дискриминантный анализ показывает (Хорошев и др., 2008), что группы осей дифференциации компонентов (в разных комбинациях) распознаются лучше классами рельефа при размере ОТЕ 30 м, чем 10 м (табл. 17). Следует отметить, что большая разница в густоте горизонталей в пределах полигона «Козловка» приводит к появлению «ложных горизонталей» на ЦМР высокого (10 м) разрешения, что тоже вносит свой вклад в ухудшение качества моделей межуровневых связей. Наличие «ложной горизонтали» способствует появлению на карте особого класса рельефа, который на самом деле не существует и не отличается по почвенно-растительному покрову от смежных ОТЕ.

Таблица. 17.

Суммарная доля (%) распознавания осей дифференциации мобильных компонентов классами рельефа. Дискриминантный анализ. Среднетаежный ландшафт в Архангельской области. Полигон «Козловка».

Размер ОТЕ, м	Размер вмещающей геосистемы (сторона квадратной окрестности), м	Количество классов по свойствам почвенно-растительного покрова				
		4	*6*	*8*	*10*	*12*
10	30	52	32	34	27	24
10	70	51	35	35	29	23
10	110	49	35	38	28	29
30	90	54	36	35	31	29
30	270	51	36	35	32	35
30	330	48	36	37	31	34
10	Все окрестности (прямой пошаговый выбор)	49	49	38	28	27
30	Все окрестности (прямой пошаговый выбор)	55	39	43	37	33
400	1200	53	39	46	36	33

Мультирегрессионные модели для междуречья показали, что адекватный исследуемым отношениям размер окрестности неодинаков для групп свойств.

Обилие видов травяного, кустарникового и кустарничкового яруса варьирует в основном в зависимости от степени расчлененности рельефа в окрестности со стороной квадрата 90–110 м. Мощность почвенных горизонтов зависит от окрестности на двух иерархических уровнях: при размере ОТЕ 10 м — 30–70 м, при размере ОТЕ 30 м — 210–330 м. Масштаб, отражаемый классификацией по окрестности 330 м, адекватен для отражения дифференциации двух первых, т.е. наиболее значимых, осей дифференциации мощностей почвенных горизонтов, 3-й оси дифференциации древостоя. К близкой по размерам окрестности 210 м чувствительна 1-я ось дифференциации мхов. Интерпретация этих осей одинакова: они отражают контрасты фаций с застойным и промывным водным режимом. Если сравнить чувствительность компонентов к фактору перераспределения влаги, то на ландшафтном уровне (полигон «Заячья») он является главным для трав и кустарничков, а на фациально-урочищном (полигон «Козловка») — для мхов и

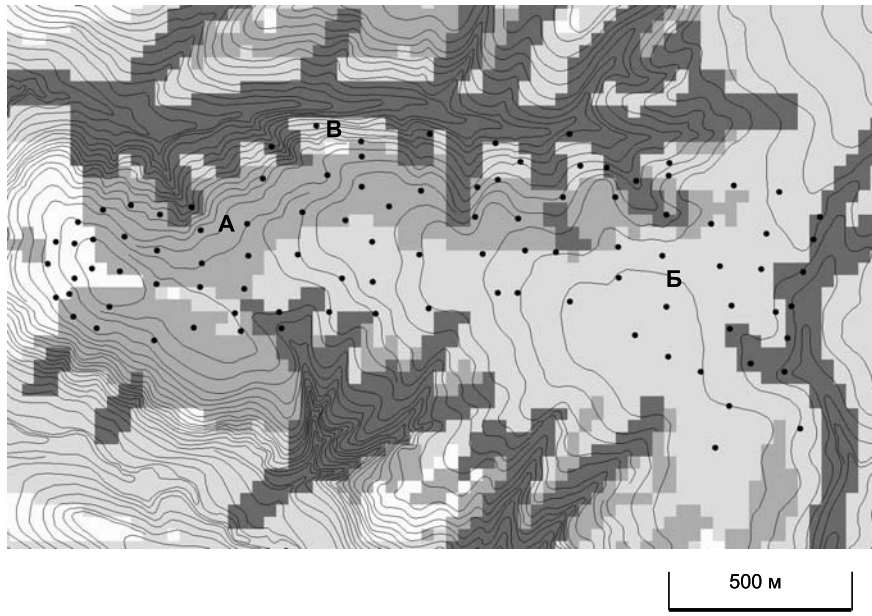

Рис. 54. Классификация рельефа на полигоне «Козловка» (среднетаежный ландшафт в Архангельской области) по морфометрическим характеристикам рельефа в квадратной окрестности со стороной 330 м. Разрешение цифровой модели рельефа 30 м. 4 класса.

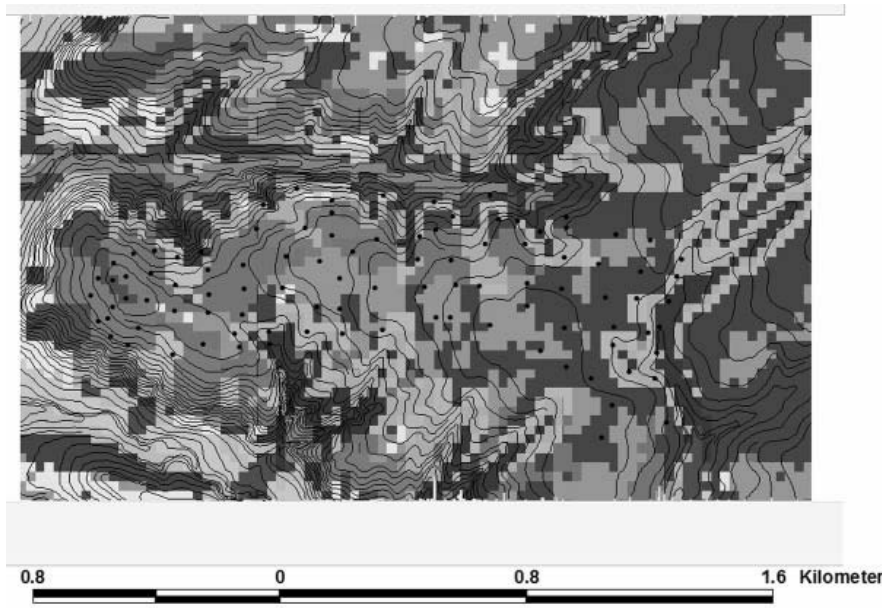

Рис. 55. Классификация рельефа на полигоне «Козловка» (среднетаежный ландшафт в Архангельской области) по морфометрическим характеристикам рельефа в квадратной окрестности со стороной 330 м. Разрешение цифровой модели рельефа 30 м. 16 классов.

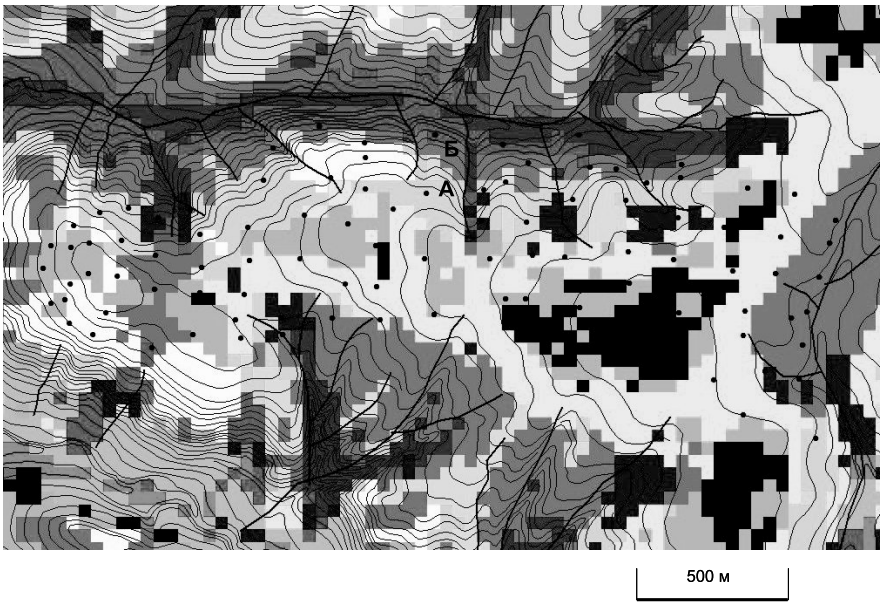

Рис. 56. Классификация рельефа на полигоне «Козловка» (среднетаежный ландшафт в Архангельской области) по морфометрическим характеристикам рельефа в квадратной окрестности со стороной 210 м. Разрешение цифровой модели рельефа 30 м. 16 классов.

почв. Показательно, что оси дифференциации мохового яруса на ландшафтном уровне совершенно не обнаруживают связей с рельефом вмещающих геосистем. На урочищном же уровне на участке «Козловка» установлено, как минимум, два иерархических уровня, ответственных за дифференциацию мхов (1-я ось — соотношение сфагновых и долгомошно-зеленомошных фаций) и одновременно — за соотношение мощностей оторфованных и неоторфованных горизонтов почв (1-я ось). Во-первых, на эти взаимосвязанные показатели оказывает влияние перераспределение влаги по микрорельефу в ближайшей от фации окрестности (30 м при ОТЕ 10 м), во-вторых — эмерджентный эффект совместного влияния более крупных соседствующих единиц ранга примерно урочища (окрестность 210–330 м при ОТЕ 30 м). Это свидетельствует *о приоритетной связи мохового яруса и сопряженных с ним свойств почв с самыми низшими уровнями ландшафной дифференциации, близким к фациальному и урочищному. Для более высоких уровней организации ландшафта видовой состав мохового яруса не может рассматриваться как информативный индикатор пространственных различий; нет оснований включать его в название единиц ранга местности или ландшафта*.

В некоторых случаях иерархический уровень дифференциации помогает в интерпретации физического содержания виртуальной переменной – оси дифференциации свойства компонента. Например, соотношение двух нитрофильных видов кустарников (4-я ось) — смородины черной и малины — наиболее эффективно контролируется влиянием свойств урочищ размером около 330 м при ОТЕ 30 м. Этот уровень четко отражает эрозионное расчленение территории. Смородина предпочитает урочища крутых сильнорасчлененных склонов долины Козловки и эрозионных форм с естественной гумуси-

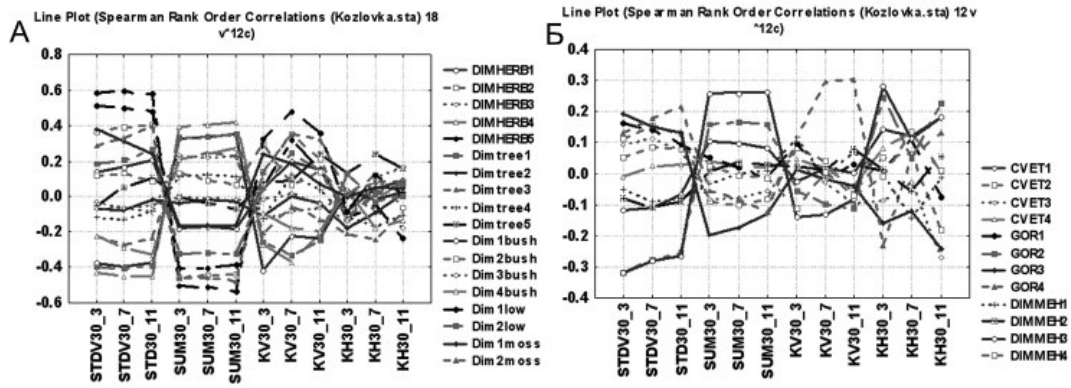

Рис. 57. Коэффициенты корреляции Спирмена между морфометрическими характеристиками рельефа и осями дифференциации компонентов.
Разрешение цифровой модели рельефа 30 м. Полигон «Козловка» (среднетаежный ландшафт в Архангельской области). Обозначения морфометрических характеристик рельефа: STD30_3 — вертикальная расчлененность (стандартное отклонение абсолютных высот) в квадрате со стороной 90 м, STD30_7 — то же со стороной 210 м, STD30_11 — то же со стороной 330 м, SUM30_3 — горизонтальная расчлененность в квадрате со стороной 90 м, SUM30_7 — то же со стороной 210 м, SUM30_11 — то же со стороной 330 м, KV30_3 — вертикальная кривизна в квадрате со стороной 90 м, KV30_7 — то же со стороной 210 м, KV30_11 — то же со стороной 330 м, KH30_3 — горизонтальная кривизна в квадрате со стороной 90 м, KH30_7 — то же со стороной 210 м, KH30_11 — то же со стороной 330 м. Dim… — обозначения осей дифференциации свойств компонентов, см. пояснения к табл. 6.

рованностью почв, которая свойственна почвам при близко залегающих пластах пермских пород. Малина же господствует за пределами эрозионных форм на фоновом для участка «Козловка» урочище плоских или слабовыпуклых дренированных поверхностях междуречья с исходно подзолистыми почвами. Малина выступает как преимущественно сорное растение, связанное, с наследием пахотных режимов и внесения удобрений. Фактически эта ось дифференциации кустарников отражает соотношение естественных и антропогенных путей обогащения почв элементами минерального питания, вписанное в урочищную структуру. Показательно, что из свойств древесного яруса к урочищной дифференциации рельефа (окрестность 330 м при ОТЕ 30 м) достоверно отзывчиво только соотношение мелколиственных и хвойных видов (3-я ось). Этот факт иллюстрирует адаптацию лесопользования к рельефу: на слабодренированных участках вырубки леса не проводились с довоенного времени, в отличие от хорошо дренированных участков, где регулярно происходит обновление древостоя за счет рубок.

Таким образом, *в условиях слаборасчлененного рельефа почвы и растительный покров подчиняются разномасштабным системам поверхностного и подземного стока*. Анализ распределения остатков линейной регрессионной модели в пространстве показал, что наилучшим образом она описывает пологие хорошо дренированные склоны с березово-сосновыми лесами и прибровочные части междуречья с елово-березовыми лесами. В наименьшей степени описываются свойствами рельефа плоские плохо дренированные участки междуречья с лесными болотцами с сосняками, где, скорее всего, в распределении растительности значительную роль играют микроформы рельефа, не «улавливаемые» ЦМР масштаба 1 : 10 000 при разрешении 30 или 10 м в пикселе.

В *балочном луговом урочище* (полигон «Становская балка») обособляются две группы свойств, различных по чувствительности к рельефу вмещающих геосистем. В первую группу входят характеристики механического состава почвообразующих отложений, во вторую — характеристики травяного яруса, цветовых характеристик и мощностей горизонтов почв.

Механический состав отложений варьирует в балке в наиболее тесной связи с рельефом (КД до 0,45), по сравнению с другими свойствами (табл. 18). Сопряженность с рельефом теснее, чем на междуречье. Таким образом, в балке отражается более сложная структура потоков вещества, формирующих литологические контрасты. Основной из них противопоставляет верхнюю часть балки, слабо врезанную в моренные суглинки, и нижнюю, глубоко врезанную в пермские мергели. Поскольку на протяжении балки глубина вреза, крутизна и выпуклость склонов увеличиваются, сопряженно меняется и механический состав почв. Механический состав почвообразующих отложений отражает возрастающую степень проявления эрозионных процессов, которая отражена в морфометрических свойствах форм рельефа, составляющих окрестность каждой фации. В результате эрозионного процесса механический состав почвообразующих отложений варьирует внутри урочища. Характерные размеры ареала этого процесса, судя по максимальным коэффициентам детерминации, находятся в диапазоне 150–270 м (для разных осей), но не могут быть слишком малыми (90 м) и слишком большими (330 м). Указанный размер пространства для исследованной балки достаточен для формирования полного набора форм рельефа, при которых ход эрозии формирует ту или иную степень преобразования исходной литогенной основы. Это преобразование заключается при сильной эрозии в нижней части склонов в полном смыве песчано-супесчаного чехла и выводе на поверхность глинистой коры выветривания мергелей. При слабой эрозии в верхней части склонов сохраняется исходная двучленная супесчано-суглинистая толща, полностью экранирующая коренную породу. Существенной разницы между моделями для размера ОТЕ 10 и 30 м нет. Следовательно, модель более дробного разрешения, различающая слабовыраженные ложбины и небольшие перегибы на склонах, не дает новой информации по сравнению с более грубой моделью, отражающей подурочищные контрасты.

Различия в механическом составе почв, а точнее — в составе почвообразующих отложений внутри балки, находят яркое отражение в содержании в верхних гумусированных горизонтах обменных кальция, магния, алюминия, гигроскопической влаги, pH. Эти показатели достаточно жестко коррелируют с морфометрическими свойствами рельефа, особенно вертикальной и горизонтальной расчлененностью (табл. 19). Безусловно, это объясняется различиями геологического строения на участках с разной расчлененностью и разной формой склона, что отражается 1-й осью дифференциации химических свойств. Она различает обогащенные основаниями почвы более крутого правого склона и днища от обедненных почв покатого левого склона и верховьев балки. Богатство почв основаниями лучше всего связано с морфометрическими характеристиками окрестности 90 м при размере ОТЕ 10 м. Смытые почвы на выпуклых элементах рельефа с близким залеганием мергелей в глубоко врезанном секторе балки характеризуются высокими содержаниями обменных кальция, магния, гигроскопической влаги и щелочным диапазоном pH. Напротив, несмытые почвы на четвертичных отложениях слабоврезанного верхнего сектора и левого склона имеют кислую реакцию и повышенное содержание обменного алюминия. Соотношение содержания обменного магния, водорода и алюминия отражается 3-й осью, которая четко выделяет верховья балки с более выраженным песчано-супесчаным чехлом, экранирующим почву от

Таблица. 18.

*Зависимость осей дифференциации компонентов от морфометрических характеристик рельефа в квадратной окрестности операционной территориальной единицы (ОТЕ), обеспеченной полевыми описаниями. Доля описанной дисперсии (коэффициент детерминации * 100) в мультирегрессионном уравнении. Среднетаежный ландшафт в Архангельской области. Полигон «Становская балка». Жирным курсивом выделены достоверные уравнения. Условные обозначения — см. табл. 6.*

Оси дифференциации компонентов	Размер ОТЕ Разрешение цифровой модели рельефа									
	10 м					30 м				
	Окрестность, м					Окрестность, м				
	90	150	210	270	330	90	150	210	270	330
D1 herb	15	21	***24***	***24***	22	16	18	19	16	16
D2 herb	19	18	16	17	19	21	21	20	19	20
D3 herb	15	14	10	15	14	17	15	14	15	14
D4 herb	14	11	09	14	13	14	9	8	11	11
D5 herb	11	16	19	19	19	14	16	20	15	14
D1 hor	24	24	25	21	***29***	23	23	18	19	***26***
D2 hor	18	14	13	08	08	28	19	8	9	10
D3 hor	23	24	24	22	24	23	21	20	23	***27***
D4 hor	23	***28***	25	25	24	22	22	23	22	23
D1 col	20	19	21	21	***27***	20	16	21	***23***	*23*
D2 col	22	20	20	***24***	22	19	19	21	***30***	23
D3 col	20	15	***26***	21	14	25	21	24	***30***	16
D4 col	14	11	***25***	16	20	16	9	***27***	18	13
D5 col	24	23	***30***	27	29	25	22	***32***	***32***	24
D1 Хим.свойства	***50***	45	48	47	46	***48***	42	40	38	41
D2 Хим.свойства	12	13	11	12	12	10	14	17	16	13
D3 Хим.свойства	23	***26***	25	23	24	21	21	23	20	23
D4 Хим.свойства	37	38	***41***	39	34	36	40	35	***42***	36
D1 text	46	***48***	***48***	46	43	46	45	44	***48***	46
D2 text	39	42	***43***	42	37	39	42	39	***45***	41
D3 text	39	***44***	43	39	38	***39***	36	38	***39***	38
D4 text	21	***23***	22	18	21	12	21	19	18	16

влияния обогащенных магнием мергелей. ОТЕ с размером 10 м и соответствующие вмещающие геосистемы несколько лучше отражают значения 3-й оси, чем ОТЕ 30 м. Это свидетельствует о значимости узколокальных вариаций мощности обедненного основаниями чехла. Содержание гигроскопической влаги (контролируется в основном 4-й осью) находится в четком соответствии с механическим составом почв. Особенно низкими значениями отличаются подзолистые почвы под небольшим сосняком, сохранившимся в верхнем секторе по левому борту балки. Как и для механического состава, варьирование гигроскопической влаги определяется окрестностью 210–270 м. Содержание органического углерода (контролируется 2-й осью) не коррелирует ни с морфометрическими показателями рельефа, ни с характеристиками механического состава почв. При дискретном отображении рельефа также ни один из классов не выделяется

по гумусированности. Распределение гумуса в катенах в разных секторах балки может быть противоположным. Отсюда следует, что гумусированностью управляют в большей степени почвенно-фитоценотические отношения, нежели процессы, обусловленные геоморфологически. Существенной разницы в корреляциях химических свойств с морфометрическими, рассчитанными при ОТЕ 10 и 30 м нет.

Таблица. 19.

Коэффициенты корреляции Спирмена между химическими свойствами почв в гумусовом горизонте и морфометрическими показателями рельефа в квадратной окрестности. Среднетаежный ландшафт в Архангельской области. Полигон «Становская балка».

Морфометрическая характеристика рельефа	Spearman Rank Order Correlations (balkastand3) MD pairwise deleted Marked correlations are significant at p <,05000						
	pH водный	Гигроскопическая влага	Органический углерод	Обменные катионы			
				Ca	Mg	H	Al
SLOPE30	0,05	***0,47***	0,00	0,17	0,15	0,10	0,00
STD30_3	0,19	***0,63***	0,02	***0,32***	***0,27***	0,06	–0,11
SUM30_3	–0,16	***–0,73***	–0,06	***–0,32***	***–0,28***	–0,06	0,11
KH30_3	–0,07	0,13	–0,05	–0,08	–0,02	0,08	0,06
KV30_3	–0,07	***–0,29***	0,06	–0,16	–0,11	–0,06	–0,02
STD30_5	***0,32***	***0,66***	0,02	***0,42***	***0,34***	–0,01	–0,19
SUM30_5	–0,17	***–0,73***	–0,07	***–0,32***	***–0,28***	–0,05	0,12
KH30_5	0,10	–0,17	–0,07	–0,04	0,03	–0,09	0,04
KV30_5	***–0,19***	–0,19	0,05	–0,18	***–0,23***	0,03	–0,08
STD30_7	***0,32***	***0,65***	0,04	***0,44***	***0,33***	–0,02	***–0,22***
SUM30_7	–0,18	***–0,72***	–0,09	***–0,31***	***–0,27***	–0,06	0,12
KH30_7	***0,26***	***–0,28***	–0,10	0,11	***0,21***	–0,17	–0,01
KV30_7	***–0,31***	***–0,28***	0,03	***–0,39***	***–0,37***	0,04	0,09
STD30_9	***0,31***	***0,66***	0,05	***0,44***	***0,33***	–0,02	***–0,22***
SUM30_9	–0,19	***–0,70***	–0,10	***–0,32***	***–0,28***	–0,06	0,13
KH30_9	***0,30***	–0,19	–0,10	0,17	***0,21***	–0,19	–0,13
KV30_9	***–0,37***	***–0,42***	0,04	***–0,46***	***–0,43***	0,11	***0,20***
STD30_11	***0,31***	***0,66***	0,06	***0,44***	***0,33***	–0,02	***–0,21***
SUM30_11	–0,19	***–0,70***	–0,10	***–0,32***	***–0,28***	–0,06	0,12
KH30_11	***0,25***	–0,09	–0,05	0,16	***0,20***	–0,14	–0,13
KV30_11	***–0,32***	***–0,56***	–0,04	***–0,40***	***–0,43***	0,08	***0,23***

Среди почвенных характеристик более динамичные — цветовые, — по мультирегрессионной модели, прочнее связаны с более динамичным рельефом в балке (КД до 0,30–0,32) при обоих размерах ОТЕ, а более инертные — мощности почвенных горизонтов — на междуречье. Для цветовых характеристик при обоих размерах ОТЕ характерный размер вмещающей геосистемы по четырем осям из пяти можно оценить в 210–270 м, то есть близко к установленному для механического состава почв. Для мощностей почвенных горизонтов невозможно выделить единственный приоритетный размер вмещающей геосистемы. Наиболее значимая 1-я ось, описывающая соотношение естественных и антропогенных признаков гумусированных горизонтов, подчиняется

геосистемам с линейными размерами 330 м, независимо от размера ОТЕ. По такому же правилу варьируют значения 3-й оси, описывающей наличие мощных намытых гумусированных горизонтов на склонах, у их подножий или в склоновых ложбинах. 2-я ось, отличающая почвы с хорошо развитым гумусовым или перегнойным горизонтом от слабодифференцированных смытых или намытых, отражает более узколокальные процессы в окрестности 90 м, причем лучше — при размере ОТЕ 30 м. Эти параметры обычны для вогнутых и выпуклых участков склонов, связанных с варьированием геологического строения. Следует обратить внимание, что два иерархических уровня вмещающих геосистем с аналогичными размерами были характерны для морфологического строения почв и на междуречье участка «Козловка».

Варьирование свойств травяного яруса также происходит в рамочных условиях, созданных вмещающими геосистемами нескольких рангов. Соотношение видов разных эколого-ценотических групп (1-я ось) находится в более ярко выраженных отношениях с рельефом при размере операционной единицы 10 м, что примерно соответствует фации внутри урочища балки. Наиболее значимая окрестность 210 м соответствует характерным размерам склонов и ширине наиболее врезанной части балки ниже выпуклых перегибов. Даже небольшое изменение микрорельефа (ложбина на склоне балки, изменение продольного наклона днища), улавливаемое цифровой моделью с разрешением 10 м, отражается на видовом составе травостоя. Вторая по значимости ось, наоборот, лучше отражает более грубые подурочищные контрасты при ОТЕ 30 м. Для нее выделяются два иерархических уровня вмещающих геосистем с размерами 90 и 330 м. Первый из них (90 м) соответствует обычным размерам выпуклых и вогнутых участков склонов, то есть чувствителен к границам участков специфического геологического строения (например, с выходами мергелей). Второй уровень (330 м) отражает сам факт наличия разрывного нарушения с балкой, рассекающего краевую часть Заячерецко-Соденьгского междуречья. Наличие разрывного нарушения создает контраст участков с разными возможностями хозяйственного освоения. Адаптация хозяйственных режимов и их устойчивость во времени связана именно с этим уровнем. Пашня расположена на водораздельной поверхности и на прибалочном пологом склоне, сенокос — на крутом склоне и в осевой части балки, залежь — на противоположном пологом склоне, небольшое лесное угодье — в верховье с бедными песчаным и почвами. 2-я ось дифференциации травяного яруса отражает разнообразное наследие хозяйственных режимов в видовом составе фитоценоза. Для остальных осей (3-й, 4-й, 5-й) размер ОТЕ несущественен, поскольку связи с рельефом окрестностей недостоверны, что указывает на внутрифитоценотический характер закономерностей, отражаемых этими осями.

Таким образом, специальное исследование связей между рельефом и другими компонентами ландшафта, проведенное на фациально-урочищном уровне, показало *существенное различие в физическом смысле межуровневых связей в зависимости от размера выбранной операционной территориальной единицы*. Обобщение полученных результатов позволяет считать имеющими ландшафтной содержание три комбинации размеров ОТЕ и размеров вмещающей геосистемы, соответственно 10 и 210 м, 30 и 90 м, 30 и 330 м.

Подобный анализ для другой пары размеров ОТЕ был проведен К.А. Мерекаловой под руководством автора для другого участка в Архангельской тайге (полигон «Медвежий») на примере оси влажности травостоя (Мерекалова, 2006; Хорошев и др., 2013а). Участок охватывает не одно, а группу урочищ, расположенных на ступенчатом междуречье рек Заячья и Пукома. Участок частично пересекается с участком «Трансект». Решалась задача выявления оптимального размера ОТЕ: 30 или 400 м. Кроме того, про-

верялась гипотеза о том, что наибольшие ошибки (разность между наблюдаемыми и предсказанными моделью значениями) модели грубого разрешения (400 м) могут быть объяснены ландшафтными процессами локального масштаба, которые описываются моделью дробного разрешения 30 м. Задача представляет собой иную ипостась того же вопроса, решение которого описано выше для полигона «Трансект». На «Трансекте» речь шла о взаимодополнительности эффектов нескольких окрестностей при одинаковом размере ОТЕ, а на полигонах «Медвежий», «Козловка» и «Становская балка» — о взаимодополнительности эффектов меняющегося размера ОТЕ

На полигоне «Медвежий» дифференциация травостоя по влажности контролируется второй и третьей по значимости осями. Первая по значимости ось определяет соотношение луговых и лесных видов, что отражает степень антропогенного трансформации исходно лесных ландшафтов. При максимальных значениях 2-й оси влажности в травяном ярусе преобладают кислица, майник двулистный, ортилия однобокая, вороний глаз, копытень европейский, медуница неясная, сныть обыкновенная, герань лесная, золотарник, крапива двудомная, чина лесная. Это виды разных эколого-ценотических групп (бореальной, неморальной, нитрофильной), но объединяемые предпочтением хорошо дренированных междуречий, их пологих склонов, покатых и крутых склонов долин. В древостое таких фаций господствуют сосна, ель, береза, встречаются осина и ольха, типичная формула древостоя 4С4Е2Б. Под такими сообществами, как правило, развиваются слабокислые слабо- и среднеподзолистые почвы (Ад 0–5 см, ELB 5–25 см, В 25–50 см). Минимальным значениям 2-й оси соответствуют фации с присутствием (как правило, неодновременно) ятрышника, хвоща болотного, пушицы влагалищной, сабельника болотного, ситников, осоки пузырчатой, вахты трехлистной. Эти виды болотной группы характерны для котловинообразных понижений на плоских междуречьях и ложбинообразных понижений в основании ступеней междуречий. В древостое преобладают разреженные сосняки с участием березы (7С3Б) на торфяно-глееземах (мощность торфа 30–90 см).

При размере ОТЕ 400 м цифровая модель рельефа различает несколько ступеней междуречья, что примерно соответствует рангу групп урочищ. При этом дифференциация на мелкие эрозионные формы, водосборные понижения, узкие поймы и террасы не отражается. Мультирегрессионные модели второй степени для межуровневых связей типа «А» были построены для ОТЕ со стороной 400 м и гипотетических вмещающих геосистем с линейными размерами 1200, 2000, 2800, 3600, 6000 м:

«Ось влажности» = F(Ф1, Ф2, Ф3, Ф4), где Ф — морфометрическая характеристика в окрестности при размере ОТЕ со стороной 400 м (модель типа «А»)

Использовались те же морфометрические характеристики рельефа, что и для всех остальных полигонов: вертикальная и горизонтальная расчлененность, вертикальная и горизонтальная кривизна.

Сравнение моделей показало, что свойства травостоя, чувствительные к влажности, в наибольшей степени подчиняются геосистемам со средними линейными размерами 2800 м. От свойств окрестности с такими размерами зависит 31% варьирования.

Максимальные (по модулю) остатки от модели А сосредоточены либо в выпуклых прибровочных позициях междуречий, либо в днищах слабоврезанных ложбин. Модель типа «А» недооописывает фации с экстремальными значениями влажности: избыточно влажные и наиболее хорошо дренированные микроформы рельефа, которые не распоз-

наются цифровой моделью рельефа с разрешением 400 м. Следовательно, требуется проверка гипотезы, что недописанная часть варьирования объясняется узколокальными эффектами перераспределения влаги.

На следующем шаге построена серия моделей типа «Б», проверяющих серию гипотез, что ось влажности подчиняется геосистемам, линейный размер которых кратен 30 м, т.е. 90, 150, 210, 270, 330, 390 и 450 м:

«Ось влажности» = F(Ф5, Ф6, Ф7, Ф8), где Ф — морфометрическая характеристика в окрестности при ОТЕ 30 м (модель типа «Б»)

В целом оказывается, что модели для ОТЕ 30 м более эффективно описывают варьирование свойств травостоя, чем модели для ОТЕ 400 м (коэффициенты детерминации для разных окрестностей варьируют от 0,31 до 0,42). Наилучшее описание получено для окрестности 90 м: 42% варьирования, т.е. больше, чем модель типа «А».

Далее построена серия моделей типа «В», в которые остатки модели типа «А» выступают как зависимая переменная, а морфометрические характеристики окрестности со стороной 90 м — как независимые переменные:

Остатки модели А = F(Ф5, Ф6, Ф7, Ф8), где Ф — морфометрическая характеристика рельефа в окрестности (модель *В)*

26 % варьирования остатков описывается свойствами рельефа вмещающей геосистемы с линейными размерами 90 м, в то время как рельеф других окрестностей описывает лишь от 10 до 22% варьирования. Причем, именно для фаций выпуклых прибровочных частей междуречий и слабовогнутых заболоченных ложбин и водосборных понижений, влажность которых модель типа «А» описывает с большой ошибкой, соотношение мезофильных и гидрофильных видов хорошо объясняется моделью типа «В» с минимальными остатками. Таким образом, доказано, что *недостаточное качество модели грубого разрешения как минимум на четверть может быть объяснено вкладом локальных эффектов фациального уровня, отражающих перераспределение влаги между формами микрорельефа* (Хорошев и др., 2013а).

С точки зрения оценки устойчивости сопряженный полимасштабный анализ ландшафтной организации позволяет понять, в «дружественном» или «враждебном» окружении находится интересующая нас конкретная ландшафтная единица. Недоописанная часть варьирования в модели грубого разрешения (69%) в значительной степени объясняется локальным отличием увлажненности от ожидаемой по модели. Если для конкретной фации это противоречие снимается применением локальной модели (разрешение 30 м), то это означает, что существует небольшая ландшафтная единица, включающая эту фацию, которая сильно отличается от фоновых условий. С высокой вероятностью такая единица в первую очередь подвергнется разрушению при неблагоприятной для нее тенденции развития фонового ландшафта и, во всяком случае, имеет мало шансов на расширение своей территории во «враждебном окружении». В таежном ландшафте это может быть небольшой хорошо дренированный холм среди переувлажненного плоского междуречья (как, например, на нашем вышеописанном Обском полигоне) или, наоборот, заболоченная западина на фоне хорошо дренированного междуречья, которые окажутся неустойчивы к изменениям фоновых условий. Прогрессирующее заболачивание переувлажненного междуречья может «поглотить» редкую дренированную

фацию или, по крайней мере, захватить ее окраины. Редкая для территории заболоченная западина при прогрессирующем понижении уровня грунтовых вод на окружающем сухом междуречье (например, в результате мелиоративных мероприятий или изменения климата) будет первым кандидатом на исчезновение. Наоборот, фация устойчива, если ее свойства (например, высокое обилие влаголюбивых видов трав) с высокой точностью предсказывается и моделью грубого разрешения, и узколокальной моделью. В Архангельской тайге это может означать, что в слабовогнутой западине, которая различается только цифровой моделью рельефа высокого разрешения, существует болото, а на окружающем ее широком плоском междуречье господствуют предсказанные грубой моделью ельники-долгомошники с оглеенными почвами, иначе говоря — окружение «дружественное», Попытка осушения болота с высокой вероятностью обернется его восстановлением за счет поступления в западину влаги из окрестных переувлажненных урочищ, как это и происходит ныне на осушенных в 1980-е гг. для земледелия территориях (рис. 45) изученного полигона (Хорошев, 2005а). Таким образом, предметом анализа для оценки устойчивости при полимасштабном анализе должны быть остатки регрессионных моделей, связывающих свойства фаций со свойствами рельефа окрестностей при разных размерах операционной территориальной единицы.

Аналогичное исследование проведено А.П. Еремеевой под руководством автора на участке государственного заповедника «Оренбургский» «Буртинская степь» в Оренбургской области (Хорошев и др., 2013а). Было установлено, что различия в степени увлажнения местообитаний в Буртинской степи связаны в первую очередь с рельефом. Мультирегрессионные модели межуровневых связей типа «А» построены для ОТЕ размером 360 м и ее окрестностей квадратной формы — гипотетических вмещающих геосистем с линейными размерами 1080, 1800, 2520, 3240, 3960, 4680, 5400 м. Оценка качества моделей типа «А» показала в целом достаточно низкие коэффициенты детерминации. Наиболее высокое значение (R^2=0,15) — в уравнении связи «оси влажности» со свойствами окрестности со стороной 2520 м (Еремеева, 2012). Именно такие размеры имеет участок низменной слаборасчленённой равнины, располагающийся в пределах территории исследования. Остаётся недописанным 85% варьирования свойств травостоя, чувствительных к влажности.

Выдвинута гипотеза, что остатки могут объясняться перераспределением влаги в более узколокальном масштабе. Анализ пространственной приуроченности максимальных (по модулю) остатков от модели «А» показывает, что это в основном небольшие ложбины и луговины, в некоторых случаях — вершины холмов. Всё это — геосистемы, которые, во-первых, имеют небольшие размеры и не видны при мелкомасштабном анализе. Кроме того, они резко отличаются от доминантных по площади геосистем, в связи с чем плохо «вписываются» в модель.

На следующем шаге проверена гипотеза о локальном характере отношений между «фактором влажности» и свойствами вмещающей геосистемы. По аналогии с описанной выше для Архангельской тайги процедурой проведено сравнение моделей типа «Б» межуровневых связей при размере ОТЕ 30 м. Каждая фация теперь считалась носителем свойств ОТЕ с линейными размерами 30 м, которая, в свою очередь, подчиняется геосистеме, линейный размер которой кратен 30 м, т.е. 90, 150, 210, 270, 330, 390, 450 м. Эти модели более эффективно описывают варьирование свойств травостоя, чувствительных к влажности, чем модели А. Наиболее тесные связи (R^2 = 0,33) получены для окрестности со стороной 150 м. Модель Б описывает 33% варьирования свойств травостоя, чувствительных к влажности, т.е. больше чем модель типа «А». Ландшафтная интерпретация геосистем со средними размерами 150 м связана с нали-

чием на местности многочисленных ложбин и гребней, характерных для возвышенных сильнорасчленённых местностей массивов Муелды и Большой Кармен.

В следующей серии моделей типа «В» в качестве зависимой переменной выступают остатки модели типа «А», а в качестве независимых переменных — морфометрические характеристики окрестностей со стороной 90, 150, 210, 270, 330, 390, 450 м. Наиболее высокий коэффициент детерминации R^2 (0,32, т.е. 32% варьирования) получен в модели связи остатков модели типа «А» с характеристиками окрестности со стороной 150 м. Остальные модели типа «В» описывают 20–28% варьирования. Примечательно, что из всех перебранных размеров окрестностей наиболее значимым оказался размер окрестности 150 м, то есть такой же, как и в модели «Б». Тем самым, как и для среднетаежного ландшафта, подтверждается гипотеза о том, что недостаточное качество модели грубого разрешения объясняется именно вкладом локальных эффектов (Хорошев и др., 2013), на что уже обращалось внимание (Antonić et al., 2003; Lookingbill, Urban, 2004; Kennedy et al., 2008). Отсюда следует, что для полноценного объяснения причин пространственного варьирования свойств ландшафта полимасштабный анализ межкомпонентных связей может рассматриваться как вполне эффективный инструмент.

Таким образом, на основании сравнительного моделирования межкомпонентных связей при меняющемся размере операционной территориальной единицы установлены следующие закономерности.

1. Ярусы фитоценоза и свойства почв могут одновременно принимать участие в полимасштабной системе межкомпонентных отношений.
2. Ярусы фитоценоза и свойства почв подчиняются разным иерархическим уровням ландшафтной организации. В среднетаежном ландшафте наиболее дробный фациальный уровень управляет основными свойствами мохового покрова и механического состава почв. Более высокий урочищный уровень является основным для дифференциации травяного, кустарникового, кустарничкового ярусов, цветовых характеристик почв. Мощность почвенных горизонтов и состав мохового яруса примерно в равной степени определяется межгеосистемными взаимодействиями фациального и урочищного уровней. Ландшафтный уровень является значимым для травяного, кустарникового, кустарничкового, древесного ярусов.
3. Большие расхождения между наблюдаемыми и предсказанными моделью грубого разрешения свойствами как в таежном, так и в степном ландшафтах объясняются наложением эффектов узколокальных процессов, которые можно установить посредством моделей дробного разрешения.
4. Минимальный размер целостных геосистем, которые наиболее эффективно включаются в межуровневые взаимодействия большинством свойств, близок к 30 м. Если и существуют целостные геосистемы меньшего размера (около 10 м), то для их выявления требуются цифровые модели рельефа, основанные на топографических картах масштаба крупнее 1 : 10000.

4.5. Разделение вкладов внутриуровенных и межуровневых связей в варьирование свойств компонентов

Прежде чем приступить к рассмотрению основных вопросов данной работы — о разделении вкладов внутриуровенных и межуровневых связей и эмерджентных эффектах вертикальных и горизонтальных взаимодействий — подведем промежуточный итог и

рассмотрим межрегиональные различия в степени отзывчивости компонентов ландшафта к свойствам вмещающих геосистем, выраженных через разнообразие рельефа. Это позволит сопоставить ландшафты разных зон по жесткости рамочных условий, которые создает морфолитогенная основа для почвенно-растительного покрова. В качестве основания для сравнения используются величины коэффициентов детерминации в мультирегрессионных уравнениях, где зависимыми переменными являются оси дифференциации свойств фитоценозов и почв. Параллельно оценивалась чувствительность свойств фитоценозов и почв к совокупности осей дифференциации механического состава почвообразующих отложений. Таким образом, сравнивается чувствительность почвенно-растительного покрова как к форме, так и содержанию морфолитогенной основы. Рассматриваются среднетаежный ландшафт Архангельской области, южнотаежные ландшафты Костромской области (с территориальным охватом отдельно Кологривского района и области в целом), смешаннолесной ландшафт юго-западной Удмуртии.

Сначала сравним набор свойств, которые чувствительны к рельефу и отложениям в каждом регионе.

В среднетаежном ландшафте Архангельской области к рельефу вмещающих геосистем и контролируемым им процессам наиболее отзывчивы травяный, кустарниковый и кустарничковый ярусы, а также статичные характеристики почв (набор и мощности горизонтов). При этом далеко не всегда существует параллельная сопряженность с составом отложений (кустарники, деревья, травы). Следовательно, рельеф в ландшафте выступает, скорее как фактор перераспределения влаги, а не отложений.

В южнотаежных ландшафтах Костромской области компоненты гораздо слабее связаны с рельефом. К рельефу наиболее отзывчивы деревья, хотя и с невысокими коэффициентами детерминации. При этом практически отсутствуют связи с механическим составом отложений, если применять континуальное его представление через оси дифференциации. Однако при дискретном представлении механического состава через классы профилей, выделенные вручную (песчаные, суглинистые, двучленные с разной мощностью облегченного чехла) значения большинства осей дифференциации почвенно-растительного покрова различаются достоверно между классами (по результатам дисперсионного анализа). Отметим, что ручное выделение классов профилей в этом случае оказывается более эффективным для различения свойств почвенно-растительного покрова, чем автоматическое выделении классов методом кластерного анализа по осям дифференциации механического состава.

В хвойно-широколиственнолесном ландшафте юго-западной Удмуртии к рельефу наиболее отзывчивы древесный и травяный ярусы, что объясняется сопряженной дифференциацией рельефа и отложений. Из свойств, чувствительных к рельефу, одновременно чувствительны к механическому составу отложений кустарники, горизонты и цветовые характеристики почв.

Как видим, универсальный ряд компонентов по чувствительности к морфолитогенной основе не выстраивается.

Теперь сравним чувствительность каждого компонента к морфолитогенной основе ландшафта между регионами.

Древесный ярус имеет наиболее тесную связь с рельефом в хвойно-широколиственнолесном ландшафте, наименее — в среднетаежном. Во всех регионах от характеристик рельефа зависит, прежде всего, соотношение хвойных и лиственных (в южной тайге и смешанных лесах с участием широколиственных) видов. В Архангельской облас-

ти это связывается в основном с различиями степени дренированности, в Костромской области и Удмуртии — с дифференциацией отложений по рельефу.

Кустарниковый ярус обнаруживает наиболее тесную связь с рельефом также в хвойно-широколиственнолесном ландшафте Удмуртии. Наличие или отсутствие кустарников определяется соотношением слабо- и сильнорасчлененных поверхностей, и, соответственно, соотношением широколиственных и хвойных пород древостоя. В среднетаежном ландшафте Архангельской области от рельефа зависит в основном соотношение олиготрофных и мегатрофных кустарников. Принимая во внимание отсутствие связи с механическим составом, следует считать, что в зависимости от рельефа кустарники могут получать или не получать дополнительное минеральное питание из грунтовых вод: разгрузка в сильнорасчлененных позициях способствует росту обилия мегатрофных кустарников.

Кустарничковый ярус в целом малочувствителен к рельефу, но во всех регионах сам факт наличия или отсутствия кустарничкового яруса тесно связан с рельефом. Вид этой зависимости различается. В среднетаежном ландшафте наиболее расчлененные позиции часто лишены кустарничкового яруса. В хвойно-широколиственнолесном ландшафте наоборот именно при расчлененном рельефе (речные долины) складываются условия, приближающиеся к таежным условиям с выраженным кустарничковым ярусом из черники и брусники. Степень зависимости этого яруса от механического состава при этом невелика, поэтому связывать наличие кустарничкового яруса следует именно с мозаикой дренированных и слабодренированных условий. В южнотаежном ландшафте связь с рельефом вмещающих геосистем существует на районном уровне и размывается — на региональном.

Травяный ярус наиболее отзывчив к рельефу опять-таки в хвойно-широколиственнолесном ландшафте, где типы рельефа тесно сопряжены с характером отложений в силу сопряженности четвертичного покрова (или отсутствия такового) с характером расчлененности рельефа. Наименьшая сопряженность отмечена в южнотаежных ландшафтах, причем особенно на региональном областном уровне.

Судя по представленным результатам, повышенная континентальность и маломощность или отсутствие экранирующего чехла четвертичных отложений, характеризующие юго-западную Удмуртию, обостряет значимость морфолитогенной основы для почти всех ярусов фитоценоза. Результаты, полученные А.П. Еремеевой (2012) по аналогичной методике для степного ландшафта Предуралья в Оренбургской области, также свидетельствуют в пользу *возрастания детерминирующей роли морфолитогенной основы для растительного покрова в континентальных условиях на коренных породах*.

Набор и мощность почвенных горизонтов обнаруживает во всех регионах более слабую связь с рельефом вмещающих геосистем, чем фитоценоз. Наиболее явно детерминированы рельефом почвы среднетаежного ландшафта, наименее — южнотаежного. В хвойно-широколиственнолесном ландшафте большинство свойств почв относительно независимы от рельефа, за исключением процессов трансформации подстилки в гумус, что отражается в соотношении мощностей горизонтов O и AY.

Цветовые характеристики почв связаны с рельефом более тесно в хвойно-широколиственнолесном ландшафте, чем в южнотаежном и среднетаежном.

Таким образом, строение почвенного профиля в хвойно-широколиственнолесном ландшафте следует, видимо, расценивать как следствие в основном локальных внутриуровенных процессов и наследие палеопроцессов. В то же время интенсивность современных почвенных процессов, которая отражается в цветовой гамме горизонтов, в большей

степени определяется общим фоном более широкоохватных процессов во вмещающих геосистемах. В среднетаежном ландшафте соотношение ближе к противоположному.

Механический состав отложений в целом слабо связан с рельефом. Сопряженность большинства характеристик растительного покрова с рельефом в Удмуртии осуществляется косвенно через дифференциацию состава почвообразующих пород в соответствии с набором мезоформ рельефа. В Костромской области на региональном уровне рельефом объясняется дифференциация покровных отложений (поверхностных слоев почвообразующей породы), в то время как на районном уровне от рельефа зависит в основном дифференциация подпочвы. В Архангельской области рельеф также определяет дифференциацию покровных отложений (верхней толщи двучлена). Из всех ярусов фитоценоза во всех трех регионах наиболее тесно с механическим составом отложений связан травяный ярус.

До сих пор мы фактически *раздельно* рассматривали внутриуровенные межкомпонентные связи и межуровневые связи между свойствами ОТЕ и свойствами вмещающей геосистем. Продемонстрирована разная степень сопряженности свойств компонентов друг с другом и процедура определения размера вмещающей геосистемы, создающей рамочные условия для каждого свойства и групп свойств. Однако, совершенно очевидно, что оба типа взаимодействий могут быть одновременно существенны для каждого свойства. По крайней мере, необходимо доказывать, подчиненность исключительно локальным межкомпонентным взаимодействия или, наоборот, исключительно рамочным условиями вмещающей геосистемы. По гипотезе, сопряженное варьирование двух свойств в пространстве может быть обусловлено как их непосредственной физической связью-взаимодействием, так и общей подчиненностью свойствам вмещающей геосистемы. Выше было показано, что некоторые свойства подчиняются влиянию не одного, а нескольких иерархических уровней вмещающих геосистем. Оценена доля дисперсии каждого свойства, описываемая гипотетическими вмещающими геосистемами разных размеров по отдельности. На основании этого «методом резонансных уровней» определен размер тех вмещающих геосистем, которые могут рассматриваться уже не как гипотетические, а как реально существующие. Теперь следует проверить *гипотезу о существовании эмерджентных эффектов одновременного воздействия вмещающих геосистем нескольких рангов, т.е. результат суперпозиции разноранговых ландшафтных процессов*. В общем плане вопрос формулируется следующим образом: возможна ли пространственная дифференциация свойства, полностью независимая от влияния вмещающей геосистемы? Иначе говоря, необходимо дать количественную *сравнительную оценку вкладов внутриуровенных и межуровневых воздействий на свойство компонента ландшафта*. Для решения этой задачи мы предлагаем «метод суперфакторов», суть которого описана в разделах 2.7 и 3.2.3.

Продемонстрируем результаты разделения вкладов внутриуровенных и межуровневых воздействий на примерах модельных регионов. Основной смысл описываемых ниже процедур заключается в выявлении эмерджентных эффектов воздействия группы свойств компонентов и группы вмещающих геосистем разных рангов.

Для среднетаежного ландшафта Архангельской области 8 взаимонезависимых (по условиям метода главных компонент) «суперфакторов» в совокупности объясняют 54% варьирования значений осей дифференциации свойств (табл. 20). Из них 1-й, 2-й (то есть два ведущих), 6-й и 7-й суперфакторы имеют максимальные по модулю факторные нагрузки для характеристик рельефа вмещающих геосистем. Назовем их «*первый ряд суперфакторов*». 1-й суперфактор отражает варьирование вертикальной и горизонтальной расчлененности в широкой окрестности (2800–6000 м), 2-й супер-

фактор — варьирование кривизн в ближней окрестности (1200–2800 м), 6-й суперфактор — варьирование кривизн в дальней окрестности, а 7-й суперфактор — сопряженное варьирование вертикальной расчлененности и вертикальной кривизны непосредственной окрестности (1200 м). Одновременно эти же суперфакторы отражают варьирование некоторых свойств ОТЕ, зависимых именно от названных свойств вмещающей геосистемы того или иного размера. Например, свойства травостоя, чувствительные к влажности и богатству почв (1-я и 2-я оси), обнаруживают связь с рельефом не только ближних, но и дальних окрестностей (6000 м). Этот факт отражает их чувствительность к контрасту свойств геосистем крупных междуречий и долин (Соденьга, Заячья, их междуречье). Этот контраст обусловлен разнонаправленными неотектоническими движениями и проходившими на их фоне событиями плейстоцена: накоплением озерно-ледниковых отложений, смывом морен в глубокорасчлененной Ростовской местности, заболачиванием древнеозерной котловины на плоском междуречье.

Таблица. 20.

Доля совокупной дисперсии факторов дифференциации компонентов, описываемая восемью «суперфакторами». Среднетаежный ландшафт, Архангельская область, Полигон «Заячья».

Номер «суперфактора»	% описываемой дисперсии	Накопленная доля описываемой дисперсии
1	19,37	19,37
2	7,80	27,17
3	5,79	32,96
4	5,31	38,28
5	4,76	43,04
6	3,92	46,96
7	3,44	50,40
8	3,25	53,66

Суперфакторы 1-го ряда позволяют оценить ту часть варьирования свойств компонентов, которые обусловлены фактом принадлежности ОТЕ к вышестоящим геосистемам одного или нескольких рангов. Для того чтобы количественно оценить совокупный вклад вмещающих геосистем, построена мультирегрессионная модель, в которой каждая из осей дифференциации компонентов ставится в зависимость от четырех суперфакторов, описывающих рельеф окрестностей наилучшим образом, в данном случае — 1, 2, 6 и 7 суперфакторов. Для 1-й оси дифференциации травостоя (отношение к богатству почв) 59% варьирования объясняется совокупным эффектом контроля со стороны геосистем вышестоящих рангов (табл. 21). Эта группа свойств травостоя варьирует сопряженно со значениями всех четырех «суперфакторов», связанных с разными уровнями организации рельефа. Из раздельного анализа «резонансных уровней» связи с рельефом известно, что наибольший вклад имеет окрестность 1200 м, более крупные геосистемы оказывают убывающее по силе влияние (от 40 до 26% объясняемого варьирования) (табл. 22). Для 2-й оси дифференциации травостоя (отношение к влажности) совокупный вклад рельефа составляет 45%, для 3-й оси дифференциации древостоя (отношение к богатству почв) — 18% и так далее (см. табл. 21).

Таблица. 21.

Доля описываемой дисперсии (коэффициенты детерминации * 100) в мультирегрессионной модели второй степени, где зависимая переменная — ось дифференциации компонента, независимые переменные — группы суперфакторов (по 4). Жирным курсивом выделены модели, в которых r^2 выше чем в моделях, составленных для отдельных окрестностей (возможна одновременная подчиненность нескольким иерархическим уровням рельефа) или для отдельным компонентов (возможен эмерджентный эффект взаимодействия компонентов). Условные обозначения — см. табл. 6. Среднетаежный ландшафт в Архангельской области, полигон «Заячья».

Ось дифференциации	Объясняется 4 суперфакторами, связанными с рельефом всех окрестностей.	Объясняется 4 суперфакторами, не связанными с рельефом	Суммарная дисперсия объясненная 8 суперфакторами	Превышение вклада межкомпонентных связей над вкладом рельефа	Комментарий
1	***2***	***3***	***4***	***5***	***6***
D1herb	***59***	27	86	–30	Свойство подчиняется процессам одной природы, но на нескольких уровнях рельефа
D2herb	***45***	20	65	–9	
D3herb	18	***44***	62	40	Четко выражена подчиненность единственному уровню рельефа (окрестность со стороной 2000 м), учет других уровней не дает роста доли описываемой дисперсии
D4herb	***24***	15	39	–9	
D5herb	14	21	35	7	
D6herb	23	18	41	–5	Четко выражена подчиненность единственному уровню рельефа (окрестность со стороной 1200 м), учет других уровней не дает роста доли описываемой дисперсии
D7herb	***22***	***21***	43	–1	
D8herb	13	15	28	2	
D1tree	16	***34***	52	24	Тесная связь со всеми свойствами фации, отражает целостные свойства фации, но не вмещающих геосистем
D2tree	***31***	***40***	71	9	
D3tree	***39***	20	59	–19	Свойство подчиняется процессам одной природы, но на нескольких уровнях рельефа

Таблица (*продолжение*)

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
D4tree	13	9	22	–4	
D1low	***25***	***39***	64	14	
D2low	11	***37***	48	26	Тесная связь со всеми свойствами фации, отражает целостные свойства фации, но не вмещающих геосистем
D3low	***32***	38	70	6	
D4low	12	17	29	5	
D1bush	***39***	37	76	–2	Высокая связь с отдельными компонентами фации мнимая — отражает их общую подчиненность рельефу вмещающих геосистем. Существует независимая от рельефа окрестностей тесная связь со всем комплексом свойств фации, т.е. свойство отражает целостность.
D2bush	***29***	18	47	–11	Высокая связь с отдельными компонентами фации мнимая — отражает их общую подчиненность рельефу вмещающих геосистем.
D3bush	***33***	15	48	–18	Высокая связь с отдельными компонентами фации мнимая — отражает их общую подчиненность рельефу вмещающих геосистем.
D4bush	12	28	40	16	
D1moss	7	***24***	31	17	
D2moss	***27***	21	48	–6	
D1col	14	21	35	7	
D2col	8	19	27	11	
D3col	***22***	9	31	–13	
D4col	19	13	32	–6	
D5col	11	10	21	–1	
D6col	20	15	35	–5	
D1hor	17	***39***	56	22	
D2hor	***39***	26	65	–13	
D3hor	10	9	19	–1	Процессы чисто почвенные (образование вложенного подзола), не вызывающие реакции фитоценоза. Имеют узколокальный характер, не отражают свойств вмещающих ПТК

Таблица (*окончание*)

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
D4hor	12	18	30	6	Процессы чисто почвенные (миграция влаги в бедных условиях), не вызывающие реакции фитоценоза. Имеют узколокальный характер, не отражают свойств вмещающих ПТК
D1text	15	13	28	–2	
D2text	3	15	18	12	
D3text	12	***21***	33	9	
D4text	5	11	16	6	

Другие четыре «суперфактора» («*второй ряд*») наоборот показывают близкие к нулю факторные нагрузки для свойств рельефа и высокие по модулю факторные нагрузки для большой группы осей дифференциации компонентов. Следовательно, этот ряд «суперфакторов» отражает сопряженное варьирование исследуемого свойства с другими свойствами, «очищенное» от рамочных условий вмещающих геосистем, то есть чистый эффект внутриуровенных межкомпонентных связей. Обратим внимание, что среди них есть такие, которые совершенно нечувствительны к совокупному влиянию первого ряда «суперфакторов» (например, 1-я ось древостоя, 2-я ось кустарничков, 1-я мхов). По аналогии строим модель зависимости каждой оси дифференциации компонентов от четырех суперфакторов второго ряда. Например, для 3-й оси травостоя 44% варьирования никак не связано с рельефом вмещающих геосистем, для 1-й оси древостоя — 34%, 1-й оси почвенных горизонтов — 39% при незначимом вкладе суперфакторов первого «рельефного» ряда (табл. 21).

В то же время часть осей дифференциации компонентов подчиняется и первому, и второму рядам «суперфакторов». Иначе говоря, для них важны и характеристики рельефа вышестоящих геосистем (а точнее связанные с этими характеристиками процессы и явления настоящего или прошлого), и свойства других компонентов независимые от рельефа. Например, для 2-й оси дифференциации древостоя (отношение к влажности почв) 31% варьирования определяется рельефом, а 40% — связями с почвами и другими ярусами фитоценоза. Подчеркнем еще раз, что эти вклады строго независимы. В совокупности они объясняют далеко не 100% дисперсии каждой из осей (приближается к этой цифре только главная 1-я ось дифференциации травостоя — 86%). Следовательно, «остаток» (для большинства осей порядка 20–40%) должен быть объяснен неким третьим (а может быть — и четвертым) рядом «суперфакторов». В их число могут входить с высокой вероятностью: характеристики микрорельефа, не описываемые при разрешении ЦМР 400 м), геофизические показатели (радиационный баланс, динамика погод и др.), геохимические показатели. То есть логически вытекает следующий этап исследования — поиск недоописанной дисперсии. При этом мы отдаем себе отчет, что полученные результаты основаны на избранной модели мультирегрессионного анализа второй степени при строго фиксированном количестве независимых переменных (всегда 4).

Каждый суперфактор первого ряда «вбирает в себя» влияние определенной группы характеристик рельефа. В совокупности суперфакторы первого ряда отражают одновременное действие «констант», навязываемых каждому свойству ОТЕ с разных ие-

рархически уровней более крупных геосистем. Иначе говоря, они отражают *трансляцию информации с вышестоящего уровня в иерархии геосистем на нижестоящий*. Коэффициент детерминации мультирегрессионного уравнения показывает совокупную долю варьирования свойства, обусловленного вышестоящими геосистемами. Кроме того, мы знаем для каждого свойства компонента ландшафта, какая часть его пространственного варьирования определяется свойствами рельефа каждой окрестности по отдельности (табл. 22).

Например, разброс значений 1-й оси дифференциации травостоя на Архангельском среднетаежном полигоне (отношение к трофности местообитания) на 40% определяется морфометрическими характеристиками рельефа в окрестности со стороной 1200 м, на 34% — в окрестности 2000 м, на 28% — в окрестности 2800 м, на 25% — в окрестности 3600 м, на 26% — в окрестности 6000 м. Эти оценки не являются независимыми друг от друга: часть варьирования, объясняемая свойствами геосистем одного ранга, может включаться в часть, объясняемую другим рангом. Следует заметить, что при расчете значений суперфакторов часть морфометрической информации о рельефе каждой из этих окрестностей неизбежно теряется, хотя основная часть — остается отраженной в значениях суперфакторов. Если даже при этой потере 4 суперфактора вместе объясняют существенно большую долю варьирования исследуемого свойства, чем морфология каждой окрестности по отдельности, то налицо «новое качество». В приведенном примере варьирование 1-й оси дифференциации травостоя объясняется уже на 59% при том же количестве независимых переменных (4). В этом случае мы имеем право утверждать, что соотношение олиготрофных (марьянник лесной, плаун булавовидный, ожика волосистая, ятрышник мужской) и мегатрофных (борец, крапива, сныть, медуница, таволга) определяется совместным эффектов процессов перераспределения элементов минерального питания в ландшафте, связанных с несколькими иерархическими уровнями организации рельефа. В целом определяющее влияние рельефа не столько прямое, сколько опосредованное: в зависимости от рельефа неодинаково проявляется экранирующая роль бедных озерно-ледниковых супесей и песков по отношению к более богатым моренным суглинкам и очень богатым карбонатным пермских породам. Вклад наиболее высоких уровней (сторона квадрата 3,6–6,0 км) состоит в наследии палеопроцессов эрозионного смыва четвертичных отложений с крутых склонов крупных долин и обнажении коренных карбонатных пород при сохранении экранирующего чехла на междуречных поверхностях высокого порядка (междуречий Заячья-Соденьга, Заячья-Пукома, Заячья-Кокшеньга). Вклад более низких уровней (сторона квадрата 1,2–2,0 км) состоит в контрастном распределении трофности между локальными междуречьями и долинами малых водотоков (притоков Заячьей, Соденьги, Пукомы). В последних трофность повышается за счет уменьшения мощности песчано-супесчаного чехла и приближения к поверхности карбонатных моренных суглинков при глубоком залегании пермских пород и несущественном их влиянии на почвенно-растительный покров. Некоторый вклад вносит также разгрузка богатых основаниями грунтовых вод в малых долинах. Аналогичная закономерность свойственна и подобному свойству других компонентов фитоценоза (3-я ось дифференциации древостоя, 3-я ось кустарничков, 1-я ось кустарников, 2-я ось почвенных горизонтов). Таким образом, предлагаемый метод «суперфакторов» позволяет оценить в первом приближении наличие или отсутствие эмерджентных эффектов в формировании вертикальной структуры ландшафтов.

Таблица. 22.

Зависимость осей дифференциации компонентов от морфометрических характеристик рельефа в квадратной окрестности операционной территориальной единицы (ОТЕ), обеспеченной полевыми описаниями. Доля описанной дисперсии (коэффициент детерминации * 100) в мультирегрессионном уравнении. Разрешение цифровой модели рельефа 400 м. Среднетаежный ландшафт в Архангельской области. Полигон «Заячья»
Жирным курсивом выделены достоверные уравнения. Условные обозначения — см. табл. 6.

Оси дифференциации	Линейный размер квадратной окрестности, м				
	1200	***2000***	***2800***	***3600***	***6000***
D1herb	***40***	***34***	***28***	***25***	***26***
D2herb	***35***	***34***	***33***	***31***	***26***
D3herb	***19***	***26***	***22***	***17***	***21***
D4herb	11	11	17	8	11
D5herb	9	8	11	11	***18***
D6herb	***22***	***18***	***21***	***16***	11
D7herb	6	***14***	***16***	12	12
D8herb	***17***	***19***	***16***	***13***	***17***
D1tree	***13***	***20***	***15***	***15***	14
D2tree	***21***	***25***	***20***	***21***	***19***
D3tree	***19***	***22***	***16***	***11***	***13***
D4tree	***14***	13	***14***	12	13
D1low	***16***	***16***	***13***	8	***13***
D2low	7	***13***	***19***	13	***21***
D3low	***26***	***24***	***24***	***22***	***20***
D4low	10	9	8	***15***	11
D1bush	***24***	***26***	***26***	***22***	10
D2bush	***14***	***22***	***22***	11	***13***
D3bush	***14***	10	11	***13***	8
D4bush	11	12	***15***	***15***	***13***
D1moss	6	7	8	8	10
D2moss	7	6	10	11	12
D1col	***18***	***14***	***15***	***16***	9
D2col	7	12	7	7	11
D3col	12	11	9	6	7
D4col	***16***	8	12	9	9
D5col	8	6	6	11	9
D6col	9	12	***18***	***15***	***19***
D1hor	***16***	***18***	***19***	***21***	***18***
D2hor	***33***	***23***	***22***	***18***	***23***
D3hor	10	10	7	7	7
D4hor	9	10	8	7	10
D1text	10	***20***	11	12	12
D2text	6	4	11	10	9
D3text	11	9	***15***	10	9
D4text	5	4	3	8	4

Противоположный пример «одноуровенной» связи с морфометрией рельефа представляет группа осей дифференциации механического состава и цветовых характеристик почв. Для них установлено наличие «резонансного уровня» связи с геосистемами с размерами 1,2, 2,0 или 2,8 км, однако мультирегрессионная модель совокупного действия нескольких иерархических уровней не дает приращения объясненной дисперсии. Следовательно, как вышестоящие, создающие рамочные условия (константы), могут рассматриваться только геосистемы указанных размеров. В частности характерная для района двучленность почвообразующей породы (супесь на суглинке) выражена в разной степени (то есть с разной мощностью песчано-супесчаного чехла) на локальных междуречьях, придолинных склонах, в долинах малых водотоков, средний линейный размер которых около 2 км. Этот вид варьирования отражается 1-й осью дифференциации механического состава.

Наиболее ярко проявляется «одноуровенная» зависимость от рельефа вышестоящих геосистем в смешаннолесном ландшафте Удмуртии, где ни одна из осей дифференциации ярусов фитоценоза не обнаруживает эмерджентного эффекта рамочных условий нескольких уровней (табл. 23). Основные контрасты древостоя, кустарников, некоторых свойств травостоя, морфологического строения и цветовой гаммы почв, однозначно объясняются принадлежностью геосистемам с линейными размерами около 6 км (табл. 13). Этот размер соответствует местностям с разной степенью врезанности широких речных долин в увалистые пластовые равнины. Основные различия местообитаний объясняются приуроченностью водноледниковых песчаных отложений к склонам увалов, в то время как междуречные плоские поверхности покрыты маломощным чехлом лессовидных суглинков на коренных глинах. Отсюда следует уже упоминавшаяся «полярность» пространственного распределения бореальных и неморальных видов растений, интенсивности накопления лесной подстилки. Исключение составляет соотношение подзолообразования и гумусонакопления (2-я ось почвенных горизонтов), которое более успешно объясняется «суперфакторной» моделью, то есть подчиняется одновременно разноуровенным закономерностям. При этом следует напомнить, что использованная цифровая модель рельефа с разрешением 400 м отражает дифференциация на примерно урочищном уровне, в то время как необъясненная дисперсия может быть обусловлена более локальными контрастами микрорельефа, требующими более высокого разрешения ЦМР.

В пределах южнотаежных ландшафтов в Костромской области как на районном (табл. 24), так и на региональном (табл. 25) уровнях охвата, эмерджентные эффекты влияния нескольких уровней вышестоящих геосистем проявляются для двух видов ландшафтных контрастов. Во-первых, это соотношение признаков боровых песчаных местообитаний (с сосновыми, местами с лиственницей, лесами на подзолах) и более типичных суглинистых (или с двучленной почвообразующей толщей) с пихтово-еловой тайгой, в том числе при участии неморальных видов древостоя и травостоя на дерново-подзолистых почвах с большей или меньшей степенью гумусированности. Во-вторых, единственный вышестоящий уровень недостаточен для объяснения дисперсии условий торфонакопления и сопутствующего развития видов растительности олиготрофных болот. Для возможности этого процесса необходимо определенное сочетание вертикальной кривизны в окрестности 2 км, горизонтальной расчлененности и горизонтальной кривизны в окрестности 2,8 км.

Таблица. 23.

Доля описываемой дисперсии (коэффициенты детерминации * 100) в мультирегрессионной модели второй степени, где зависимая переменная — ось дифференциации компонента, независимые переменные – группы суперфакторов (по 4). Жирным курсивом выделены модели, в которых r^2 выше чем в моделях, составленных для отдельных окрестностей возможна одновременная подчиненность нескольким иерархическим уровням рельефа) или для отдельным компонентов (возможен эмерджентный эффект взаимодействия компонентов). Условные обозначения — см. табл. 6. Смешаннолесной ландшафт, Удмуртия.

Ось дифференциации	Объясняется 4 суперфакторами, связанными с рельефом всех окрестностей.	Объясняется 4 суперфакторами, не связанными с рельефом	Суммарная дисперсия объясненная 8 суперфакторами	Превышение вклада межкомпонентных связей над вкладом рельефа
D1herb	6	10	16	4
D2herb	25	11	36	–14
D3herb	16	10	26	-6
D4herb	13	4	17	–-9
D5herb	10	12	22	2
D6herb	7	11	18	4
D7herb	13	13	26	0
D8herb	12	14	26	2
D1tree	39	25	64	–14
D2tree	30	22	52	–8
D3tree	30	***22***	52	–8
D4tree	19	***24***	43	5
D5tree	19	12	31	–7
D6tree	11	15	26	4
D7tree	12	12	24	0
D8tree	16	***26***	42	10
D1low	10	***17***	27	7
D2low	8	***15***	23	7
D1bush	20	13	33	–7
D2bush	35	11	46	–24
D3bush	11	***22***	33	11
D4bush	11	3	14	–8
D1col	18	***21***	39	3
D2col	20	4	24	–16
D3col	13	5	18	–8
D4col	***20***	15	35	–5
D1hor	***17***	22	39	5
D2hor	***28***	21	49	–7
D3hor	28	13	41	–15
D4hor	9	9	18	0
D1text	***20***	9	29	–11
D2text	10	8	18	–2
D3text	10	8	18	–2
D4text	9	8	17	–1

Таблица. 24.

Доля описываемой дисперсии (коэффициенты детерминации * 100) в мультирегрессионной модели второй степени, где зависимая переменная — ось дифференциации компонента, независимые переменные — группы суперфакторов (по 4). Жирным курсивом выделены модели, в которых r^2 выше чем в моделях, составленных для отдельных окрестностей (возможна одновременная подчиненность нескольким иерархическим уровням рельефа) или для отдельным компонентов (возможен эмерджентный эффект взаимодействия компонентов). Условные обозначения — см. табл. 6. Южнотаежные ландшафты, Кологривский район Костромской области.

Ось дифференциации	Объясняется 4 суперфакторами, связанными с рельефом всех окрестностей.	Объясняется 4 суперфакторами, не связанными с рельефом	Суммарная дисперсия объясненная 8 суперфакторами	Превышение вклада межкомпонентных связей над вкладом рельефа
D1herb	***21***	***43***	64	22
D2herb	12	***47***	59	35
D3herb	12	***23***	35	11
D4herb	19	13	32	–6
D5herb	14	25	39	11
D6herb	11	***28***	39	17
D7herb	7	15	22	8
D8herb	14	5	19	–9
D1tree	16	***32***	48	16
D2tree	***25***	22	47	–3
D3tree	14	31	45	17
D4tree	6	***46***	52	40
D5tree	***24***	16	40	–8
D6tree	11	***31***	42	20
D7tree	***16***	13	29	–3
D8tree	7	11	18	4
D1low	15	***49***	64	34
D2low	***24***	***54***	78	30
D3low	4	***17***	21	13
D4low	21	31	52	10
D1bush	11	20	31	9
D2bush	***19***	17	36	–2
D3bush	12	12	24	0
D4bush	13	26	39	13
D1moss	14	***31***	45	17
D2moss	8	***24***	32	16
D1col	8	29	37	21
D2col	11	6	17	–5
D3col	12	17	29	5
D4col	8	8	16	0
D1hor	***19***	23	42	4
D2hor	***22***	17	39	–5
D3hor	8	14	22	6
D4hor	8	15	23	7
D1text	9	***22***	31	13
D2text	7	***20***	27	13
D3text	5	11	16	6
D4text	6	10	16	4

Таблица. 25.

Доля описываемой дисперсии (коэффициенты детерминации * 100) в мультирегрессионной модели второй степени, где зависимая переменная — ось дифференциации компонента, независимые переменные — группы суперфакторов (по 4). Жирным курсивом выделены модели, в которых r^2 выше чем в моделях, составленных для отдельных окрестностей (возможна одновременная подчиненность нескольким иерархическим уровням рельефа) или для отдельным компонентов (возможен эмерджентный эффект взаимодействия компонентов). Условные обозначения — см. табл. 6. Южнотаежные ландшафты, Костромская область.

Ось дифференциации	Объясняется 4 суперфакторами, связанными с рельефом всех окрестностей.	Объясняется 4 суперфакторами, не связанными с рельефом	Суммарная дисперсия объясненная 8 суперфакторами	Превышение вклада межкомпонентных связей над вкладом рельефа
D1herb	16	40	56	24
D2herb	***31***	50	81	19
D3herb	21	21	42	0
D4herb	6	***41***	47	35
D5herb	***17***	***19***	36	2
D6herb	***21***	25	46	4
D7herb	13	***27***	40	14
D8herb	17	12	29	-5
D1tree	17	42	59	25
D2tree	***23***	***50***	73	27
D3tree	17	***29***	46	12
D4tree	13	32	45	19
D5tree	16	30	46	14
D6tree	14	17	31	3
D7tree	14	***20***	34	6
D8tree	12	***19***	31	7
D1low	***20***	***31***	51	11
D2low	13	39	52	26
D3low	14	***32***	46	18
D4low	15	38	53	23
D1bush	13	***27***	40	14
D2bush	19	28	47	9
D3bush	16	26	42	10
D4bush	7	***31***	38	24
D1moss	4	***21***	25	17
D2moss	10	25	35	15
D3moss	6	6	12	0
D1col	***15***	***29***	44	14
D2col	7	13	20	6
D3col	11	14	25	3
D4col	11	12	23	1
D5col	4	14	18	10
D6col	12	5	17	-7
D1hor	***14***	20	34	6
D2hor	16	***38***	54	22
D3hor	6	12	18	6
D4hor	12	11	23	-1
D1text	10	***21***	31	11
D2text	3	17	20	14
D3text	11	11	22	0
D4text	7	16	23	9

Второй ряд суперфакторов выделен с целью оценить вклад внутриуровенных межкомпонентных отношений, не зависящих от вышестоящих геосистем. В идеале это вертикальные межкомпонентные отношения в чистом виде, то есть некоторые согласованности пространственного распределения группы видов растений или группы почвенных свойств. Так, 3-я ось дифференциации травостоя на Архангельском полигоне «Заячья» с высокой достоверностью контролируется группой суперфакторов, нечувствительных к рельефу (табл. 21). Ось наиболее чувствительна к единственному уровню рельефа с линейными размерами около 2 км с коэффициентом детерминации 0,26 (табл. 22), и совокупное воздействие суперфакторов рельефа не дает приращения объясненной дисперсии. Ось относится к числу трудноинтерпретируемых, так как нет явных указаний на связь ее значений с условиями местообитания. Значения контрастны на склонах и междуречных поверхностях, при высокой и низкой сомкнутости крон древесного яруса, при большой и малой высоте древостоя, при малой и большой мощности органогенных отложений. Эта совокупность коррелирующих признаков заставляет при интерпретации отдать приоритет гипотезе о внутрифитоценотических межъярусных взаимодействиях. Однако эта же совокупность порождает сомнение в неучастии рельефа в объяснении вариабельности значений. Данная ось, видимо, отражает возрастание обилия ряда видов (кислица, майник, медуница, линнея) в относительно малонарушеных старовозрастных сомкнутых древостоях дренированных склоновых местообитаний, причем сохранность подобных лесов от рубок объясняется именно их «неудобным» крутосклонным положением. Таким образом, рост обилия указанной группы видов, скорее всего, объясняется их адаптированностью к субклимаксным состояниям леса. В то же время приходится констатировать, что подчинение рельефу имеет место, но выражается не только и не столько в рамочных условиях, создаваемых вышестоящей геосистемой (например, речной долиной в целом), сколько в собственных характеристиках рельефа самой описываемой фации. Важна не принадлежность фации к долине, а положение на крутом ее склоне, который в принципе может быть занят этой единственной фацией. Если выражаться точнее, то даже не свойства склона как такового (например, факт интенсивного поверхностного стока и невозможность накопления торфа) важны для формирования указанной ассоциации травяных видов. Важна именно его недоступность для рубок и возможность по этой причине сохранения древостоя, создающего благоприятную среду для этой ассоциации. Причем важен не видовой состав древостоя (корреляции с обилием лесообразующих пород отсутствуют), а факт длительности его существования, индикатором которой в первом приближении выступают диаметры и высоты деревьев. Если бы старовозрастные древостои на территории полигона встречались на пологих участках, то также можно было бы ожидать при прочих равных условиях формирование указанной ассоциации. Но в реальности на пологих склонах и плоских поверхностях древостои относительно молодые и имеют другие ассоциации.

Из приведенного примера следует и другой вывод. Подчиненность свойства группе суперфакторов «нечувствительных к рельефу» нельзя понимать буквально: это свойство не подчиняется рельефу того минимально различимого иерархического уровня, который заложен в разрешении цифровой модели рельефа, в нашем случае — 400 м. Поэтому точнее было бы сказать — «суперфакторы, нечувствительные к мезорельефу». Однако тесная связь свойства с группой свойств других компонентов может означать их сопряженное варьирование в согласии с колебаниями микрорельефа. Для

проверки этой гипотезы необходимо построить уравнения зависимости от рельефа при более дробном разрешении. Такая задача решалась на двух участках Архангельского полигона («Козловка» и «Медвежий») и степном полигоне в Оренбургской области путем использования цифровых моделей рельефа с разрешением 10, 30 и 90 м (Еремеева, 2012; Хорошев и др., 2013а); результаты описаны выше в разделе 4.4.3.

По аналогии с рассуждениями об эмерджентных эффектах суперфакторов, связанных с рельефом, отметим, что и для второй группы суперфакторов свойственна потеря части информации о почвенных и фитоценотических характеристиках. Во всяком случае, в суперфакторах заложено меньше информации, чем в осях дифференциации отдельных компонентов, рассчитанных методом многомерного шкалирования, и тем более — чем в исходных полевых данных. Но тем более ценной представляется превышение коэффициента детерминации уравнения, в котором независимыми переменными являются суперфакторы, по сравнению с уравнениями парных связей между свойством компонента и группой свойств другого компонента (например, между осью чувствительности кустарничков к влажности и совокупностью свойств почв).

Так, дисперсия 1-й оси дифференциации мохового яруса (соотношение сфагновых и зеленых мхов) для Кологривского южнотаежного полигона даже несмотря на потерю информации значительно лучше объясняется совокупным действием четырех не связанных с рельефом суперфакторов (коэффициент детерминации КД 0,31) (табл. 24), чем уравнениями, ставящими ее в зависимость по отдельности от свойств древостоя (КД 0,16), кустарников (КД 0,11), кустарничков (КД 0,28), почвенных горизонтов (КД 0,27). Данная ось, таким образом, участвует в формировании эмерджентной системы взаимоадаптированных компонентов ландшафта, каждый из которых по отдельности не может создать необходимых условий преобладания сфагновых или зеленых мхов.

Большое количество свойств, подчиняющихся правилу эмерджентного эффекта группы компонентов ландшафта, свидетельствует о наличии относительно целостных ландшафтов, в пределах которых пространственная вариабельность подчиняется некоторым «рамочным условиям», общим для всех компонентов, хорошо адаптированных друг к другу. Среди изученных регионов это можно отнести к южнотаежным ландшафтам Кологривского района (модель районного уровня) (табл. 24), Костромской области в целом (модель регионального уровня) (табл. 25) и особенно — среднетаежным ландшафтам Архангельской области (табл. 21). Для этих полигонов зафиксировано возрастание коэффициентов детерминации большинства уравнений, построенных для нечувствительных к мезорельефу суперфакторов, по сравнению с моделями парных отношений компонентов. Для полигона, расположенного в зоне смешанных лесов в Удмуртии, эмерджентные эффекты почти не выражены (табл. 23). В основном выявлены более или менее тесные парные связи компонентов, что вынуждает предполагать низкую целостность ландшафта, скорее всего обусловленную большой нарушенностью дерново-подзолистых почв и относительной молодостью фитоценозов. С другой стороны именно отсутствие совершенной взаимоадаптированности компонентов может быть залогом устойчивости ландшафта к внешним нарушениям, его пластичности, то есть приспособленности каждого из компонентов к более широкому диапазону условий, чем в южнотаежном и среднетаежном ландшафтах.

Сопоставление классификации осей дифференциации компонентов методом Варда с результатами анализа эмерджентных эффектов для Костромской области и Кологривского района показал ряд закономерностей. Оси в кластерной диаграмме груп-

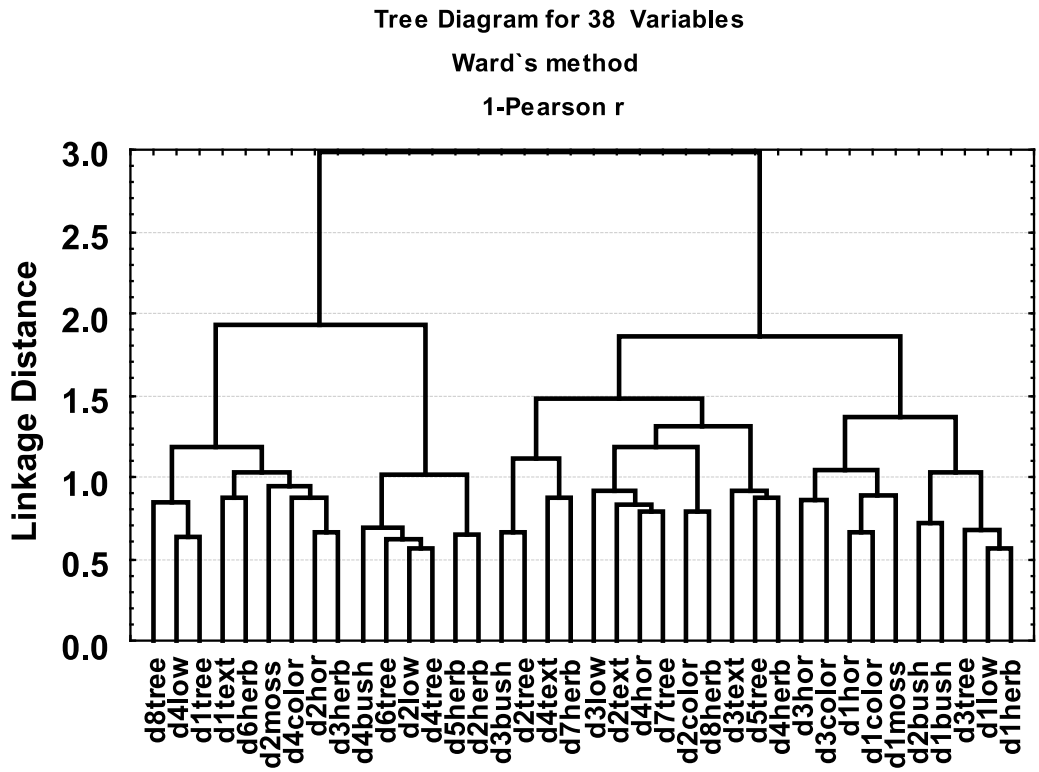

Рис. 58. Классификация осей дифференциации свойств компонентов в южнотаежном ландшафте Кологривского района Костромской области. Метод Варда. Метрика Пирсона. D… — обозначения осей дифференциации свойств компонентов, см. пояснения к табл. 6.

пируются в довольно строгом *согласии с их группировками по соотношению вкладов вышестоящих геосистем и вертикальных межкомпонентных отношений и наличию эмерджентных эффектов* (рис. 58, рис. 59). При этом *гипотеза, что оси сгруппируются в кластерной диаграмме по характерным резонансным уровням отношений с рельефом вышестоящих геосистем, не подтвердилась*. В каждом кластере есть свойства (оси), с разными размерами контролирующих их варьирование геосистем, а также свойства, для которых такой резонансный уровень вообще не выражен.

Рассмотрим классификацию свойств, выраженных через оси дифференциации, на примере массива данных регионального охвата для Костромской области (рис. 59).

Группа осей, отражающих сукцессионное состояние фитоценоза, характеризуется существенно бóльшим вкладом межкомпонентных отношений в пространственную дифференциацию, чем вклад рельефа (табл. 25). Эта группа легко интерпретируется по достоверным корреляциям с показателями высоты, диаметра, возраста древостоя. Каждое из свойств фитоценоза этой группы, подчиняется эмерджентному воздействию группы других свойств, которым описывается 30–40% дисперсии, то есть в несколько раз больше, чем описывается суперфакторами рельефа. Ни одна из осей не описыва-

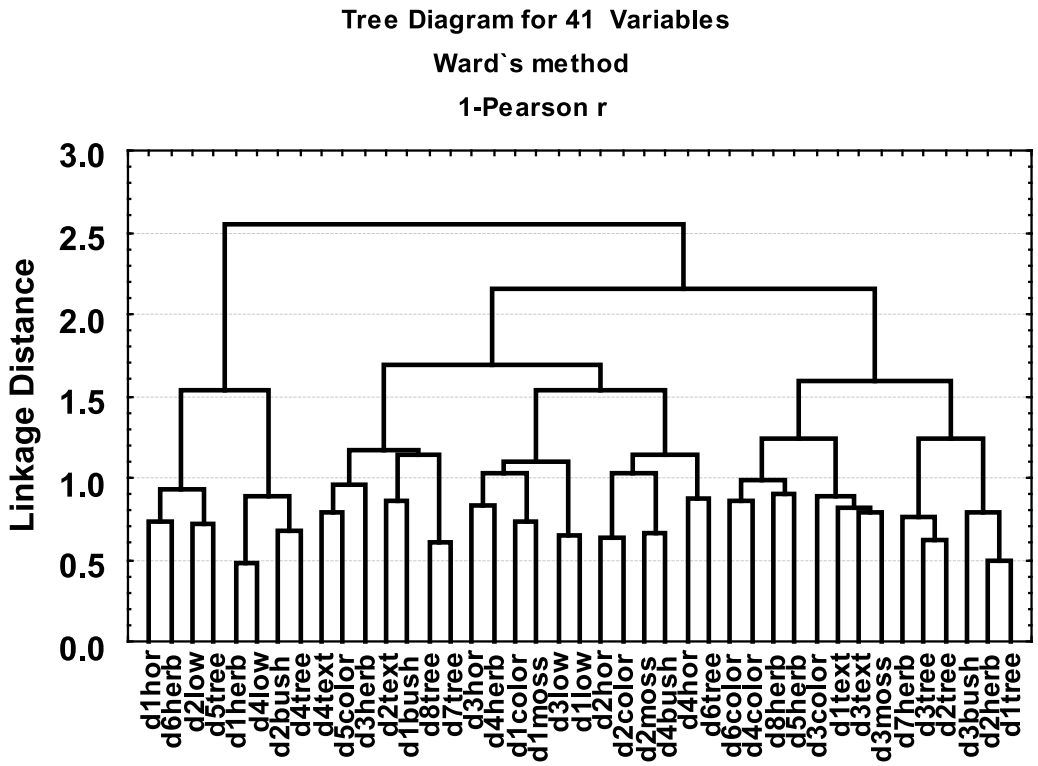

Рис. 59. Классификация осей дифференциации свойств компонентов в южнотаежных ландшафтах Костромской области. Метод Варда. Метрика Пирсона. D… — обозначения осей дифференциации свойств компонентов, см. пояснения к табл. 6.

ется суперфакторами рельефа достоверно. Большинство осей данной группы не имеет также достоверных связей с морфометрическими характеристиками рельефа ни одной из окрестностей по отдельности. Это доказывает полную независимость от состояния вмещающих геосистем и чисто локальный масштаб пространственной дифференциации. Фактически это масштаб принятия волевых решений о лесоразработках в разные годы без специального выбора предпочтительных условий рельефа с возрастающим игнорированием ландшафтных границ. Показательно, что к этой группе относится и соотношение гумусонакопления и оподзоливания в почвах. Видимо, процесс миграции гумусовых веществ (вымывание с сопутствующим оподзоливанием либо накопление в верхней части профиля) в условиях южной тайги достаточно чутко реагирует на изменение сукцессионного состояния фитоценоза. Механизм заключается во временном обратимом доминировании травяного яруса вторичных мелколиственных древостоев и дернового процесса при небольшой сомкнутости крон и последующем восстановлении доминирующей роли оподзоливания и обеднения почв основаниями по мере восстановления хвойного древостоя. Данные, полученные нами по этому сюжету в заповеднике «Кологривский лес», приводятся ниже в разделе 4.7.

Оси, ответственные за перераспределение влаги в ландшафте с противопоставлением суходольных и гидрофильных местообитаний достаточно слабо описываются обеими группами суперфакторов: доля объясненной дисперсии не превышает 20–25%. Рельеф вмещающих геосистем имеет более существенное значение, чем межкомпонентные отношения. Для некоторых свойств травостоя и почв (условия дренирования, выраженные через интенсивность накопления органогенных горизонтов) проявляется эмерджентный эффект влияния нескольких иерархических уровней геосистем. Подобный эффект для свойств ландшафта, чувствительных к влажности описан и для районного уровня охвата на Кологривском полигоне.

Оси, ответственные за дифференциацию бореальных и неморальных свойств ландшафта, подчиняются в большей степени вертикальным межкомпонентным связям, чем межуровневым связям со свойствами рельефа вмещающих геосистем. Межкомпонентные связи описывают от 30 до 50% дисперсии разных свойств, рельеф вмещающих геосистем – от 15 до 30%. Однако эмерджентные эффекты влияния компонентов друг на друга не проявляются. Группы свойств травостоя, кустарничков, кустарников, древостоя подчиняются парциальным геосистемам. Проще говоря, например, неморальные виды травостоя появляются при условии наличия липы, клена или дуба независимо от наличия или отсутствия каких-то определенных кустарничков или кустарников. В то же время существует достаточно хорошо выраженная зависимость от свойств крупных вмещающих геосистем, но лишь какого-то одного уровня. Описывается до 22–24% дисперсии. Например, степень «бореальности» древостоя (доля ели, пихты), травостоя (ожика, плауны, седмичник), кустарникового яруса (можжевельник, крушина) в масштабах всей Костромской области определяется сочетанием форм рельефа с размерами около 11 км, то есть фактически дифференциацией родов ландшафтов. Так, более бореальный характер имеют ландшафты относительно слаборасчлененных моренно-водноледниковых равнин междуречья Виги–Унжи, водноледниковых равнин междуречья Неи–Унжи. Черты неморальности возрастают на возвышенных густорасчлененных возвышенных моренно-структурно-эрозионных и моренно-камовых равнин Плес-Галичской гряды, междуречья Вохмы-Вочи-Ветлуги, междуречья Унжи–Вохтомы, в том числе ядро заповедника «Кологривский лес» (Немчинова и др., 2011, 2012; Хорошев и др., 2013б).

Еще одна группа свойств демонстрирует довольно сильные парные связи (древостой – травостой), при наличии эмерджентных эффектов взаимодействия компонентов и сильных связях с рельефом вмещающих геосистем. Она отражает противопоставление сухих боровых песчаных местообитаний с лиственнично-сосновыми и сосновыми лесами и фоновых для региона свежих суглинистых. Причина кроется в наследии процессов ледникового времени, сформировавших основную долю песчаных террас и междуречий Костромской области среди моренных суглинистых равнин. Резонансный уровень отношений с рельефом выражен для двух факторов дифференциации древостоя четко. Вмещающие геосистемы имеют линейные размеры около 3,6 км, что примерно соответствует средним для региона поперечным размерам террас крупнейших рек с глубоко врезанными долинами (Унжи, Неи, Ветлуги, Межи) и долинных зандров. Специфичность всех ярусов боровых фитоценозов, морфологического строения подзолов четко проявляется как в высоких значениях коэффициентов детерминации уравнений парных связей, так и в эмерджентных эффектах взаимовлияния компонентов.

Выявлена также трудноинтерпретируемая группа осей, описывающая дифференциацию части свойств травостоя, мхов и некоторых цветовых и литологических ха-

рактеристик почв. Она выделяется отсутствием как значимых парциальных связей с рельефом и другими компонентами, так и эмерджентных эффектов. Судя по высоким порядковым номерам осей, что означает их небольшой вклад в общее варьирование, их следует считать отражением случайных местных факторов, в том числе антропогенных нарушений, приводящих к росту обилия отдельных видов, например, иван-чая, золотарника, фиалки удивительной, щучки дернистой. Участие в этой группе оси, контролирующей соотношения сфагнума и кукушкина льна заставляет предположить с высокой вероятностью влияние неучтенного данной моделью микрорельефа, создающего небольшие колебания уровня грунтовых вод и условий накопления поверхностной влаги.

Таким образом, применение метода «суперфакторов» позволило прийти к следующим выводам о причинах пространственного варьирования свойств ландшафта:

1. Вмещающие геосистемы разных рангов могут создавать совокупный эмерджентный эффект влияния на большинство свойств ландшафта.
2. Эмерджентные эффекты совокупного воздействия групп компонентов существуют и могут перекрывать по значимости влияние компонентов по отдельности.
3. Среди свойств компонентов ландшафта различаются плеяды, полностью независимые от влияния вмещающих геосистем и полностью независимые от локальных межкомпонентных связей.
4. Большинство свойств ландшафта варьирует в пространстве в результате совокупного влияния разноранговых вмещающих госистем и внутриуровенных межкомпонентных связей.
5. Целостность моренных среднетаежных и южнотаежных ландшафтов выше, чем в ландшафтах пластовых равнин зоны хвойно-широколиственных лесов. Пониженная взаимоадаптированность компонентов хвойно-широколиственных ландшафтов создает предпосылки для их пластичности по отношению к внешним воздействиям.

4.6. Пространственные рамки действия межкомпонентных связей

Получив знание о соотношении вкладов значимых внутриуровенных и межуровневых связей, необходимо определить рамки применимости выявленных закономерностей как в пространстве, так и во времени. В этой главе продемонстрируем способ определения пространственных рамок действия межкомпонентных связей.

Данные об изменении тесноты корреляционных связей в разных выборках и анализ устойчивости плеяд приводились еще в 1970-х гг. (Крауклис, Евдокимова, 1975). Как причина автономности некоторых признаков этими авторами рассматривалась многофакторность процессов, обусловливающих локальное варьирование; для разделения их вкладов применен метод главных компонент. В цитируемой работе, в частности, показано, что биогеоценозы приводораздельной и долинной плеяд существенно различаются по корреляционной структуре.

Нам предстоит определить специфику локальных условий, в которых наиболее сильно нарушается характерное в целом для ландшафта правило соответствия между группами свойств, например, фитоценоза и почв, яруса фитоценоза и рельефа вмещающей геосистемы. Разумеется, решение этой задачи имеет смысл только для моделей высокой статистической достоверности (например, для регрессионных уравнений — с

высоким коэффициентом детерминации). Технологически задача решается анализом «остатков» (residuals) мультирегрессионного уравнения, в котором зависимой переменной является та или иная ось дифференциации одного компонента, а независимыми — совокупность осей дифференциации другого компонента или свойств рельефа. Предмет анализа — поиск причин наиболее сильных отклонений предсказанных моделью значений от наблюдаемых в природе. Иными словами, это поиск мест в ландшафте, где действие проверяемого фактора (например, условий увлажнения) ослабевает и маскируется действием других факторов. Такое место как бы выбивается из общего ряда и имеет гипертрофированное обилие какого-либо вида (или наоборот обилие существенно меньшее, чем ожидается по гипотезе о зависимости от проверяемого фактора), нетипичное для данных условий мощность почвенного горизонта и т.п. В более общем смысле решается задача выявления ареала проявления связи того или иного типа.

Эта задача имеет два варианта решения.

Первый вариант применим, когда континуальные данные имеются только для рельефа в виде цифровой модели, а почвы и растительный покров описаны только в репрезентативных фациях. Тогда интерполировать сведения о подчиненности или неподчиненности данному типу связи можно только установив дискретные типы ландшафтных условий, при которых остатки регрессионных уравнений минимальны по модулю. Затем, зная принадлежность неописанного участка к данному типу ландшафтных условий, можно распространять на него суждение о вероятности проявления данного типа связи и определить его положение на соответствующем экологическом градиенте. Например, пусть установлена связь между расчлененностью рельефа окрестностей и обилием неморальных и бореальных видов травостоя для слабоволнистых суглинистых водораздельных поверхностей в тайге. Тогда на основании принадлежности фации к этой категории можно прогнозировать высокое обилие неморальных видов на наиболее густорасчлененном ложбинами ее участке, а бореальных — на слаборасчлененном участке.

Второй вариант применим, когда доступны континуальные данные для обоих исследуемых свойств. Как правило, это цифровая модель рельефа и характеристики растительного или почвенного (для оголенных участков) покрова, полученные в результате обработки космических снимков. В качестве последних наиболее удобно применять индексы, полученные из разнообразных комбинаций оптических плотностей каналов съемки — влажности, продуктивности, ожелезненности и т.д. (Козлов, 2009; Кренке и др., 2011; Пузаченко и др., 2014). Тогда появляется возможность рассчитывать показатели связи или для всей территории сразу, или в скользящем окне заданного размера. Результаты расчета присваиваются каждой ОТЕ (пикселу). В частности, для каждого пиксела можно рассчитать коэффициент связи (корреляции, Якоби и др.), остаток уравнения, связывающего свойства растительного покрова с рельефом или разные свойства растительного покрова между собой. Большой опыт в применении этой методики получена сотрудниками Института географии имени В.Б. Сочавы СО РАН в группе А.К. Черкашина (Солодянкина, Черкашин, 2004; Черкашин, 2005; Истомина, 2012; Черкашин, Истомина, 2013). Между количественными характеристиками геосистемных выделов и координатами классификационной позиции (комплексные градиенты-факторы влияния природной среды (теплообеспеченность, влагообеспеченность и др.) показаны корреляционные связи для каждого участка ландшафта (Солодянкина, Черкашин, 2004). Нами ранее на примере среднетаежного ландшафта был показан способ

выявления ареалов разных типов отношений в системе «растительный покров – рельеф» на основании классификации ОТЕ по сочетаниям регрессионных коэффициентов (Хорошев, Алещенко, 2008; Хорошев и др., 2010).

4.6.1. Выявление ареала действия межуровневых и внутриуровенных связей с использованием ограниченной выборки данных полевых наблюдений

Первый вариант выявления ареала типа связей покажем на примере сначала межуровневой, затем - внутриуровенной связи.

Для локализации ареалов проявления межуровневой связи между свойствами фитоценоза и характеристиками рельефа вмещающих геосистем был проведен анализ пространственного распределения остатков мультирегрессионных уравнений 2-й степени. Уравнение связывает первую по значимости ось дифференциации видового состава древостоя с характеристиками рельефа в некоторой окрестности. Выбранная ось соответствует соотношению древесных пород с противоположной чувствительностью к трофности (богатству) местообитания. В смешанных лесах Удмуртии это — соотношение широколиственных и хвойных пород, в средней тайге Архангельской области — соотношение обилия ели и сосны.

Сам гипотетический факт чувствительности этой оси к свойствам рельефа свидетельствует о некоторой связи между распределением питательных веществ в почвах и рельефом территории. Из литературы известны многочисленные примеры, когда почвообразующие отложения маскируют контрасты рельефа или не согласуются с рельефом (покров лессовидных суглинков, озы и др.). Поэтому положительный ответ на вопрос о связи богатства местообитаний с рельефом может частично дать ответ и на вопрос о соотношении времени формирования рельефа и времени формирования отложений. Однако следует принимать во внимание, что помимо разницы в составе отложений возможны и другие объяснения связи чувствительных к трофности свойств растительности с рельефом. Во-первых, возможно перераспределение питательных веществ в ландшафте под контролем рельефа вследствие водной и биогенной (например, при переносе вещества животными) миграции при исходно одинаковом литологическом строении. Во-вторых, растения могут извлекать необходимые им элементы из почвы в зависимости от миграционной подвижности последних, которая, в свою очередь, может определяться щелочно-кислотной и окислительно-восстановительной обстановкой, влажностью почв, испарением. Следовательно, уклоны и солярная экспозиция также могут быть немаловажными факторами конкуренции между древесными породами. Таким образом, исследуется не связь растительности с рельефом как таковая, а реакция некоторых свойств растительности на существенные процессы перераспределения вещества в ландшафте под действием современных процессов или палеопроцессов, оставивших наследие в современных ландшафтах.

Классификация рельефа, проведенная по характеристикам кривизны (горизонтальной и вертикальной) и расчлененности (горизонтальной и вертикальной) в окрестностях разного размера позволяет распознать структуры, сформированные процессами разного генезиса.

На примере ландшафтов пластовых равнин Удмуртии установлены следующие генетически обусловленные уровни организации рельефа (рис. 42).

1) Классификация по характеристикам в квадрате со стороной 1200 м (3 пиксела) отражает индивидуальные мезоформы рельефа и их отдельные части, примерно соответствующие рангам урочищ и подурочищ. Так, различаются части оврагов разной врезанности и ширины, участки придолинных склонов разной формы, прибровочные части междуречий, перегибы склонов, междуречные холмы и т.д. Классификация на этом уровне фактически позволяет распознавать реальные геохимические катены и участки с разным соотношением современного выноса и аккумуляции вещества, в том числе влаги. Разнообразие рельефа обусловлено в основном современными эрозионными и денудационными процессами.

2) Классификация по характеристикам в квадрате со стороной 2000 м (5 пикселов) уже не вполне четко выделяет индивидуальные эрозионные мезоформы рельефа, но хорошо отражает асимметрию рельефа, связанную с моноклинальным залеганием пластов коренных пермских пород. В частности хорошо различаются классы крутых юго-западных и пологих северо-восточных склонов куэстообразных увалов, противоположные склоны крупных асимметричных долин (рис. 18). Этот уровень, с одной стороны отражает наследие геологических палеопроцессов, с другой — контрастные условия поступления солнечной радиации, испарения, миграции вещества. Контрастная крутизна склонов обусловила неравномерное распределение пахотных и лесных земель: первые приурочены к более пологим склонам, чем вторые. Междуречья лучше дифференцированы, чем при классификации в окрестности со стороной 1200 м. Хорошо различаются участки междуречий разной ширины и морфологии (плоские, холмистые, увалистые), что, безусловно, характеризует наследие геологических процессов прошлого.

3) Классификация по характеристикам в квадрате со стороной 2800 м (7 пикселов) отражает уже не индивидуальные урочища, а их группы с сочетанием положительных и отрицательных, выпуклых и вогнутых форм, различные по дробности морфологической структуры. Последняя, скорее всего, ассоциируется с характером трещиноватости коренных пород, которая определяет густоту и конфигурацию эрозионной сети. По результатам применения информационных мер к абсолютным высотам в данной окрестности данная классификация отражает наиболее ярко выраженный иерархический уровень организации рельефа, соответствующий средним размерами междуречий между постоянными водотоками 2-го порядка. В ландшафтно-геохимическом смысле классы рельефа будут различаться по интенсивности водной миграции, что может отражаться на скорости выщелачивания, интенсивности промывного режима почв, возможности временного переувлажнения почв.

4) Классификация по характеристикам в квадрате со стороной 3600 м (9 пикселов) отражает в целом увалистое строение территории с различением некоторых контрастов морфологии речных долин, склонов и поверхностей увалов.

5) Классификация по характеристикам в квадрате со стороной 6000 м (15 пикселов) хорошо отражает увалистое строение пластовой равнины с разделением относительно узких междуречий между глубоковрезанными долинами. Это может быть связано как с неотектонической блоковой дифференциацией территории, так и с валообразными деформациями осадочного чехла (Физико-географическое районирование СССР, 1968).

Сопоставив величины остатков от уравнений, составленных для окрестностей разного размера, можно выделить несколько категорий свойств (Хорошев, 2012):

1) Исследуемое свойство не связано с рельефом и индицируемым им процессов ни в одной окрестности. Численная характеристика свойства определяется процессами принципиально другой природы, возникшими вне связи с рельефом, в том числе в ре-

зультате саморазвития фации. Такой результат, например, получен для видового состава древесного яруса болотных фаций Архангельской области и Удмуртии.

2) Исследуемое свойство подчиняется правилу, действительному только для одного масштаба (рельеф в некоторой окрестности). При этом велики остатки от уравнений, построенных для других окрестностей. Это интерпретируется как наличие какого-то одного ведущего процесса, связанного с контрастами рельефа, выявляемыми классификацией его характеристик данной окрестности. Такой результат получен, например, для видового состава древесного яруса плоских водораздельных поверхностей, сложенных двучленными отложениями. Состав древостоя меняется в зависимости от рельефа в окрестности со стороной 6000 м, т.е. в зависимости от контрастов неотектонической природы (плоские междуречья, пологие склоны увалов, широкие речные долины). Фации одной мезоформы рельефа имеют разные свойства в зависимости от близости к другим мезоформам и их свойств (а точнее — процессов, которые охватывают и собственную мезоформу и совокупность соседних).

3) Исследуемое свойство хорошо описывается уравнениями, полученными для окрестностей нескольких размеров. Такой результат получен, например, для соотношения мезотрофных (ель) и олиготрофных (сосна, береза) древесных пород в Архангельской области для ступенчатого междуречья Заячьей и Пукомы в пределах поверхностей и пологих склонов неотектонических микроблоков. В Удмуртии этому правилу подчиняется соотношение хвойных и широколиственных пород для узких междуречий в Кизнерском районе, а также крутых юго-западных придолинных склонов куэстообразных увалов в Можгинском районе. Интерпретация физического смысла процессов, связанных с рельефом в разных окрестностях определяется набором значимых независимых переменных (характеристик расчлененности и кривизны рельефа) в уравнении, где зависимой переменной является ось дифференциации древостоя. Если набор значимых переменных и знаки регрессионных коэффициентов сохраняются в уравнениях, построенных для разных окрестностей (т.е. для разных масштабов), это означает, что малая окрестность (например, со стороной 1200 м) характеризует лишь небольшую часть общего ареала проявления процесса (например, со стороной 6000 м). При этом все характерные особенности этого процесса все равно проявляются. Например, узкий увал между двумя оврагами отличается по характеру древостоя от ровного склона по тому же правилу, что и широкое междуречье от крупных речных долин, а именно: чем более расчлененный рельеф, тем меньше влаголюбивых пород. Это дает право говорить о самоподобии процесса адаптации видового состава фитоценоза к влагообеспеченности. Если же остатки от уравнений для любых окрестностей малы, но при этом набор значимых независимых переменных и знаки регрессионных коэффициентов в уравнениях разных окрестностей отличаются, то правомерно говорить о смене процесса (или фактора дифференциации) при переходе с одного иерархического уровня на другой. Так, в приведенном примере для Удмуртии, состав древостоя в малой окрестности 1200 м определяется в основном вертикальной и горизонтальной расчлененностью рельефа (и, следовательно, положением уровня грунтовых вод), а большой окрестности (6000 м) — горизонтальной и вертикальной кривизной (и, следовательно, аккумуляцией/рассеянием стока и минеральных веществ). Таким путем, сравнивая набор значимых независимых переменных и знаки коэффициентов, можно выявить и диапазон масштабов, в котором реализуется тот или иной процесс, оказывающий влияние на исследуемое свойство ландшафта.

4) Исследуемое свойство подчиняется процессу в каком-либо «узком» масштабе, индифферентно к «среднему» масштабу и подчиняется некоторому процессу в «широком» масштабе. Разрыв в «лестнице масштабов», которым подчиняется свойство, означает «выход из резонанса». Следовательно, существуют два более или менее равнозначных процесса, которые действуют в разных масштабах и одновременно контролируют пространственное варьирование исследуемого свойства. Такой результат получен для соотношения хвойных и широколиственных пород в Удмуртии для верховьев овражных урочищ. В масштабе, соответствующем окрестности со стороной 1200 м (свойства описанного в поле урочища и соседних с ним), состав древостоя определяется вертикальной расчлененностью: наиболее расчлененные местности соответствуют наиболее богатым местообитаниям с выходами коренных карбонатных глин пермского возраста. В масштабе, соответствующем окрестности со стороной 6000 м (сочетание групп мезоформ рельефа, обусловленное неотектонической историей), состав древостоя определяется горизонтальной кривизной. Местности с наибольшей кривизной (выпуклые междуречья) более оптимальны для широколиственных пород, а с наименьшей (вогнутые долины) — для хвойных, представленных в основном сосной, в силу песчаного выполнения долин и нижних частей придолинных склонов. В масштабе, соответствующем окрестности со стороной 2800 м (выявляет гидрогеологические контрасты, связанные с разной трещиноватостью коренных пород, которая отражается в густоте гидрографической сети), зависимость от рельефа пропадает, т.е. этот иерархический уровень для соотношения широколиственных и хвойных пород незначим.

Для среднетаежного ландшафта Архангельской области (полигон «Трансект») покажем результат определения пространственных рамок действия связи на примере фактора трофности для деревьев и фактора влажности для трав. На трансекте четко выявляются несколько секторов, которые не описываются характеристиками рельефа ни в одной окрестности. К ним относятся: фации в местах разгрузки щелочных грунтовых вод (тт. 23–27), фации прибровочной части левого междуречья и верхней части склона долины (тт. 38–45), фации болот межблоковых понижений на левобережье Заячьей (тт. –23…–27, –32…–35, –48…–60). Травы, чувствительные к влажности, не описываются рельефом также на наиболее плоском и переувлажненном участке левого междуречья (тт. 10–38), где явственно обозначаются признаки прогрессирующего заболачивания с накоплением торфяного горизонта мощностью до 15–25 см. Все эти примеры иллюстрируют гипертрофированное воздействие грунтовых вод, т.е. относятся к группе мнимокоренных, в терминологии сибирской школы ландшафтоведения. Саморазвитие фации выходит за рамки, предопределенные вмещающими геосистемами.

Существенно различаются величины остатков от уравнений для разного масштаба на наклонном правобережье Заячьей (тт. 135–200) с явным приоритетом одного ведущего масштаба (т.е. влияния геосистемы какого-то одного вышестоящего ранга). Дифференциация травостоя в соответствии с влажностью определяется геосистемами с линейным размером 2800 м. То же самое характерно для части левобережья с наиболее ярко выраженной ступенчатостью и чередованием плоских и склоновых поверхностей (тт. –22…–63). Расстояние 2800 м соответствует размерам неотектонических микроблоков, разделяющих наиболее крупные притоки Заячьей (Межница, Пагушков, Стругница) и сопоставимых с размерами плоских и наклонных междуречий (Хорошев, 2003а, б). Фации, непосредственно находящиеся в долине Заячьей и примыкающие к ней описываются рамочными условиями геосистемам с линейным размером 6000 м.

На примере среднетаежного ландшафта Обской террасы рассмотрим ареалы действия внутриуровенных межкомпонентных связей между свойствами, измеренными в поле для ограниченного количества репрезентативных фаций. Основные расчеты проведены Е.О. Брусиловской под руководством автора (Khoroshev, Brusilovskaya, 2010).

Наибольшее внимание было уделено двум наиболее значимым осям дифференциации для каждого яруса фитоценоза. Оказалось, что зависимость обилий видов деревьев от строения почв (набора и мощности почвенных горизонтов) ослабевает в наиболее хорошо дренированных позициях — крутосклонных (более 15 градусов) долинах рек и ручьев, прибровочных частях междуречий, узких мысообразных краевых секторах междуречий между близкими эрозионными формами. То же относится к основному фактору дифференциации трав. Вторые по значимости факторы дифференциации древостоя и травостоя в наименьшей степени связаны с почвами на вершинах эоловых бугров. При этом склоны этих же бугров отличаются более высоким уровнем детерминированности ярусов фитоценоза такими консервативными свойствами почвенного профиля, как набор и мощности почвенных горизонтов. Еще одна особенность распределения остатков уравнения заключается в некоторой зависимости тесноты почвенно-растительных связей от степени развития древостоя и мохового яруса. Наиболее типичным зональным представителем последнего является *Hylocomium splendens*. Фации с его проективным покрытием более 30% (которое достигается только при высоте 1-го яруса древостоя более 20 м) отличаются большими остатками от мультирегрессионного уравнения, а именно аномально высоким обилием пихты и ели.

4.6.2. Выявление ареала действия межуровневых связей с использованием континуальных данных о свойствах растительного покрова и рельефа

Теперь рассмотрим второй вариант выявления ареалов типов межуровневых связей. Напомним, что он применяется, когда имеются континуальные данные для двух свойств. В нашем случае – это свойства фитоценозов, оцененные по материалам многоканальной космической съемки и цифровая модель рельефа. Степной заповедный ландшафт является наиболее удобным полигоном для демонстрации решения задачи по двум причинам: а) один тип растительности; б) отсутствие антропогенных модификаций. Таким условиям отвечает низкогорно-степной ландшафт на Южном Урале (Оренбургская область) — участок Оренбургского государственного заповедника «Айтуарская степь». Важное преимущество заповедной степи, по сравнению с нарушенным лесным ландшафтом, — возможность использования цифровой модели рельфа SRTM, которая очень чувствительна к антропогенным перепадам высот растительного покрова.

Автором совместно с Г.М. Алещенко разработан метод выделения ареалов равновесия растительного покрова по отношению к рельефу, основанный на статистической оценке связей между уровнями организации ландшафтного пространства (Хорошев, Алещенко, 2005, 2008). Метод позволяет определить для каждой операционной территориальной единицы размеры гомогенной геосистемы вышестоящего уровня и размеры вышестоящей гетерогенной геосистемы с единым типом межкомпонентных отношений, а также конкретные ареалы существования таких геосистем.

Для получения исходных данных методом главных компонент выделены взаимно независимые факторы дифференциации растительного покрова, основанные на комби-

нации характеристик оптической плотности космического изображения, полученные в разных спектральных каналах. По цифровой модели рельефа SRTM с разрешением 90 м рассчитаны, как и во всех вышеописанных случаях, морфометрические характеристики рельефа в скользящем квадрате: вертикальная расчлененность, горизонтальная расчлененность, вертикальная кривизна, горизонтальная кривизна. Исходные характеристики стандартизованы. Рассчитанная характеристика отнесена к центральному пикселу квадрата.

При решении задачи автор использует термины иркутской ландшафтной школы «геомер» и «геохора». Геомер рассматривается как внутренне гомогенная единица, включающая в себя ОТЕ. Свойства геомера поэтому являются одновременно свойствами ОТЕ. Геохора — гетерогенная единица, включающая в себя множество геомеров. Внутри геохоры наблюдается единое правило, по которому свойства ОТЕ связаны со свойствами вмещающих их геомеров (рис. 60).

Рассмотрим смысл применяемой терминологии подробнее. Каждый пиксел изображения рассматривается как операционная территориальная единица (ОТЕ), сопоставимая примерно с природно-территориальным комплексом ранга фации или подурочища. Строится серия линейных регрессионных уравнений, связывающих свойства ОТЕ с морфометрическими свойствами рельефа вмещающего геомера. Серия уравнений строится в скользящем квадрате в окружающем ОТЕ заданном квадратном ареале (геохоре) (рис. 60). Размер геохоры определяется по формуле Г=Б+В–А, где Г — линейный размер (сторона) геохоры, Б — линейный размер геомера, В — линейный размер ареала расчета связи, А — линейный размер ОТЕ в центре геохоры. Каждая ОТЕ (рис. 60, А) в этом ареале (рис. 60, Г) характеризуется собственными свойствами фитоценоза по космоснимку (зависимая переменная) и четырьмя вышеназванными морфометрическими характеристиками рельефа заданной квадратной окрестности — геомера (независимые переменные) (рис. 60, Б). Центральному пикселу присваивается численная оценка связи, полученная в заданном ареале (рис. 60, Г). Конкретными наблюдениями для построения уравнения и получения характеристик связи (коэффициента детерминации и регрессионных коэффициентов) служат характеристика растительности каждой ОТЕ и характеристики рельефа вмещающего ее геомера (рис. 60, В). Тем самым мы выясняем, выдерживается ли в заданном ареале «Г» единое правило подчинения компактной группы ОТЕ «В» вмещающим геомерам размера «Б». В качестве критерия существования связи между свойствами растительного покрова ОТЕ и рельефом вмещающего геомера принимается значение коэффициента детерминации и уровень значимости линейного регрессионного уравнения «Фитоценоз ОТЕ = F (Рельеф вмещающего геомера)» для заданного размера геохоры. В геохоре, если она существует (то есть установлена достоверная связь), варьирование объясняется разными количественными уровнями проявления единого фактора. Ее составные части (геомеры) находятся в едином факторально-динамическом ряду. Поэтому считается, что серия вмещающих геосистем «Б» (геомеров) образует *парагенетическую систему* — геохору «Г»: она мозаична, но правило внутренней дифференциации едино. Такая единица примерно соответствует понятию «ландшафт-ареал» (Ретеюм, 2006).

Поясним сказанное на простом примере. В пределах горного склона есть серия ложбин. Каждая ложбина рассматривается как геомер и при достаточно высоком разрешении ЦМР и космоснимка может включать несколько ОТЕ (пикселов). На протяжении каждой ложбины ее глубина меняется. Состояние ОТЕ днища определяется глубиной вреза относительно основной поверхности склона, то есть свойствами вмещающего

Рис. 60. Принцип расчета размеров геохоры с единым правилом отношений между свойствами фитоценоза и рельефа вмещающей геосистемы.

геомера — ложбины. Чем глубже врезан участок ложбины в склон, тем больше в ее днище концентрируется влага и тем больше влаголюбивых видов в фитоценозе. Это правило справедливо для всех ложбин и выдерживается в пределах всего склона. Поэтому мозаичный склон в целом может быть назван геохорой. Оговоримся, что мы не привязываем этот термин к конкретному иерархическому рангу и не выделяем, как В.Б. Сочава и Э. Нееф, наногеохоры, микрогеохоры и т.д., которые были бы сопоставимы с фациями, урочищами и т.д. Ранг выявляется на основании наличия межкомпонентной связи и выражается через установленный размер геохоры.

В нашем исследовании линейные размеры скользящего квадрата варьировали от 270 до 1890 м с шагом 180 м. Методом информационных мер установлены иерархические уровни форм рельефа. Метод основан на поиске размера скользящего квадрата, при котором достигается максимальная разность между максимумом и минимумом разнообразия Шеннона в заданном пространстве, как описано в разделе 3.2.3 (Хорошев, Алещенко, 2008). Для дальнейшего анализа выбраны гипотетические геомеры с линейными размерами 450, 990 и 1890 м как наиболее близкие к выявленным уровням.

Если коэффициент детерминации уравнения велик (нами принят критерий - описание более 40% варьирования), то считалось возможным говорить о существовании гетерогенной парагенетической системы, объединяющей вмещающие геомеры.

Подобный расчет ведется многократно для ряда ареалов («Г» на рис. 60) возрастающего размера от 270 до 1890 м с шагом 180 м. Серия полученных моделей сравнивается по коэффициенту детерминации с учетом степени статистической достоверности. Если при увеличении размера ареала до некоторой величины происходит «растворение связи» (т.е. снижение коэффициента детерминации до недостоверных значений), то в данном

ареале не существует единого правила, связывающего свойства геомеров и подчиненные им ОТЕ. Тогда ареал предшествующего размера можно считать максимальным размером парагенетической геохоры. Интерпретация предлагается следующая: за пределами парагенетической геохоры рельеф окрестности не создает каких-либо рамочных условий для растительного покрова ОТЕ, то есть невозможно говорить о существовании вмещающей геосистемы — геомера. Тогда делается предположение, что состояние растительного покрова ОТЕ зависит каким-либо образом от рельефа некоторой другой окрестности, которую мы ищем, повторяя расчет для другого размера окрестности.

Существование парагенетической геохоры рассматривается как признак равновесных отношений между растительным покровом и рельефом. Иначе говоря, в каждой ОТЕ растительность адаптирована к условиям, созданным рельефом, подчиняясь единому правилу, действующему в пределах данной геохоры.

Если выявляются участки территории, на которых варьирование фактора дифференциации растительного покрова не объясняется рельефом ни одной окрестности, то следует вывод о неравновесных отношениях. Это означает, что растительный покров имеет свойства нетипичные при подобных характеристиках рельефа. Это интерпретируется как принадлежность к иному факторально-динамическому ряду (например, обусловленном различиями горных пород).

В качестве зависимых переменных использовались значения факторов дифференциации растительного покрова по космоснимку Landsat от 23.09.2001.

Для решения задачи поставлены 6 последовательных вопросов. Ниже демонстрируются ответы на каждый из них.

Вопрос 1. Какие ландшафтные факторы контролируют пространственную дифференциацию растительного покрова и каково соотношение вкладов факторов в его варьирование? Пространственная дифференциация растительного покрова на 98% определяется четырьмя взаимонезависимыми факторами, выделенными методом главных компонент на основании многоканальной съемки Landsat. Фактор 1 интерпретируется как варьирование свойств растительного покрова в зависимости от влажности местообитания на основании высоких корреляций с индексом влажности (NSWI), индексом продуктивности (NDVI), индексами содержания железа и оксидов железа в почвах. В условиях дефицитного увлажнения степных ландшафтов продуктивность травостоя в решающей степени определяется условиями увлажнения. В условиях Айтуарской степи ареалы повышенной продуктивности связаны с днищами балок и лощин и местами склоновой разгрузки подземных вод. Корреляция с индексом влажности, рассчитанным по цифровой модели рельефа, при этом невелика (–0,16). Это объясняется тем, что ЦМР предсказывает высокие значения влажности только в ложбинах и днищах балок, в то время как ксеромезофитные фитоценозы (то есть отличающиеся от плакорных ксерофитных в сторону большей влажности) могут формироваться также и на слабовогнутых участках склона на контакте пластов осадочных пород. Значения фактора 1 (ниже — «фактор влажности») максимальны в ПТК с наиболее ксерофитными степными фитоценозами на скалистых гребнях и куполообразных вершинах, минимален — в тальвегах балок и лощин с луговыми травяно-кустарниковыми сообществами и колками. Фактор 2 интерпретируется как степень влияния каменистого субстрата на состояние фитоценоза и степень его петрофитности. Максимальные значения достигаются в осыпных крутосклонных урочищах и на гребнях с несомкнутым растительным покровом, минимальные — в плоских или пологонаклон-

ных урочищах с максимальным проективным покрытием и близким соответствием видового состава зональной норме типичной степи. Фактор 3 интерпретируется как варьирование свойств растительного покрова в зависимости от экспозиции склонов глубоковрезанных основных балок. Четко, практически по линиям водоразделов между балками, различаются западные более каменистые (минимальные значения фактора) и восточные, как правило, лучше задернованные склоны (максимальные значения). Экспозиционные различия связаны не столько с уровнем поступления солнечной радиации (коэффициент корреляции с показателем радиации, рассчитанным по цифровой модели рельефа, — 0,05), сколько с различием ландшафтной структуры структурных менее крутых (в основном восточных) и аструктурных более крутых (в основном западных) склонов. В некоторых случаях низкие значения фактора характерны и для восточных экспозиций, но в пределах урочищ крупных выходов известняков в бассейне балки Карагашты (массив Жуванаадыр). На структурных склонах крутизной около 10º при любой солярной экспозиции (чаще это восточные склоны) присутствуют разнотравно-злаковые, чаще всего шерстистогрудницево-залесскоковыльные сообщества, с относительно небольшой долей петрофитных видов. Каменистость поверхности на таких склонах составляет 25–30%. На таких склонах только при крутизне более 20º каменистость возрастает и появляются петрофитноразнотравные сообщества. На аструктурных западных склонах при крутизне 7–10º встречаются петрофитноразнотравно-залесскоковыльные степи, каменистость достигает 40%. В некоторых случаях, когда падение пластов геологических пород согласно падению склона, но пласты всё равно выходят на поверхность, такие же сообщества можно встретить на склонах крутизной до 15º. При крутизне аструктурных склонов более 15–20º везде преобладают сообщества злаково-петрофитноразнотравные и петрофитноразнотравные. При крутизне около 20º каменистость составляет 50–60%, при крутизне 30–35º — 80–90%.

Вопрос 2. Равновесен (адаптирован) ли растительный покров по отношению к рельефу в ландшафтном масштабе? Иначе говоря, существует ли единое для всей территории правило, по которому можно описать варьирование свойств растительного покрова морфометрическими свойствами рельефа?

Оценка зависимости факторов дифференциации растительного покрова от рельефа в ландшафтном масштабе, проведена с включением в модель всего массива данных Айтуарской степи (10082 пиксела, общая площадь 81,7 км^2). Оценка для локального масштаба проведена с включением в модель данных в скользящем квадрате переменного размера от 270 до 1890 м с шагом 180 м.

Коэффициенты детерминации линейных уравнений ландшафтного масштаба для разных окрестностей невелики. Для наиболее значимого 1-го фактора уравнение описывает от 6 до 9% дисперсии, для 2 фактора — от 14 до 18%, для 3 фактора — от 3 до 9%, для 4 фактора — от 5 до 8%. Отсюда следует вывод, что единое линейное правило зависимости растительности от рельефа практически не выражено. В ландшафтном масштабе отношения в основном неравновесны. Однако, сравнение с результатами нелинейного регрессионного моделирования (уравнение 2-й степени) показывает приращение доли описанной дисперсии для большинства окрестностей: для 1-го фактора до 11%, для 2 фактора — до 20%, для 3 фактора — до 11%, для 4 фактора — до 9%. Иначе говоря, в отношениях ОТЕ и вмещающего геомера есть нелинейная составляющая, хотя и очень небольшая.

На территории Айтуарской степи характерны различия морфологической структуры ландшафта. Поэтому произведен перерасчет уравнений с включением только того сек-

тора, для которого наблюдается относительно регулярное чередование крупных балок и увалов, расчлененных поперечными лощинами. Для этого сектора также характерно однородное геологическое строение с регулярным чередованием субвертикально запрокинутых пластов песчаников, алевролитов, аргиллитов, известняков и конгломератов (ниже – «балочный сектор»). Таким способом проверяется гипотеза о том, что при регулярной структуре рельефа приоритетные (резонансные) уровни реализации межкомпонентных связей выражены ярче, чем при нерегулярной. В сущности, проверяется гипотеза о лучшей выраженности резонансных уровней при меньшем ландшафтном разнообразии. При таком варианте расчета из него исключены: остаточная эоценовая поверхность выравнивания плато Актобе со слаборасчененным рельефом, балка Тышкак с мелкосопочным рельефом вулканического происхождения в днище и междуречье балок Акбулак и Карагашты.

Оценка межкомпонентных связей в системе «рельеф – растительный покров» при меньшем уровне ландшафтного разнообразия в балочном секторе показала следующее изменение результатов. Для фактора 3 четко обозначился резонансный уровень реализации межкомпонентных связей. Свойства растительного покрова, чувствительные к экспозиции склонов, определяются в основном морфометрическими характеристиками геомера с линейными размерами 450 м. При увеличении гипотетического размера вмещающих геомеров от 450 до 1890 м коэффициент детерминации заметно монотонно уменьшается. Это означает, что на ландшафтном уровне связь «размывается» ввиду вероятного существования за пределами балочного сектора зависимости иного вида либо отсутствия таковой. Для 1-го фактора (чувствительность к влажности) переход к более низкому уровню ландшафтного разнообразия никак не повлиял на оценку связей (очень слабых), что доказывает единство типа зависимости для всего ландшафта, преимущественно между свойствами ОТЕ и геомерами с линейными размерами 1890 м. Для 2-го фактора (петрофитность) произошло снижение коэффициентов детерминации, но с сохранением пикового значения для геомеров с размерами 450 м. Таким образом выявляется разномасштабность действия факторов. Варьирование свойств растительного покрова зависит, во-первых от единого для всего ландшафта процесса перераспределения влаги по макроформам рельефа; во-вторых, локальными контрастами петрофитности между глубокорасчлененным и слаборасчлененным секторами ландшафта; в-третьих, — экспозиционными контрастами балочной группы местностей.

Таким образом, на основании невысоких коэффициентов детерминации следует констатировать, что *на ландшафтном уровне растительный покров неравновесен по отношению к рельефу вмещающих геомеров*. Полученный результат заставляет проверять гипотезу о значимости иного, более низкого, иерархического уровня ландшафтной организации. Эта задача решается построением регрессионных уравнений для более узких ареалов в скользящем квадрате, что позволит проверить гипотезу о локальном масштабе взаимодействия растительного покрова и рельефа.

Для проверки гипотезы о существовании локального уровня зависимости дальнейшие расчеты проводились для трех гипотетических геомеров: с линейными размерами 450, 990 и 1890 м.

Окрестность 450 м выбрана для проверки гипотезы об узколокальном характере взаимодействия растительного покрова с рельефом, сопоставимым с размерами локальных междуречий между лощинами, спускающимися в днища балок. Согласно информационной мере разнообразия рельефа окрестность 450 м оптимальна для вы-

деления форм рельефа, отличающихся по абсолютной высоте не менее, чем на 6 м, что позволяет различать лощины и ложбины практически на любом их отрезке, начиная от водосборного понижения. Согласно линейной моделей для ландшафтного масштаба и нелинейной модели для балочной группы местностей, эта окрестность оптимальна для описания варьирования свойств растительного покрова, чувствительных к петрофитности и экспозиции (2-й и 3-й факторы). Геомеры с линейными размерами 450 м отражают чисто эрозионное расчленение ландшафта. Выделяются индивидуальные лощины с примыкающими склонами и разделяющие их гряды, отрезки распадков с разным падением водотока, участки склонов и их подножий с различными уклонами.

Окрестность 990 м, согласно информационной мере разнообразия рельефа, оптимальна для выделения форм рельефа, отличающихся по абсолютной высоте не менее чем на 20 м, что сопоставимо с глубиной тектонически обусловленных наиболее глубоковрезанных участков лощин. Эта окрестность также оптимальная для описания варьирования 4-го фактора. Разнообразие геомеров, выделенных по значениям морфометрических характеристик в этой окрестности, отражает ярусность грядово-балочного рельефа по соотношению рассеяния и аккумуляции вещества. Различаются: а) привершинные выпуклые неглубокорасчлененные крутосклонные части гряд с разнонаправленным интенсивным рассеянием стока; б) вершины и привершинные пологие части гряд с ослабленным рассеянием стока; в) выпуклые участки склонов с разнонаправленным интенсивным рассеянием стока; г) прямые участки склонов с односторонним транзитом стока; д) вогнутые нижние части склонов с днищами крупных лощин с преобладанием аккумулятивных процессов; е) слабоволнистые поверхности выравнивания без выраженной латеральной миграции вещества; ж) расширенные отрезки днищ крупных балок с наложенными делювиальными шлейфами и преобладанием аккумуляции. Хорошо различаются структурные и аструктурные склоны гряд. Распознаются полосы разгрузки грунтовых вод и верховий малых лощин вдоль склонов. При таком членении территории различаются не индивидуальные эрозионные формы и разделяющие их гребни, а их закономерные сочетания, сходные по глубине расчленения и характеристикам выпуклых и вогнутых форм, иначе говоря — группы урочищ.

Окрестность 1890 м представляет гипотетически максимальный размер геомера, сопоставимый с размерами характерного для территории цикла чередования крупнейших балок и увалов. К этому уровню согласно нелинейной модели ландшафтного масштаба повышенной чувствительностью обладает 1-й фактор. Членение ландшафта на геомеры такого размера отражает наличие секторов с преобладанием склонов одинаковой крутизны, что объясняется разной интенсивностью эрозионно-денудационного расчленения исходной эоценовой поверхности выравнивания. Выделяются крупнейшие гряды, балки, скопления эрозионных форм осевой зоны синклинальных складок, эоценовая поверхность выравнивания. Индивидуальные ложбины, лощины и распадки не выделяются.

Вопрос 3. Существует ли предпочтительный размер геомера, морфометрические параметры которого задают константы (рамочные условия) для свойств ОТЕ?

Задача решается сравнением коэффициентов детерминации уравнений связи «Растительность ОТЕ = F (Рельеф вмещающего геомера)» при условии $p<0,05$ для регрессионного уравнения. Критерием считается существование ярко выраженного пикового

значения коэффициента детерминации для одной из окрестностей (одного из гипотетических размеров вмещающего геомера) по сравнению с другими окрестностями. (Напомним, что аналогичным способом в разделе 4.4 выделялось резонансное пространство межуровневых связей, с той разницей, что только рельеф был охарактеризован в каждом пикселе, а фитоценозы и почвы — лишь в ограниченном количестве пикселов.) Тогда растительный покров ОТЕ формируется в зависимости от сочетания форм рельефа данной окрестности, причем эта зависимость более или менее универсальна для всего ландшафта Айтуарской степи.

Для трех основных факторов наблюдаются различия коэффициентов детерминации для окрестностей разного размера. Однако пиковые значения отличаются превышением доли описанного варьирования по сравнению с другими окрестностями всего на несколько процентов, что не позволяет однозначно утверждать о существовании основного предпочтительного размера геомера. В то же время для всех трех факторов имеет место монотонное снижение коэффициента детерминации по мере роста отличия размера окрестности от окрестности с пиковым значением.

Для 1-го фактора (влажности местообитания) коэффициент детерминации уравнения «Растительность ОТЕ = F (Рельеф вмещающего геомера)» монотонно возрастает от 0,08 до 0,11 при увеличении размера гипотетического вмещающего геомера от 270 до 1890 м. Следовательно, в ландшафтном масштабе существует общее правило, связывающее увлажненность ОТЕ (примерно фации) со свойствами геомера с линейными размерами около 1890 м. Можно осторожно (из-за невысокого значения коэффициента) утверждать, что иерархический уровень геомеров с размерами 1890 м в пределах парагенетической геохоры ландшафта Айтуарской степи существует с большей вероятностью, чем с геомеры меньшими размерами. Такие геомеры сопоставимы с крупными увалами или их частями, различными по степени эрозионно-денудационного расчленения относительно исходной эоценовой поверхности выравнивания, что обычно обусловлено разной устойчивостью субвертикально запрокинутых пластов осадочных пород (известняков, конгломератом, песчаников, аргиллитов). Однако, невысокое значение коэффициента детерминации (11% варьирования) указывает на возможность сильного локального варьирования типов зависимости, то есть разной меры чувствительности растительности к параметрам рельефа на разных участках ландшафта.

Для 2-го фактора наибольшее значении коэффициента детерминации в ландшафтном масштабе установлено, наоборот, для ближних окрестностей ОТЕ 270–450 м (20% варьирования).

Для 3-го фактора максимальное, хотя и весьма низкое (11% варьирования), но статистически достоверное, значение коэффициента детерминации выявлено в окрестности 450–630 м. Таким образом, предполагается более локальный масштаб зависимости, чем ландшафтный. Таким образом, для всех трех ведущих факторов требуется проверка гипотезы о том, что тесные связи могут проявляться на небольших участках территории; причем вид связи может варьировать настолько, что в ландшафтном масштабе связь «размывается», т.е. отсутствует единое правило. Следующей задачей является определение размера таких участков, которые интерпретируются как парагенетические геохоры с общностью причины пространственной мозаичности.

Вопрос 4. В ареале (геохоре) какого размера может проявляться закономерная связь растительного покрова ОТЕ с рельефом вмещающих геомеров?

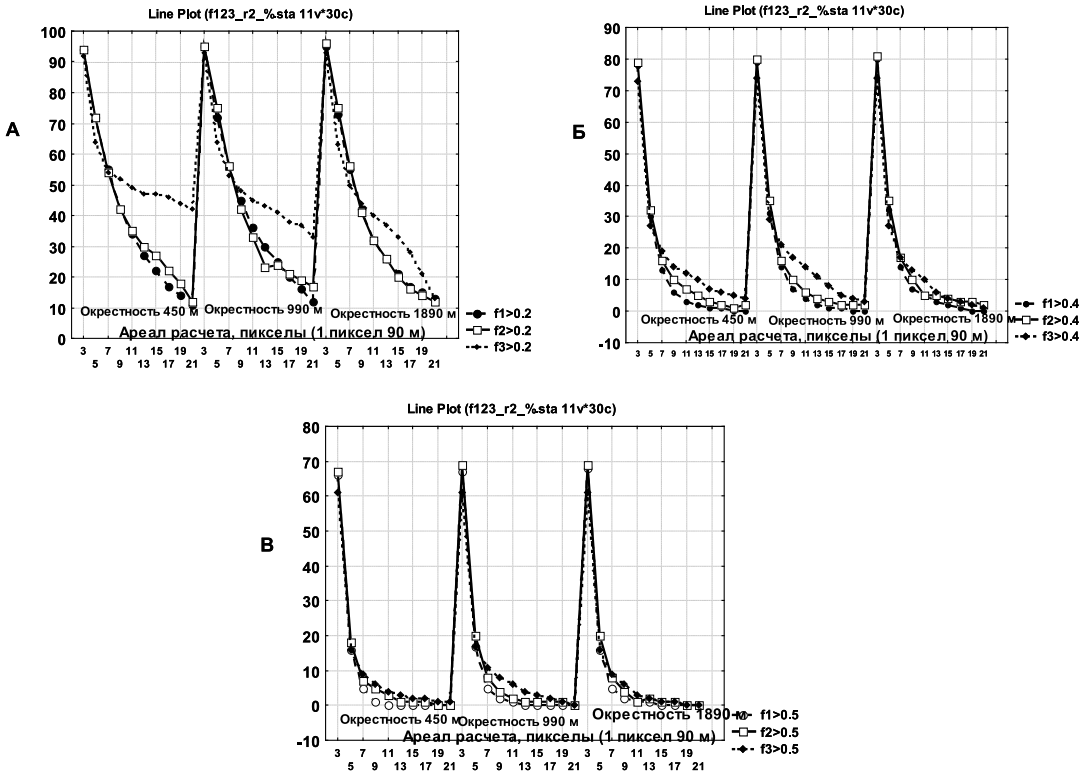

Рис. 61. Доля площади, для которой существуют геохоры с единым правилом связи между свойствами фитоценоза и рельефа окрестностей (Айтуарская степь).
Доля территории, на которой фактор дифференциации растительности по снимку 2009 г. описывается морфометрическими характеристиками рельефа окрестностей. А — коэффициент детерминации мультирегрессионного уравнения более 0,2. Б — то же, более 0,4. В — то же, более 0,5.

Критерием считается доля площади, для которой существуют геохоры с высоким значением коэффициента детерминации. Задача решается последовательным сравнением коэффициента детерминации уравнения при меняющемся размере ареала (квадрата), в котором производится расчет зависимости свойств ОТЕ от свойств вмещающих геомеров. При решении этой задачи сравниваются комбинации двух параметров (рис. 60): 1) окрестности, свойства которой приняты как характеристики геомера, определяющие состояние ОТЕ (450, 990 и 1890 м), 2) ареала, в котором производится расчет уравнения - размеры геохоры с единым типом отношений между растительностью и рельефом (линейные размеры квадрата от 270 до 1890 м с шагом 180 м). Для каждой комбинации двух параметров рассчитаны площадь территории, на которой уравнение описывает более 20, 40, 50, 60% варьирования растительного покрова (рис. 61).

Наиболее значимый 1-й фактор дифференциации растительного покрова в наименьшей степени определяется рельефом, по сравнению с 2-м и 3-м по значимости фак-

торами. Типичные размеры вмещающей геосистемы однозначно не выявляются. В малых геохорах (270–630 м) увлажненность местообитания несколько лучше описывается рельефом окрестности 990 м. Если принять 990 м как средние размеры вмещающей геосистемы, то эта величина сопоставима со средним расстоянием между тальвегами основных шести балок. Однотипная зависимость между значениями фактора и рельефом вмещающих геосистем (рельефом окрестностей) может выдерживаться на основной части территории в ареале, как правило, не более 630–810 м в поперечнике. Эта величина интерпретируется как типичные размеры парагенетической геохоры. Только в бассейне балки Камысай возможны более крупные размеры геохоры с однотипной зависимостью влажности и продуктивности местообитания от параметров вмещающего геомера. Так, при размере гипотетического вмещающего геомера 450 м зависимость с коэффициентом детерминации более 0,6 проявляется при максимальном размере геохоры 810 м, а с коэффициентом детерминации более 0,4 — при максимальном размере 1350 м. Но если принять гипотезу, что вмещающий геомер имеет размеры 990 м, то зависимость с коэффициентом детерминации более 0,6 проявляется местами, на междуречье Камысай–Тышкак, при максимальном размере геохоры уже 1170 м, а с коэффициентом детерминации более 0,4 — при максимальном размере 1890 м. При гипотетическом размере геомера 1890 м соответствующие цифры — 990 м и 1710 м. Таким образом, можно констатировать частую смену в пространстве типов зависимости увлажнения от рельефа. Однако в восточном секторе ландшафта парагенетические геохоры, контролирующие вариации влажности и объединяющие геомеры с размерами 990 и 1890 м, имеют более крупные размеры. Исключительность бассейна балки Камысай отражает, по всей видимости, положение ее в пределах единой антиклинальной складки, края которой соответствуют водоразделам между балками Камысай и Тышкак с одной стороны, Шинбутак и Сарткарагашты — с другой. Система миграции влаги здесь, видимо, более простая, чем в западном секторе к западу от балки Шинбутак. В последнем четко преобладают субвертикально запрокинутые пласты одной ориентации с варьирующим падением, которые создают серию разновысотных гребней. Разрывные нарушения в западном секторе образуют более сложный рисунок, чем в восточном, с более глубокими и сложно изогнутыми в плане субширотными распадками и лощинами. Поэтому отдельные локальные участки сильно отличаются по типам отношений между влажностью и рельефом. Иначе говоря, парагенетические системы с закономерным варьированием влажности в зависимости от рельефа имеют малые размеры.

Связь 3-го фактора с параметрами рельефа интуитивно очевидна и подтверждается расчетами. 3-й фактор на существенно большей площади, чем 1-й и 2-й, включен в парагенетические геохоры с согласованным варьированием с параметрами расчлененности рельефа. При размере окрестности 990 м 3-й фактор варьирует согласованно с рельефом на существенно большей территории, чем при гипотетических размерах вмещающих геомеров 450 и 1890 м. Эта закономерность еще более ярко проявляется, если сравнивать площади, охваченные геохорами с коэффициентом детерминации уравнения «Фитоценоз = F(Рельеф)» более 0,4 и более 0,2. Суммарная площадь геохор с коэффициентами детерминации более 0,2 для 3-го фактора примерно в 2–3 раза больше, чем для 1-го и 2-го, причем разница тем больше, чем больше размер гипотетической геохоры. Максимальная разница в 3,5 раза, по сравнению с фактором 2, достигается при размере геохоры 1890 м и в 3,8 раза — по сравнению с 1-м фактором.

На территории существуют геохоры с размерами до 1530 м, в которых более 60% варьирования значений 3-го фактора описывается морфометрическими характеристиками рельефа геомеров с размерами 450 и 990 м. Таких размеров геохоры, в которых более 60% варьирования значений факторов 1 и 2 описывается морфометрическими характеристиками рельефа, не достигают.

Вопрос 5. Проявляется ли на территории полимасштабность межкомпонентных отношений, то есть одновременная подчиненность свойств ОТЕ процессам одной природы, но нескольких иерархических уровней?

Полимасштабность межкомпонентных отношений устанавливается по наличию достоверных связей между свойствами одного компонента, измеренными для ОТЕ, и свойствами другого компонента, оцененным для нескольких уровней вмещающих геосистем. В нашем случае для выявления приоритетных масштабов применяется варьирование размеров территории, для которой рассчитываются морфометрические показатели рельефа.

Задача решается сравнением площадей, которые занимают геохоры разных размеров при гипотетических размерах вмещающих геомеров 450, 990 и 1890 м. Критерием существования иерархического уровня межкомпонентных отношений считается:

1. Резкий перелом кривой зависимости доли площади геохор от линейного размера гипотетической квадратной геохоры.
2. Превышение суммарной площади геохор, в которые объединяются геомеры данного размера, по сравнению с гипотетическими геохорами для геомеров других размеров.

Установлено, что для 1-го фактора геомеры размером 990 м могут объединяться в геохоры большего размера (до 2250 м), чем геомеры размером 450 и 1890 м (рис. 61). Иначе говоря, каждая ОТЕ, зависимая от геомера с линейными размерами 990 м, включена в квадратный ареал со стороной до 2250 м, где все ОТЕ зависят от вмещающих геомеров одинаковым образом.

Каждая ОТЕ, зависимая от геомера с линейными размерами 1890 м, включена в квадратный ареал со стороной 3690 м, где все ОТЕ зависят от вмещающих геомеров одинаковым образом. На существование значимого геомеров с линейным размером 1890 м указывает также максимальное значение коэффициента детерминации для этой окрестности при расчете с включением всего массива данных Айтуарской степи.

Для 2-го фактора установлены два приоритетных уровня пространственной дифференциации: 1) геомеры с линейным размером 450 м, объединенные в геохоры с линейными размерами 1170 м; 2) геомеры с линейным размером 990 м, объединенные в геохоры с линейными размерами до 2790 м.

Для 3-го фактора установлены приоритетные уровни пространственной дифференциации: 1) геомеры с линейным размером 990 м, объединенные в геохоры с линейными размерами до 2250 м; 2) геомеры с линейным размером 450 м, объединенные в геохоры с линейными размерами до 2250 м.

Вопрос 6. Каковы наиболее типичные причины неравновесности растительного покрова по отношению к рельефу и отсутствия зависимости даже в узколокальном масштабе?

За основной критерий для выявления участков неравновесности растительного покрова по отношению к рельефу приняты большие по модулю значения остатков уравнений «Растительность = F(Рельеф)». Локализация максимальных остатков показывает

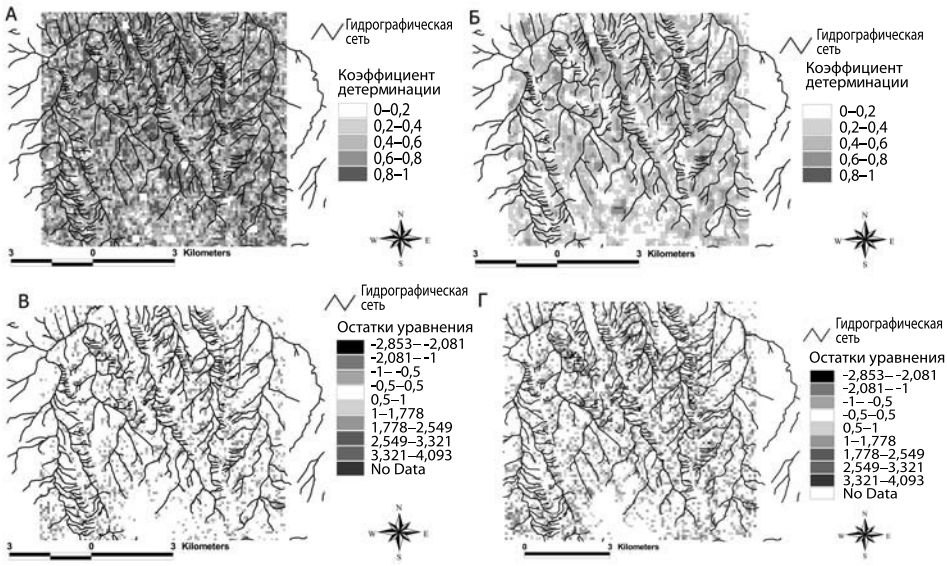

Рис. 62. Коэффициенты детерминации (А, Б) и остатки (В, Г) линейного уравнения зависимости свойств фитоценоза Айтуарской степи от рельефа окрестностей.
Зависимая переменная — 1-й фактор дифференциации растительного покрова (влажность), независимые переменные — 4 морфометрические показателя рельефа в квадратной окрестности с линейным размером 450 м. Окрестность расчета: 270 м (А, В), 450 м (Б, Г).

участки, где растительный покров не описываются статистическими регрессионными моделями для заданных окрестностей. Это означает, что растительный покров имеет свойства, нетипичные для данных условий рельефа в данном ландшафте. Например, доля влаголюбивых видов в травостое значительно превышает значение, прогнозируемое для данных условий рельефа на основании сопоставления с аналогичными позициями в рельефе.

Поскольку ранее установлено, что ведущий фактор дифференциации растительного покрова равновесен по отношению к рельефу только в локальной окрестности, наибольший интерес привлекает распределение в ландшафте остатков от регрессионной модели, построенной для окрестностей 270–450 м (рис. 62). Зависимость фактора влажности от рельефа данных окрестностей описывается с высокими коэффициентами детерминации до 0,6–0,8, что отражает перераспределение влаги между локальными гребнями, склонами и боковыми лощинами основных балок.

Остатки уравнений, как для окрестности 270 м, так и окрестности 450 м, достаточно четко локализованы в нескольких видах урочищ.

Во-первых, неравновесность свойств растительного покрова, чувствительных к влажности, по отношению к рельефу проявляется в глубоковрезанных отрезках лощин практически всех увалов. Это связано с сочетанием трех процессов — притока поверхностных вод, скопления снега с последующим таянием и разгрузки подземных вод. Из трех процессов только первый более или менее прямо зависит от рельефа. Накопление снега — одно-

го из главных источников увлажнения степных почв — в затененных глубоких лощинах обусловлено не только рельефом, но и ветровым переносом. По той же причине, видимо, неравновесность характерна для водосборных понижений. Разгрузка подземных вод определяется не только рельефом, но трещиноватостью и падением пластов осадочных пород.

Во-вторых, неравновесность проявляется в пределах куполообразного известнякового массива Жуванаадыр. В отличие от других куполообразных вершин и гребней здесь нет пестрого чередования пластов песчаников, конгломератов и известняков, которое могло бы сгладить значение литологического фактора формирования ландшафта. Господство известняковых пластов способствует отклонению свойств растительного покрова от типичных значений для аналогичных форм рельефа. Характерно, что растительный покров массива Жуванаадыр независим от любых сочетаний форм рельефа, описываемых морфометрическими свойствами окрестностей с линейными размерами от 270 до 1890 м.

В-третьих, неравновесность свойственна осыпным участкам крутых склонов. Осыпи занимают меньшее пространство, чем аналогичные по морфометрическим свойствам крутые склоны с сомкнутым растительным покровом. По этой причине они выделяются как отклонение от типичной для ландшафта зависимости.

В-четвертых, неравновесность проявляется для нижней части бассейна балки Сарткарагашты. Система циркуляции поверхностных и подземных вод обладает большим своеобразием по сравнению с остальными балками — веерообразным рисунком гребней и лощин, изогнутостью эрозионных форм, увеличенными размерами боковых гребней. Участок расположен в пределах осевой зоны синклинальной складки, заключенной между балками Камысай и Шинбутак, но в приподнятой и глубокорасчлененной ее южной части.

Таким образом, для степного ландшафта получены следующие основные выводы.

1. Основной фактор дифференциации растительного покрова – перераспределение влаги.
2. В ландшафтном масштабе нет единого типа линейной зависимости между растительным покровом и рельефом.
3. Вклад нелинейной составляющей в отношения растительного покрова и рельефа вмещающих геомеров невелик, но достоверен.
4. Для свойств растительного покрова, чувствительных к каменистости почв, в ландшафтном масштабе существует более или менее единый тип нелинейной зависимости от свойств рельефа вмещающих геомеров. Это выражается в приближении доли описанного варьирования для некоторых окрестностей к половине.
5. Наличие локально сильных связей при слабости связей в ландшафтном масштабе свидетельствует о сильном варьировании в пространстве типов межкомпонентных отношений.
6. Растительный покров чувствителен к перераспределению влаги в основном на локальном уровне, но до некоторой степени проявляется также зависимость от ландшафтного уровня с сильным варьированием типов отношений в пространстве.
7. Характер залегания складок осадочных пород существенно влияет на степень равновесности растительного покрова по отношению к морфолитогенной основе. Наибольшая степень равновесности характерна для бортов антиклинальной складки в восточном секторе, наименьшая – для параллельных гряд с моноклинальными пластами в западном секторе.

8. Неравновесность растительного покрова по отношению к формам рельефа проявляется в осевой зоне синклинальной складки, на известняковых куполах, в наиболее глубоковрезанных отрезках крутосклонных лощин. Для этих участков требуется проверка гипотезы о нелинейности отношений.
9. Экспозиционная петрофитность растительного покрова контролируется формами рельефа с линейными размерами 990 м.
10. Максимальные размеры парагенетических геохор с единым типом межкомпонентных отношений характерны для связи фактора экспозиционной петрофитности с рельефом в окрестности 990 м.
11. При нерегулярной структуре рельефа резонансные уровни межкомпонентных отношений выражены слабее, чем при регулярной. Существенной разницы между силой связей в системе «Рельеф – Растительный покров» для ландшафтного масштаба нет.

4.7. Временные рамки действия межкомпонентных связей. Варьирование межкомпонентных связей в зависимости от сукцессионной стадии

Получив знание о значимых внутриуровенных и межуровневых связях, необходимо определить рамки применимости выявленных закономерностей как в пространстве, так и во времени. Способ определения пространственных рамок действия межкомпонентных связей методом остатков показан в разделе 4.6. Теперь перейдем к определению временных рамок действия межкомпонентных связей.

Если считать одной из основных фундаментальных задач ландшафтоведения прогноз цепных реакций между компонентами ландшафта, то неизбежно встает вопрос о временных рамках прогнозирования. Для этого необходимо определить, существуют ли универсальные законы межкомпонентных связей или же факт наличия связей, их тип меняются в зависимости от стадии развития ландшафта. Наиболее интересен вопрос: *существуют ли стадии развития ландшафта, для которых характерно усиление или ослабление взаимозависимости компонентов на том или ином иерархическом уровне и между иерархическими уровнями* (рамочные условия вмещающей геосистемы). Эволюционирует ли ландшафт в сторону усиления или ослабления детерминирующей роли морфолитогенной матрицы? Оправдывается ли представление теоретической экологии о стремлении растительных сообществ к минимизации зависимости от абиотической среды и повышению замкнутости биологического круговорота?

Практическая значимость ответов на эти вопросы очевидна на примере планирования лесного хозяйства. Для планирования лесохозяйственных мероприятий важно знать, в какой степени наблюдаемое состояние лесного сообщества отражает типы лесорастительных условий (ТЛУ). Известно, что на ранних сукцессионных стадиях видовой состав сообщества может вводить в заблуждение относительно почвенных и гидрологических условий, корректная оценка которых необходима для определения целевой породы, технологий лесозаготовок и лесовосстановления. Приведем несколько простых примеров. Обилие малины и других нитрофильных видов на недавней вырубке необязательно свидетельствует об исходном богатстве почв. Развитие долгомошно-сфагнового покрова необязательно свидетельствует о постоянно высоком уровне

грунтовых вод и может иметь временный характер: заболачивание вскоре после рубки за счет сокращения биологического испарения и разболачивание на стадии максимальной транспирации вторичных мелколиственных пород в возрасте 30–40 лет (Крестовский, 1986). Преобладание чернично-зеленомошного напочвенного покрова под средневозрастными и приспевающими мелколиственными лесами может охватывать некоторый диапазон гигротопов, который отличается от диапазона распространения таких сообществ в коренных лесах. Широкое распространение сосняков необязательно индицирует бедность пород, диктующую выбор сосны как целевой породы, поскольку это часто является следствием лесных пожаров, в отсутствие которых преимущество получает более мезотрофная порода ель.

Автор поставил задачу установить степень зависимости тесноты межкомпонентных связей от стадии развития ландшафта на примере восстановительных сукцессий древостоя в лесной зоне. Для ее решения составлены разномасштабные модели межкомпонентных связей, позволяющие проверить следующие гипотезы: а) об усилении или ослаблении зависимости растительного покрова от абиотических (механический состав почвообразующих отложений) и биокосных условий (набор, мощность и цветовые характеристики почвенных горизонтов) в ходе восстановительной сукцессии, б) об усилении или ослаблении внутрифитоценотических (межъярусных) взаимодействий. Параллельно проверялись гипотезы о сокращении или расширении характерного пространства связи растительного покрова с абиотическими условиями окрестностей (вмещающей геосистемы более высокого ранга) в ходе восстановительной сукцессии. За границу между ранней и средней стадией развития лесного фитоценоза условно принимался возраст древостоя 40 или 50 лет (в зависимости от региона), за границу между средней и поздней стадиями — 60, 65 или 70 лет. Основной мотив выбора возрастных границ в каждом регионе — обеспечения примерно одинакового размера массивов данных для всех трех стадий — по 55–65 наблюдений.

Поставленная задача решалась несколькими способами.

Во-первых, для выявления самой общей закономерности методом канонического корреляционного анализа оценивались связи между группами осей, характеризующими ярусы фитоценоза и группы свойств почв (по четыре оси для каждой группы).

Во-вторых, для каждой из трех стадий рассчитывались непараметрические коэффициенты корреляции Спирмена попарно между конкретными осями дифференциации и сравнивалось количество достоверных связей.

В-третьих, для каждой оси дифференциации свойств строилась серия мультирегрессионных моделей 2-й степени, отражающих связи со свойствами рельефа гипотетических вмещающих геосистем.

В-четвертых, для первостепенных осей дифференциации древостоя строились мультирегрессионные модели их связи с группами свойств почвенного профиля (мощности горизонтов, цвет горизонтов, механический состав отложений), чтобы оценить изменения чувствительности древесного яруса к группам почвенных процессов в ходе сукцессии.

В-пятых, строились схемы плеяд связей между свойствами: из всей совокупности значимых для данного свойства связей на схему наносилась наибольшая по модулю, что близко к методу вроцлавской таксономии (Топчиев, 1988). В случае, когда связи с двумя или более свойствами характеризовались очень близкими по модулю коэффи-

циентами (разница в пределах 0,01–0,03), на схему наносились все эти связи. Стрелка на схеме указывает на то свойство, с которым наиболее связано оцениваемое свойство. Если в паре свойств каждое из них является наиболее значимым для второго стрелка направлена в обе стороны. Таким образом, выявлялись ядра плеяд — то есть пары свойств, к которым «тяготеют» остальные свойства.

Канонический корреляционный анализ и матрицы попарных связей. Проверка гипотезы о варьировании состава парциальных геосистем по мере развития лесного фитоценоза на первом шаге проверялась средствами канонического корреляционного анализа. Этот метод позволяет оценивать сопряженность между группами переменных, в данном случае — между совокупностями свойств ярусов, каждый из которых характеризовался четырьмя осями дифференциации. Построение на втором шаге матриц попарных коэффициентов корреляции Спирмена позволяет подсчитать количество достоверных попарных связей и выявить плеяды наиболее взаимосвязанных свойств.

Для среднетаежного ландшафта в Архангельской области гипотеза об устойчивости плеяд проверялась на примере полигона «Заячья» (ландшафтный масштаб, доля заболоченных фаций с мощностью органогенного горизонта более 25 см — 5%) и верифицировалась на данных полигона «Трансект» (местностной масштаб, доля заболоченных фаций с мощностью органогенного горизонта более 25 см — 13%). Общая тенденция изменения взаимоадаптации компонентов оценивалась по количеству достоверных связей, выраженных коэффициентами Спирмена отдельно для внутрифитоценотических и почвенно-фитоценотических связей.

Количество достоверных почвенно-фитоценотических связей в ряду возрастных стадий (ранней, средней, поздней) на полигоне «Заячья» составляет, соответственно 39, 32, 31, а на полигоне «Трансект» — 30, 34, 62. Плеяда, связывающая свойства ярусов фитоценоза с механическим составом почвообразующих отложений, наиболее ярко выражена на стадии молодых и средневозрастных лесов. Видовой состав фитоценоза адаптируется к характеристикам минерального питания и влажности, обусловленным, прежде всего вариациями строения двучленной супесчано-суглинистой толщи. Строение почвенного профиля, видимо, на этой стадии в силу инертности еще носит следы почвообразования, предшествовавшего сведению леса (как правило, — в условиях распашки или существования коренного темнохвойного леса).

На стадии старовозрастных лесов, напротив, связи с механическим составом ослабевают, но более совершенной становится адаптация к морфологическому строению почвенного профиля, выраженному мощностями горизонтов. На взгляд автора, это следствие саморазвития вертикальной структуры ландшафта, когда прошло уже достаточное время для формирования почвенных горизонтов, соответствующих сложившейся структуре фитоценоза и стирания следов предшествовавшего почвообразования. Прежде всего, это касается уменьшения выраженности старопахотного горизонта и роста мощности торфянистого или перегнойного горизонтов. Достоверного роста мощности элювиального горизонта по мере восстановления хвойного леса при этом не обнаружено. Травяный ярус может хорошо адаптироваться к строению почвенного профиля (с коэффициентом канонической корреляции 0,70) раньше других ярусов — уже при возрасте древостоя до 50 лет

Количество достоверных внутрифитоценотических связей для участка «Заячья» на ранней стадии составляет 56, на средней — 56, на поздней — 47, а для участка «Тран-

сект, соответственно 55, 68, 74. Внутрифитоценотические связи между нижними подчиненными ярусами фитоценоза (кустарниковым, кустарничковым и травяным) становятся более тесными после достижения древостоем возраста 70 лет, а в заболоченной местности, обеспеченной трансектными данными — после 50 лет. Если на раннем этапе формирование видового состава этих ярусов происходит относительно независимо друг от друга, преимущественно подчиняясь варьированию почвообразующих отложений, то на поздних — путем ослабления зависимости от отложений и возрастания взаимоадаптации и адаптации к параллельно меняющимся свойствам почвенных горизонтов.

Таким образом, *постепенно формируется парциальная геосистема, объединяющая свойства нижних подчиненных ярусов фитоценоза и почвенный профиль. Одновременно ослабляются связи в парциальной геосистеме, связывающей подчиненные ярусы фитоценоза и свойства почвообразующих отложений*.

Динамику отношений древесного яруса с подчиненными ярусами, судя по двум массивам данных, нельзя оценить однозначно. Для ландшафтного масштаба (полигон «Заячья») парциальная геосистема с подчиненными ярусами возникает, главным образом, на ранней и особенно средней стадии развития (50–70 лет), после чего связи в этой геосистеме ослабевают, и подчиненные ярусы развиваются более независимо от древостоя, за исключением группы видов, чувствительных к трофности. Группа видов, чувствительных к влажности на старовозрастной стадии варьирует в пространстве независимо от свойств древостоя. Для заболоченной местности (полигон «Трансект»), наоборот, адаптивная геосистема возникает на поздней стадии развития после 70 лет и включает в себя помимо полного набора ярусов также и строение почвенного профиля. Однако ослабление адаптации древесного яруса к почвенному профилю на поздней стадии, по сравнению с ранней, для участка «Заячья» следует оценивать как кажущуюся, так как разница в коэффициентах канонической корреляции составляет всего 0,04, в то время как на средней стадии связь существенно слабее. Таким образом, формирование адаптивной геосистемы на поздней стадии скорее следует считать общим правилом, а ее более рыхлую ослабленную структуру на полигоне «Трансект» на ранней стадии — проявлением большей пластичности фитоценоза в заболоченной местности. Ранее (Хорошев, 2002) на примере сравнения межкомпонентных связей на разных участках трансекта нами уже был получен вывод о более строгой взаимодетерминированности биотических и биокосных свойств в дренированных условиях и уменьшении ее в заболоченных.

Обращает на себя внимание разница тенденций в количестве достоверных связей в ландшафтном («Заячья») и местностном («Трансект») масштабе. В ландшафтном масштабе количество достоверных связей (как внутрифитоценотических, так и почвенно-фитоценотических) по мере приближения к старовозрастной стадии уменьшается, а в местностном — увеличивается. Следовательно, высокое ландшафтное разнообразие означает и разнообразие стратегий развития вертикальной структуры геосистем: далеко не во всех местностях ландшафта имеет место тенденция к совершенствованию взаимоадаптации компонентов, выявленная в Гридинской заболоченной местности.

Для южнотаежных ландшафтов Костромской области в целом и отдельно — Кологривского района получены несколько другие результаты. Для Кологривского района количество достоверных парных непараметрических связей (коэффициент Спирмена) между свойствами фитоценоза максимально в молодых лесах до 40 лет (46)

и убывает с возрастом на средней и поздней стадиях сукцессии (соответственно, 29 и 30). Количество связей существенно меньше, чем в средней тайге на всех возрастных стадиях. Количество достоверных парных почвенно-фитоценотических связей в ряду возрастных стадий составляет, соответственно 23, 14, 22.

В областном масштабе количество достоверных парных внутрифитоценотических связей также убывает после ранней стадии: для ряда возрастных стадий до 50 лет, 50–65 лет и более 65 лет — соответственно 57, 34, 39. Количество достоверных парных почвенно-фитоценотических связей в ряду возрастных стадий составляет, соответственно 40, 26, 19.

По результатам канонического корреляционного анализа для Кологривского района установлен рост зависимости видового состава ярусов фитоценоза от механического состава почвообразующих отложений и цветовых характеристик почв по мере развития древостоя, но ослабление зависимости от морфологического строения почвенного профиля. Иначе говоря, получен результат практически противоположный по сравнению со среднетаежным ландшафтом. В областном масштабе более прочные почвенно-фитоценотические связи характерны для раннего этапа. Динамика внутрифитоценотических связей неоднозначна, что свидетельствует о наличии нескольких относительно независимых парциальных геосистем. Так, в масштабе Кологривского района травяный ярус наиболее сопряжен с другими ярусами на ранней и средней стадиях восстановления лесного сообщества, а кустарничковый — на поздней. Моховый ярус на ранней стадии больше сопряжен с кустарниковым и травяным, а на поздней — с древесным и кустарничковым. На средней стадии (40–60 лет) более выражена плеяда «деревья – кустарники – травы», а на поздней «деревья – кустарнички – мхи». В областном масштабе все внутрифитоценотические плеяды ослабевают на позднем этапе. Плеяда «деревья – кустарники – травы – мхи» наиболее прочна на раннем этапе, а «кустарнички – травы – мхи» — на средней.

В зоне хвойно-широколиственных лесов в Удмуртии количество достоверных попарных внутрифитоценотических связей для ряда возрастных стадий до 40 лет, 40–60 лет и более 60 лет возрастает после ранней стадии: соответственно 20, 38, 38. Количество достоверных почвенно-фитоценотических связей в ряду возрастных стадий убывает: соответственно 19, 13. 10. По каноническим коэффициентам корреляции между группами свойств стратегия развития смешаннолесной геосистемы в ходе восстановления лесного сообщества проявляется наиболее чётко по сравнению с другими зонами: коэффициенты связи между свойствами ярусов фитоценоза и группами свойств почв уменьшаются от ранней стадии к поздней. Следовательно, фитоценоз на ранних стадиях развивается сопряженно со свойствами почв, но при приближении к старовозрастной стадии усиливает независимость от внешней среды и внутреннюю прочность структуры.

Мультирегрессионный анализ связей осей дифференциации древостоя между собой и их связей с рельефом вмещающих геосистем. Разумеется, не представляется возможным проанализировать связи между всеми свойствами. Однако применение метода многомерного анализа позволяет ранжировать экологические факторы по вкладу в варьирование. Поэтому анализу подвергались межкомпонентные связи с участием наиболее свойств, чувствительных к наиболее значимым факторам, прежде всего — к трофности и влажности местообитания. Представим полученные результаты для нескольких лесных полигонов (табл. 26).

Таблица. 26.

Зависимость наиболее значимых осей дифференциации древостоя от рельефа вмещающих геосистем и морфологического строения почв при разном возрасте древостоя.
Доля описываемой дисперсии (коэффициенты детерминации * 100) мультирегрессионного уравнения второй степени, в котором зависимая переменная — ось дифференциации древостоя, независимые переменные — морфометрические характеристики рельефа в квадратной окрестности или оси дифференциации мощности почвенных горизонтов.
Жирным курсивом выделены достоверные уравнения. Условные обозначения — см. табл. 6.

Ось дифференциации	Возраст древостоя	Зависимые переменные — морфометрические характеристики рельефа квадратной окрестности							Зависимые переменные — оси дифференциации мощности горизонтов почв
		Сторона квадратной окрестности, м							
		1200	2000	2800	3600	4400	5200	6000	
Архангельская область, среднетаежный ландшафт, полигон «Заячья»									
D1t	<50	24	***46***	28	27			***42***	28
	50–70	30	34	30	***40***			18	13
	>70	19	31	25	***36***			28	17
D3t	<50	**37**	31	***37***	34			23	***52***
	50–70	19	25	19	***40***			22	***39***
	>70	***36***	32	34	33			***48***	***52***
Кологривский район Костромской области, южнотаежный ландшафт									
D1t	<40	18	16	17	23	24	26	27	19
	40-60	25	40	32	31	41	21	28	24
	>60	28	**44**	34	34	***47***	***47***	***48***	***51***
D2t	<40	33	20	18	15	21	33	34	29
	40–60	25	21	27	30	26	35	29	22
	>60	***52***	***43***	39	32	37	28	40	27
Удмуртия, смешаннолесной ландшафт									
D1t	<40	***43***	***50***	***50***	***40***			***65***	***67***
	40–60	29	21	28	27			***54***	***41***
	>60	***52***	***48***	***46***	***51***			***58***	***47***
D2t	<40	28	37	29	36			***45***	***35***
	40–60	29	***38***	***39***	***36***			***43***	***37***
	>60	36	33	45	*51*			***53***	***46***

Хвойно-широколиственнолесной ландшафт в Удмуртии. Соотношение хвойных и широколиственных пород древостоя (1-я ось дифференциации древостоя) зависит от морфологического строения почв (табл. 6). Для ее проверки составлены мультирегрессионные уравнения, в которых зависимой переменной является 1-я ось дифференциации древостоя, а независимыми — четыре оси дифференциации мощности почвенных горизонтов. Уравнения составлены отдельно для каждой из указанных трех стадий сукцессии. Предметом сравнения были коэффициенты детерминации и набор значимых независимых переменных. Оказалось, что зависимость максимальна на ранней стадии сукцессии (до 40 лет), а затем ослабевает на стадии 40–60 лет и более 60 лет: коэффициенты детерминации нелинейного уравнения, соответственно, 0,67 – 0,41 – 0,47; линейного 0,41 – 0,19 – 0,20. По мере старения древостоя исчезает влияние пахотного горизонта (4-я ось). На ранних стадиях сукцессии на мощных старопахотных горизон-

тах при тонком гумусовом горизонте идет преимущественно восстановление хвойных пород (или высаживались хвойные породы на таких почвах).

Устойчивое влияние на всех стадиях сукцессии имеет 3-я ось дифференциации почвенных горизонтов, отражающая процесс трансформации подстилки в гумус: чем мощнее гумусовый горизонт А1 и тоньше подстилка Ао, тем больше широколиственных пород. Следовательно, *преобладание широколиственных пород уже на ранних стадиях возможно только при наличии гумусового горизонта*, оставшегося после рубок предшествовавших лесов. Преобладание хвойных пород на всех стадиях быстро приводит к формированию мощной подстилки и замедленному преобразованию ее в гумус. Учитывая высокую степень антропогенной трансформации ландшафта, можно также предположить, что хвойные леса грамотно высаживались после рубок или распашки на мелкогумусных почвах, при том, что на глубокогумусных сами собой восстанавливаются широколиственные породы (дуб, липа, вяз, клен).

1-я ось дифференциации почвенных горизонтов, ответственная за соотношение интенсивности подзолообразования и торфонакопления, вносит наиболее существенный нелинейный вклад в соотношение хвойных и широколиственных пород. Доля хвойных пород велика как на глубокооподзоленных почвах, так и на почвах совсем без оподзоливания (возможно с торфянистым или гумусовым горизонтом). Иначе говоря — при отклонениях почвообразования от зональных условий на бедных почвах при застойном либо периодически промывном водном режиме. При более или менее зональных дерново-подзолистых почвах преимущество получают широколиственные породы. Степень оподзоленности может повлиять на состав леса на ранних стадиях сукцессии и также коррелирует, хотя и слабо и обратно линейно, на поздних стадиях. Характерно, что этот фактор независим от рельефа и, видимо, не связан с интенсивностью латеральных потоков.

Связь состава лесообразующих пород со 2-й осью дифференциации почвенных горизонтов (соотношение гумусонакопления и подзолообразования) слабая на всех стадиях сукцессии, отчасти проявляется только в молодняках. Эта ось, наоборот, чувствительна к рельефу вмещающих геосистем. Гумусонакопление усиливается в глубокорасчлененных наклонных позициях, где нет условий для временного весеннего застоя влаги и поэтому не идет оподзоливание. Поскольку по отдельности гумусонакопление отражается также 3-й осью, оподзоливание — 1-й осью, а процесс ответственный за их соотношение (2-я ось) не связан с древостоем, то можно сделать вывод, что степень весенней подвижности влаги для древостоя непринципиальна. Возможно, некоторым исключением является ранние стадии сукцессии до 40 лет, когда рост оподзоленности парадоксально коррелирует с обилием широколиственных пород. В то же время имеет значение, является ли переувлажнение постоянным, приводящим к накоплению органического вещества, что отражается 1-й осью. При отсутствии оподзоливания до 40 лет рост гумусированности не является сам по себе предпосылкой для увеличения доли широколиственных пород. Но при наличии в профиле обоих горизонтов — является таковой: чем мощнее гумусовый горизонт, тем больше широколиственных пород. Возможна двоякая интерпретация. С одной стороны, для развития широколиственного леса благоприятно некоторое временное переувлажнение, способствующее небольшому оподзоливанию. С другой стороны, широколиственные породы не способствуют гумусонакоплению при отсутствии оподзоливания, обязательным условием которого является (Зайдельман, 2010) временное переувлажнение. В старовозрастном состоянии

после 60 лет связь почв и древостоя начинает соответствовать ожидаемой: при любой степени оподзоленности, в том числе при ее отсутствии, рост гумусированности соответствует росту доли широколиственных пород; или наоборот — широколиственные породы способствуют гумусонакоплению.

Такая же зависимость связи от стадии сукцессии установлена относительно рельефа (табл. 26). На ранней стадии сукцессии связи этого фактора древостоя с рельефом вмещающих геосистем выражены лучше, чем на поздней.

Для 2-й оси дифференциации древостоя (соотношение сосняков и лесов с участием мезотрофных пород липы, пихты и осины) характерна иная зависимость от стадии сукцессии. Связь с почвами лучше всего выражена, наоборот, для старовозрастных лесов (коэффициент детерминации по мере старения: 0,35 – 0,37 – 0,46). Видимо, это объясняется большой долей молодых сосновых посадок, которые могут занимать разные почвы. В частности, в массив данных входят урочища с посадками сосны на песчаных почвах в Кизнерском районе (правый борт долины р. Казанка), где сосна наверняка будет вытеснена липой, достигающей высокого обилия в подросте. Такая ситуация интерпретируется как лесохозяйственная ошибка: на песках, согласно инструкции, высажена сосна без учета того факта, что пески здесь не бедные водноледниковые, а относительно богатые пермского возраста. Сохранение в зрелых древостоях сосны и липы более четко детерминировано почвенными условиями. Показательно, что и связь этого фактора древостоя с рельефом также наиболее хорошо проявляется в старовозрастных древостоях. Таким образом, установлена общая закономерность для обоих главных осей дифференциации древостоя: мера чувствительности как к почвам, так и к рельефу проявляется наилучшим образом на одной и той же стадии (ранняя для 1-й оси, поздняя — для 2-й оси). То есть одни процессы древостой лучше чувствует в стадии молодняка, а другие — в старовозрастной стадии.

Южнотаежный ландшафт в Кологривском районе Костромской области. Для полигона исследования, охватывающего Кологривский район в пределах Унжа-Вигского междуречья анализировалась 1-я ось дифференциации древостоя, в наилучшей степени отражающая чувствительность пород к минеральному питанию. Достоверные различия в географическом положении между классами возраста отсутствуют, что позволяет считать их относительно равномерно размещенными в пространстве.

Закономерность временных изменений в характере связей древостоя с морфологическими свойствами почв, по сравнению с Удмуртией, оказалась обратной. Линейные корреляции, как параметрические так и непараметрические, с осями дифференциации почв полностью отсутствуют на всех стадиях сукцессии (до 40, 40–60 и больше 60 лет). Нелинейное мультирегрессионное уравнение достоверно только для старовозрастных древостоев (коэффициенты детерминации, соответственно, 0,19 – 0,24 – 0,51), причем состав древостоя определяется неаддитивным эффектом влажности (1-я ось дифференциации почв) и трофности (2-я ось дифференциации почв). Распределение пород по экологическим нишам не совсем тривиально. Сосна и береза преобладают либо в относительно сухих условиях (без торфа) с мощным оподзоливанием, либо во влажных условиях с гумусонакоплением (обычно на двучленных породах). Широколиственные породы могут развиваться и в оподзоленных (то есть, казалось бы, в несвойственных для них бедных условиях), но влажных (с торфяным горизонтом) условиях. Такие условия встречаются в заповедном Кологривском лесе. При этом одновременно в древостое присутствуют и даже преобладают темнохвойные типично таежные по-

роды — ель и пихта. Это свидетельствует о том, что в южнотаежных условиях широколиственные породы могут выдерживать почвенные условия, свойственные средней тайге (торфянисто-подзолистые почвы), при разных почвообразующих породах (лессовидный суглинок, моренный суглинок, водноледниковый песок). Чувствительность фактора хвойных и широколиственных пород к рельефу достаточно уверенно возрастает в старовозрастной стадии. При этом в целом выдерживается резонансный уровень отношений с рельефом: рамочные условия создаются вмещающими геосистемами со средним размером 4400 м (Хорошев, 2010б).

Та же закономерность свойственна 2-й оси дифференциации древостоя (соотношение сосново-березовых древостоев и древостоев с участием ольхи серой), но с некоторым смещением резонансных уровней отношений с вмещающими геосистемами в сторону широкомасштабных эффектов при сохранении значимости узкомасштабных (т.е. ближайших окрестностей). Основные резонансные уровни для обеих осей (1-й и 2-й) остаются теми же, что и для всего массива в целом, то есть 4400 м. Связи как с рельефом, так и с почвами отсутствуют на ранней и средней стадиях сукцессии. Итак, в Кологривском районе первостепенные (1-я и 2-я) оси дифференциации древостоя чувствительны к строению почвенного профиля лишь на поздней стадии сукцессии. Судить о почвенных условиях по соотношению широколиственных пород, сосны, березы, ольхи до возраста 60 лет некорректно. Однако, согласно описанным ранее результатам канонического анализа и расчета попарных коэффициентов Спирмена, полная совокупность четырех главных осей дифференциации древостоя более чувствительна к свойствам почв именно на ранней стадии. Таким образом, отдельные свойства древостоя (группы пород) могут иметь собственные «особые отношения» с почвами помимо общей закономерности, свойственной древесному ярусу в целом.

Среднетаежный ландшафт в Архангельской области. Если в Удмуртии во всех возрастных стадиях четко выдерживается основной иерархический уровень отношений древостоя с рельефом вмещающих геосистем (тот же, что и для всего массива в целом), а в Кологривском районе это характерно только для старовозрастных древостоев, то на Архангельском полигоне наблюдается более сложная картина. Однозначной тенденции изменения тесноты связей с возрастом нет. Основные резонансные уровни отношений древостоя с рельефом сильно различаются в зависимости от возрастной стадии, что приходится связывать с неравномерным распределением возрастных стадий по территории. По результатам дисперсионного анализа существует достоверное различие географической долготы между тремя категориями возрастов леса. В наиболее густорасчлененной части полигона больше молодняков, в центральной части — средневозрастных лесов, а в слаборасчлененной восточной — старовозрастных, хотя во всех трех частях присутствуют все три стадии.

Для 1-й оси дифференциации древостоя, ответственной за соотношение бореальных и боровых элементов, основной резонансный уровень ландшафтного масштаба (2000 м) наиболее хорошо выражен для «молодняков» (до 50 лет), хотя в то же время равноценен и широкомасштабный уровень 6000 м (вообще недостоверный для всего массива данных по полигону). Основной резонансный уровень 2000 м не проявляется в более старых древостоях, для которых неожиданно возникает другой резонансный уровень 3600 м. Видимо это отражает изменение условий рельефа в восточном направлении параллельно с увеличением среднего возраста древостоев.

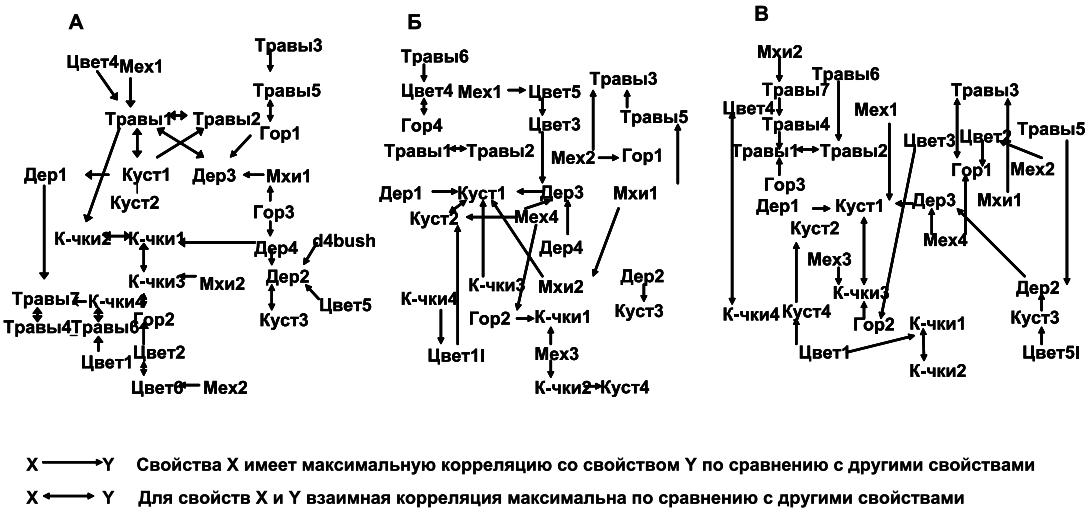

Рис. 63. Плеяды межкомпонентных связей на разных стадиях постантропогенного восстановления структуры ландшафта в ходе сукцессий (Архангельская область, среднетаежный полигон «Заячья»).
Достоверные коэффициенты корреляции Спирмена. А — возраст древостоя менее 50 лет. Б — то же, 50–70 лет. В — то же, более 70 лет. Оси дифференциации свойств компонентов и номер по рангу значимости: Дер1…4 — деревья. Куст1…4 — кустарники. К-чки1…4 — кустарнички. Травы1…6. Мхи1…2. Гор1…4 — мощность почвенных горизонтов. Цвет1…6 — цвет почвенных горизонтов. Мех1…4 — механический состав почвенных горизонтов.

Для среднетаежного ландшафта было проведено исследование с целью оценить степень устойчивости плеяд межкомпонентных связей (групп взаимосвязанных свойств почв, растительного покрова, почвообразующих отложений, рельефа) по мере антропогенной трансформации структуры и постантропогенного ее восстановления в ходе сукцессий (варианты: разрушение плеяд; возникновение новых плеяд; изменение прочности связи; изменение математического вида связи). Задача решалась на примере сравнения трех схем пляд связей, устанавливаемых по непараметрическим коэффициентам корреляции Спирмена для лесных ландшафтов, подвергавшихся рубкам или сельскохозяйственному использованию, соответственно, менее 50 лет назад (на момент полевого описания), 50–70 и более 70 лет назад (рис. 63). Объектом анализа были оси дифференциации компонентов ландшафта. Массив данных репрезентативен для ландшафта бассейна р.Заячья и охватывает все местности и роды урочищ.

На схеме плеяды для «молодых» лесов в возрасте до 50 лет (рис. 63, А) обращает на себя внимание, что лишь для двух свойств фитоценоза (причем не первостепенных) характеристики почв (а именно — мощности почвенных горизонтов) являются наиболее значимыми факторами. Для абсолютного большинства свойств фитоценоза самым значимым фактором является какое-либо другое свойство фитоценоза. Типична ситуация, когда для свойства почвенного покрова наиболее значимой является связь со свойством фитоценоза, но не наоборот. Следовательно, это свойство фитоценоза варьирует в пространстве с максимальной сопряженностью с каким-либо другим свойством фитоценоза. Четко просматривается узел взаимосвязанных свойств фитоце-

ноза — травяного, кустарникового и древесного ярусов. Все плеяды свойств, так или иначе, связаны между собой. Однако существует как минимум четыре ядра плеяд.

Одно из них отражает установившиеся тесные функциональные связи между главными осями дифференциации трав и кустарников, находящиеся под влиянием соотношения суглинистой и супесчаной толщ (1-я ось дифференциации механического состава почв) и водного режима почв (1-я ось дифференциации мощности горизонтов – соотношение болотного и суходольного рядов почвообразования). Обратим внимание, что строение двучлена и водный режим почв оказывают независимое друг от друга влияние на травяный и кустарниковый ярусы. Эта плеяда устойчиво сохраняется на всех стадиях сукцессии, однако чувствительность травостоя к механическому составу почв со временем ослабевает, а кустарников — сохраняется. Кустарники на поздней стадии распределяются в пространстве в более тесном сопряжении с кустарничковым ярусом и постепенным усилением оподзоливания. Травы увеличивают чувствительность к длительному стоянию верховодки в верхней супесчаной части почвенного профиля, а именно — заметно реагируют на формирование перегнойного горизонта и обособление вложенного субпрофиля альфегумусового подзола с ортштейновым горизонтом на глубине 15–20 см и контактно-элювиальным на глубине 20–40 см. При этом может возрастать обилие ряда нитрофильных и неморальных видов: таволги, борца, крапивы, гравилата, сныти. При альтернативном сценарии кратковременности верховодки и развитии единого элювиального горизонта в травостое растет обилие видов олиготрофного ряда — марьянника лесного, ожики, плаунов, ситника, ятрышника.

Второе ядро плеяд отражает состав кустарничкового яруса, формирующийся под влиянием почвенных свойств и процессов в верхней облегченной толще двучлена, а именно — перераспределение тонких частиц и формирование вложенного субпрофиля альфегумусового подзола в зависимости от частоты присутствия верховодки (2-я ось дифференциации механического состава почв, 2-я и 3-я оси дифференциации мощностей почвенных горизонтов). На ранних этапах развития (точнее — восстановления) лесного фитоценоза вторая плеяда обусловлена межкомпонентными взаимодействиями в более тонком слое ландшафта, чем первая: кустарничковый ярус реагирует на состояние только верхней супесчаной толщи, в то время как травяный и кустарниковый — на состояние двучлена в целом. На поздних этапах возрастает чувствительность кустарничкового яруса к цветовым характеристикам почв, отражающим развитие оглеения (1-я ось дифференциации цветовых характеристик), и к накоплению торфа и перегноя (1-я и 2-я оси дифференциации мощности почвенных горизонтов). При этом на средней стадии к этой плеяде присоединяются свойства кустарникового яруса (все оси), а на поздней из них в составе плеяды остаются только свойства, чувствительные к гумусонакоплению (4-я ось дифференциации кустарников)

Третья ядро плеяд включает 2-ю ось дифференциации древостоя и 3-ю ось дифференциации кустарникового яруса, отражая наличие/отсутствие процесса разгрузки богатых грунтовых вод на склонах малых долин с формированием ивняков, сероольшанников с кустарниковым ярусом из ивы, малины, смородины. Достаточно слабое влияние почв — в основном через формирование гумусового или перегнойного горизонта — сказывается только на составе древесного яруса, а характерный кустарниковый ярус возникает как следствие развития древесного. Разновидность подобной структуры фитоценоза возникает и на плоских междуречьях, в прошлом подвергавшихся распашке с внесением удобрений (в основном обогащенного азотом навоза).

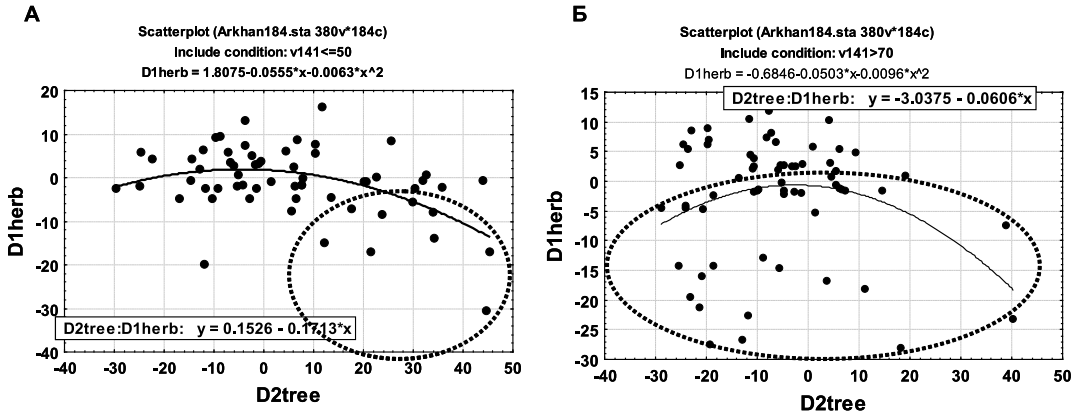

Рис. 64. Различия диапазона возможных обилий нитрофильных видов травостоя (d1herb, отрицательные значения) в молодых (А) и старовозрастных (Б) лесах в зависимости от соотношения ольхи серой и осины (d2tree).
Высокое обилие нитрофильных видов (в молодых лесах возможно только в присутствии серой ольхи (положительные значения d2tree), а в старовозрастных – также при низком обилии ольхи и высоком обилии осины (отрицательные значения d2tree).

При этом травяный ярус и строение почв могут мало отличаться от фоновых таежных сообществ дренированных урочищ (бореальное мелкотравье на агродерново-подзолистых почвах), а присутствие ольхи, малины, смородины, черемухи отражает особенности не морфологического, а химического состава почв. Эта плеяда, сохраняя ядро (2-ю ось дифференциации древостоя и 3-ю ось дифференциации кустарникового яруса), существенно сокращается по количеству членов на поздней стадии, когда из нее выпадают свойства травяного и кустарничкового яруса. Иначе говоря, кустарничковый и травяный ярусы теряют специфичность для фаций с присутствием ольхи, малины, смородины, черемухи (рис. 64). Например, таволга, крапива, борец могут участвовать в старовозрастных фитоценозах не только с высоким обилием ольхи и нитрофильных кустарников, но и с другим составом древесного и кустарникового ярусов — например, в елово-осиновых лесах с жимолостью, шиповником, можжевельником на крутых склонах долин. В молодых лесах такие комбинации на полигоне не встречаются.

Сохраняет устойчивость на всех трех возрастных стадиях плеяда, связывающая чувствительные к трофности свойства кустарникового яруса (1-я ось) и древесного (1-я ось) яруса. При этом кустарниковый ярус устойчиво связан со строением двучлена (1-я ось дифференциации механического состава) и соотношением оподзоливания и гумусонакопления (2-я ось дифференциации мощности почв). Древесный и кустарничковый (3-я ось) ярусы практически независимы от почвенно-литологических особенностей, за исключением ранней стадии до 50 лет. Иначе говоря, *по мере развития лесного фитоценоза древостой и кустарничковый ярусы достаточно пластичны и могут иметь похожий состав на почвах с разными свойствами, а кустарники* (рябина, можжевельник, ива и с другой стороны малина, смородина, жимолость, волчьеягодник) *строго адаптируются к почвам в зависимости от их обеспеченности минеральными веществами*.

В южнотаежном ландшафте Кологривского района Костромской области исследование проведено для территории с существенно меньшим разнообразием — в пределах одного ландшафта внутри государственного заповедника «Кологривский лес». Определена степень устойчивости плеяд межкомпонентных связей по мере антропогенной трансформации структуры и постантропогенного ее восстановления в ходе сукцессий (Хорошев и др., 2013б). Проверялась гипотеза об изменении меры взаимоадаптированности свойств компонентов в зависимости от времени, прошедшего после прекращения рубки. Задача решалась на примере сравнения моделей связей для лесных ландшафтов, подвергавшихся и не подвергавшихся рубкам.

С этой целью были проведены полевые исследования в кварталах 80 (вторичные леса), 87, 88, 89 (коренные леса) Варзенгского участкового лесничества Кологривского лесничества. Выполнено 57 полных геоботанических и ландшафтных описаний коренных южнотаежных пихтово-еловых лесов ядра заповедника «Кологривский лес», а также за пределами границ заповедника в пределах квадратной территории со стороной 2200 м. Приуроченные к ландшафтам моренных суглинистых равнин, эталонные субклимаксовые леса характеризуются набором коренных южнотаежных пород: ель европейская (*Picea abies*), ель сибирская (*Picea obovata*) и их гибридов, рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia*), клен платановидный (*Acer platanoides*), пихта сибирская (*Abies sibirica*), липа сердцевидная (*Tilia cordata*), береза пушистая *(Betula pubescens*) и ива козья (*Salix caprea*) (Немчинова и др., 2011).

В исследовании ставилась задача установить влияние стадии сукцессии на тесноту связи между свойствами травостоя и свойствами других ярусов фитоценоза и абиотических компонентов, а также соответствующие иерархические уровни ландшафтной организации. Исследованная часть заповедника расположена в пределах ландшафта, в котором типичные бореальные свойства южнотаежного сообщества искажаются повышенностью трофностью субстрата — лёссовидных суглинков. По сравнению с большей частью лесов Кологривского района, заповедные кварталы имеют облик, роднящий их с ландшафтами зоны хвойно-широколиственных лесов. Поэтому среди свойств травяного яруса наибольший интерес привлекло соотношения видов конкурирующих бореальной и неморальной эколого-ценотических групп (ЭЦГ). Предметом анализа послужили причины смещения свойств травяного яруса фитоценоза в сторону большей неморальности или большей бореальности и конкурентоспособность двух групп на разных стадиях сукцессии. Соотношения видов бореальной и неморальной ЭЦГ оценивались по базе данных ЭЦГ видов сосудистых растений Центральной России (Смирнов и др., 2006). Рассчитана доля суммарного обилия неморальных видов от суммы бореальных и неморальных и от суммы всех видов. В среднем доля бореальной ЭЦГ в травостое коренного леса составляет 33%, неморальной — 38% (Немчинова и др., 2011). Для проверки гипотез сопоставлены свойства урочищ-аналогов (с полностью сопоставимыми позицией в рельефе, строением почвообразующей породы, режимом увлажнения), находящихся на разных стадиях сукцессии и в климаксной стадии. При проверке гипотезы допускалась возможность их подтверждения не на всей территории ландшафта, а лишь в некоторых видах урочищ. Размер ареала подтверждения гипотезы и степень сложности его ландшафтной структуры служит основанием для определения иерархического уровня, для которого степень неморальности/бореальности является информативным признаком геосистем. Под закономерностями ландшафтного уровня подразумевались межкомпонентные связи, проявляющиеся

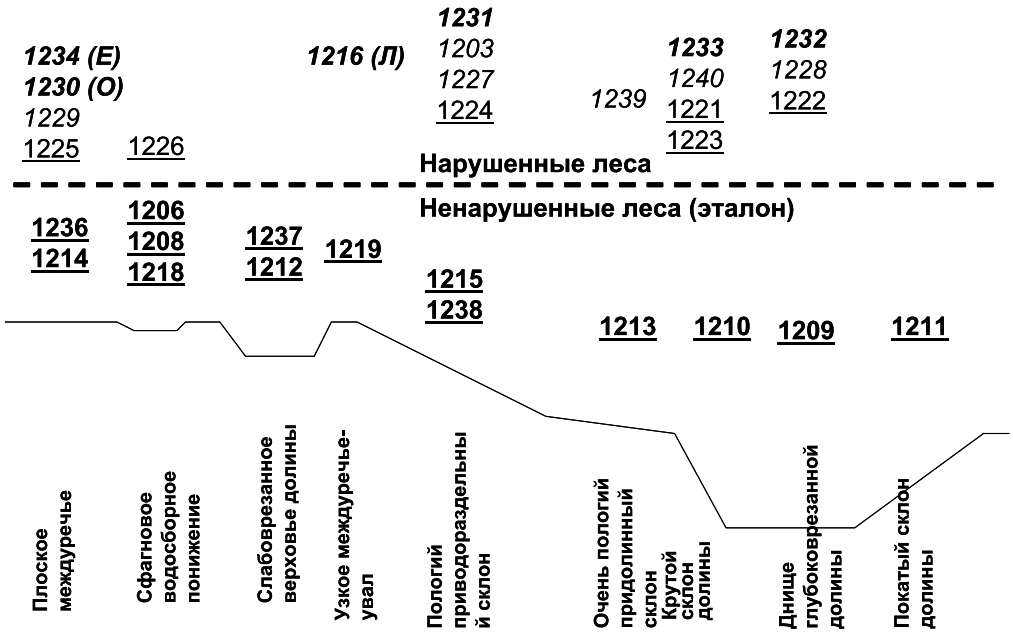

Рис. 65. Обобщенная схема распределения точек комплексного описания в южнотаежном ландшафте (заповедник «Кологривский лес», Костромская область) по формам мезорельефа и сукцессионным стадиям. Жирный подчеркнутый шрифт — коренные леса, подчеркнутый шрифт — вырубки 1970-х гг., курсив — вырубки 1960-х гг., жирный курсив — вырубки 1920-х гг. Е — ельники. О — осинники. Л — липняки.

при включении в расчеты массива данных, охватывающего все репрезентативные для ландшафта группы урочищ: плоских междуречных поверхностей, очень пологих приводораздельных склонов, пологих придолинных склонов, пологих и покатых склонов долин, пойм. Под закономерностями более низкого уровня понимаются связи, проявляющиеся при включении в расчет массива данных, охватывающих меньший уровень ландшафтного разнообразия — отдельных групп урочищ. В таком случае отражается внутреннее разнообразие входящих в урочище фаций.

Площадки комплексных полевых описаний заложены по следующим принципам (рис. 65):

1. охват коренных никогда не подвергавшихся рубкам лесов и лесов разных стадий восстановительных сукцессий (38, 45, 83 лет после сплошной рубки);
2. охват всех разновидностей мезоформ рельефа;
3. ряды урочищ с одинаковой принадлежностью к мезоформам рельефа, но с отличием по стадии восстановительной сукцессии.

На первом этапе проверялась гипотеза о мощности чехла лессовидных суглинков как факторе неморальности травостоя. Лессовидный чехол присутствует почти повсеместно, но имеет неодинаковую мощность в группах урочищ. В верхней части профиля (чехол лессовидного легкого суглинка) преобладает фракция крупной пыли 0,05–0,01 мм (52–58%); доля физической глины около 30% (Дворников и др., 1987). Ниже залегает

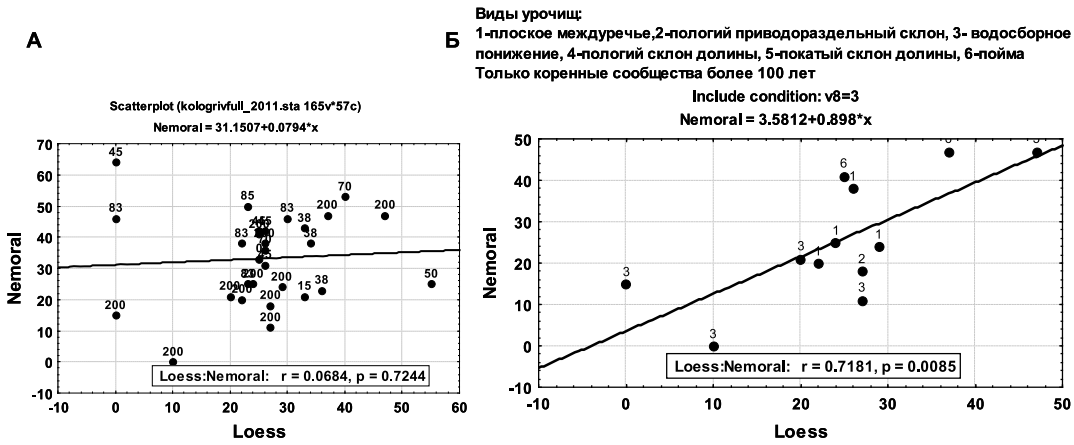

Рис. 66. Зависимость доли неморальных видов в травяном ярусе (Nemoral) от мощности чехла лессовидных суглинков (Loess) в южнотаежном ландшафте заповедника «Кологривский лес» (Костромская область). А — полный массив данных с указанием среднего возраста древостоя (подписан возраст древостоя). Б — коренные сообщества с оконной динамикой древостоя (подписаны виды урочищ).

тяжелосуглинистая толща. Минимальная мощность чехла свойственна водосборным понижениям (0–33 см, в среднем — 18 см), максимальная – склонам долин и придолинным (26–55 см, в среднем — 36 см). Наиболее узкий диапазон мощностей зафиксирован для урочищ плоских междуречий и очень пологих приводораздельных склонов (22–40 см, в среднем — 28 см). На поймах мощность чехла варьирует от 0 до 37 см, в среднем — 19 см. Мощность чехла на склонах, по результатам дисперсионного анализа, достоверно отличается от таковой в водосборных понижениях и на поймах ($p<0,02$); отличия мощности на плоских междуречьях от других групп урочищ недостоверны. Неравномерное залегание покровных суглинков с увеличением мощности по склонам в области московско-днепровского оледенения может быть связано с частичным переотложением на склонах и в понижениях под действием процессов плоскостного смыва и солифлюкции (Спиридонов, 1957). Проверка гипотезы о значимости мощности лессовидного чехла показала, что в целом для ландшафта отсутствует достоверная корреляция со степенью неморальности травостоя. Некоторая тенденция к возрастанию доли неморальных видов по мере увеличения мощности чехла наблюдается на пологих приводораздельных склонах, но для расчета корреляции количество данных недостаточно. Однако если исключить из расчета урочища, нарушенные рубками в 1920–1970-х гг., то установлена достоверная положительная связь (рис. 66). Это свидетельствует о повышении жесткости связи между свойствами травостоя и почвообразующих пород с приближением к климаксу. При этом невозможно отделить влияние рельефа от влияния мощности лессовидного чехла, поскольку связь выражена только на ландшафтном уровне, но не существует в доминирующих по площади урочищах плоских и слабовыпуклых водораздельных поверхностей.

Однако свойства рельефа и мощность чехла лессовидного суглинка — свойства с большим характерным временем, в отличие от видового состава травостоя — доста-

точно мобильной характеристики. Более корректно ставить вопрос о существовании устойчивых (вне зависимости от стадии сукцессии) плеяд связей между свойствами с сопоставимыми характерными временами — например, травостоем и древостоем, травостоем и химическими свойствами почв. Вопрос формулируется следующим образом: в какой степени свойства травостоя (в данном случае — соотношение бореальных и неморальных видов) меняются по мере старения древостоя (а именно — по мере вытеснения мелколиственных видов темнохвойными) и меняются ли химические свойства почвы сопряженно с трансформацией фитоценоза. Иначе говоря, существуют ли устойчивые причинно-следственные внутриуровенные межкомпонентные связи, действующие на разных стадиях восстановительной сукцессии?

Проверка гипотезы о независимом от почв изменении соотношения ЭЦГ групп по мере старения древостоя для ландшафтного масштаба показала достаточно сильные связи доли видов неморальной группы с обилием видов древостоя. Наблюдается строгая отрицательная корреляция (по непараметрическому коэффициенту Спирмена) суммы площадей сечений ели с долей неморальных видов ($r = –0{,}61$). Корреляция с суммой площадей сечений березы, которая обычно преобладает на ранних стадиях сукцессии, положительна и достоверна по коэффициенту Пирсона ($r = 0{,}37$, $p = 0{,}0353$), но недостоверна по коэффициенту Спирмена (0,30). Однако очевидно, что при высоком обилии березы (более 10 м²/га) доля неморальных видов не может быть низкой: не менее 20%, а чаще 40–50%. При малом обилии березы (в коренных лесах) доля неморальных видов может быть разной: следовательно, разнообразие факторов возрастает. Расчет отдельно для группы доминирующих урочищ плоских междуречных поверхностей и очень пологих приводораздельных склонов показал отсутствие значимых корреляций с обеими характеристиками неморальности травостоя. С обилием липы, пихты, осины связи нет – видимо, сказывается их подчиненное положение в зрелом древостое по отношению к ели. Таким образом, на урочищном уровне важным фактором соотношения бореальных и неморальных видов служат внутрифитоценотические отношения. По мере старения древостоя и роста доли ели неморальные виды могут вытесняться бореальными с бóльшим успехом, чем в молодых сообществах. Итак, *существует устойчивая однотипная связь между свойствами древостоя и травостоя на протяжении, по крайней мере, двух столетий жизни фитоценоза*.

Гипотеза о сопряженном изменении свойств почв и фитоценоза по мере приближения сообщества к климаксовой стадии основана на традиционном представлении об оподзоливающей роли хвойных лесов и развитии дерновых горизонтов при сильном развитии травостоя во вторичных мелколиственных лесах (Дворников и др., 1987). В то же время недавно высказано мнение о том, что устойчивое многовековое развитие экосистемы хвойного леса приводит к унификации верхнего горизонта, его равномерной гумусированности за счет турбаций, а повсеместно наблюдаемое оподзоливание — следствие былой распашки и подсечно-огневого земледелия на большей части лесной зоны Европейской России (Бобровский, 2010). Наши данные дают дополнительную информацию для внесения ясности в этот вопрос.

В заповеднике «Кологривский лес» в ландшафтном масштабе обнаружена следующая тенденция изменения химических свойств почв по мере восстановления лесного фитоценоза после рубки (табл. 27). В урочищах плоских междуречий диапазон возможных содержаний органического углерода на глубинах 10–15 см сужается от молодых сообществ в возрасте до 45 лет (0,1–1,9%) к старовозрастным сообществам (0,5–

Таблица. 27.

Химические свойства почв в южнотаежном ландшафте государственного заповедника «Кологривский лес».

Разрез	Положение в рельефе	Древостой	Горизонт	Глубина, см	pH	C орг, %	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	H^{+}	Al^{3+}	Сумма катионов
							ммоль/100 г						
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*	*13*	*14*
1203	Пологий склон	Березняк 50 лет	A1	10	4,35	0,32	11,35	4,92	0,83	3,99	1,07	0,25	22,41
			AEL	15	4,70	0,58	6,40	2,95	0,67	1,30	0,66	0,20	12,18
			ELB	25	4,96	0,38	8,15	3,79	0,80	2,47	0,50	0,10	15,79
			B	50			5,23	1,99	1,32	1,73	2,39	0,07	12,73
1208	Водосборное понижение	Коренной ельник	EL	10	4,07	0,54	4,19	1,45	0,24	0,09	0,08	0,06	6,10
			Bf	15	4,76	0,35	6,37	2,33	0,32	0,14	0,06	0,01	9,24
			ELB	25	4,90	0,10	12,24	5,02	0,39	0,30	0,07	0,01	18,04
1209	Пойма	Коренной ельник	A	10	4,51	1,08	5,46	2,12	0,20	0,12	0,06	0,08	8,03
			C~1	20	4,81	0,54	6,48	2,61	0,34	0,20	0,04	0,02	9,69
			C~2	30	5,00	0,16	6,68	3,20	0,28	0,25	0,04	0,01	10,46
			C~3	40	5,51	0,36	9,19	3,87	0,34	0,25	0,04	0,02	13,71
1210	Покатый склон	Коренной ельник	A1A2	5	4,48	3,73	5,23	2,17	0,03	2,93	0,57	0,28	11,21
			ELB	15	4,76	0,70	5,23	2,09	0,12	2,37	0,49	0,38	10,67
			BEL	35	4,80	0,53	5,92	2,66	1,05	2,25	0,51	0,42	12,82
1211	Пологий склон	Коренной ельник	BHF	10	4,29	0,11	5,62	1,74	0,94	1,20	1,22	0,32	11,05
			ELB	20	4,63	0,96	7,25	2,10	1,06	1,26	0,63	0,51	12,80
1212	Пойма	Коренной ельник	A1	10	4,31	2,21	7,26	3,20	0,80	3,06	0,60	0,23	15,16
			G	20	4,63	1,26	6,07	2,44	0,67	3,03	0,48	0,50	13,17
1215	Краевая часть плоского междуречья	Коренной ельник	EL1	5	4,25	1,14	4,14	1,37	0,31	0,07	0,12	0,03	6,04
			Bhf	10	4,34	0,73	3,42	0,98	0,20	0,18	0,05	0,12	4,96
			EL2	20	4,93	0,13	3,56	1,19	0,17	0,02	0,05	0,01	5,00
			ELB	30	4,91	0,07	9,48	4,29	0,31	0,23	0,12	0,01	14,44
			BEL	40	4,64	0,14	10,38	4,99	0,35	0,30	0,09	0,01	16,13

Таблица (*продолжение*)

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*	*13*	*14*
1216	Плоское междуречье	Липняк, 85 лет	AEL	10	4,76	0,54	4,50	1,53	0,30	0,04	0,06	0,00	6,43
			EL	20	4,93	0,23	5,76	2,03	0,41	0,18	0,04	0,00	8,42
1218	Водосборное понижение	Коренной ельник	EL	5	4,52	3,13	5,77	2,42	0,60	2,26	0,57	0,29	11,92
			ELBf	15	4,98		5,49	2,29	0,67	1,40	0,43	0,19	10,48
1219	Узкая водораздельная поверхность	Коренной ельник	AEL	5	4,16	0,58	4,24	1,33	0,30	0,03	0,12	0,18	6,21
			EL	15	4,56	0,25	4,03	1,31	0,31	0,05	0,06	0,01	5,77
1222	Пойма	Березняк 38 лет	A	10	4,44	0,88	5,43	1,98	0,45	0,28	0,05	0,06	8,25
			C~	25	4,98	0,71	4,47	1,71	0,24	0,20	0,03	0,02	6,67
			G	50	4,88	0,91	7,04	2,87	0,44	0,25	0,04	0,03	10,67
1223	Покатый склон	Ельник недоруб 38 лет	EL	10	4,56	0,54	4,20	1,80	0,81	1,49	0,42	0,21	8,93
			ELB	25	4,55	0,65	4,24	1,88	0,03	1,54	0,23	0,51	8,43
1224	Плоское междуречье	Березняк 38 лет	AELpa	15	4,47	1,27	5,50	1,79	0,28	0,34	0,05	0,08	8,04
			ELB	30	5,33	0,20	5,59	2,32	0,19	0,12	0,03	0,01	8,25
1225	Плоское междуречье	Березняк с сохраненным подростом ели 38 лет	AEL	10	3,83	1,91	3,85	1,33	0,19	0,10	0,13	0,21	5,82
			EL	20	4,30	0,25	3,24	0,99	0,19	0,07	O,04	0,03	4,56
			ELB	30	6.54	0.34	5.80	2.38	0.23	0.10	0.04	0.18	8.72
1227	Пологий приводораздельный склон	Елово-березовый лес, 70 лет	AEL	10	4.42	0.84	3.49	1.09	0.21	0.15	0.05	0.01	4.99
			EL	15	4.87	0.19	4.85	1.74	0.26	0.05	0.04	0.01	6.94
1228	Пойма	Березняк 45 лет	AW	10	5.03	1.53	8.91	3.77	1.87	3.57	0.30	0.15	18.58
			W	25	5.51	0.64	8.88	4.03	1.06	2.54	0.13	0.16	16.79
			G	50	6.04	1.18	11.49	5.00	1.05	2.51	0.06	0.10	20.21
1229	Пологий приводораздельный склон	Березняк 45 лет	EL	7-10	4.73	0.56	4.59	2.01	0.61	0.97	0.36	0.10	8.64
			AEL	7-15	4.90	0.32	4.08	1.78	1.10	1.94	0.40	0.12	9.41
			ELB	20	5.09	0.12	6.18	3.12	0.43	1.95	0.48	0.05	12.21
1230	Плоское междуречье	Осинник 83 года	AEL	5	4.68	1.11	6.28	2.84	0.45	3.88	0.44	0.56	14.46
			ELB	15	5.41	0.19	6.99	3.53	0.52	2.16	1.07	0.08	14.35

Таблица (*окончание*)

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*	*13*	*14*
1231	Пологий приводораздельный склон	Осинник 83 года	A	5	4.56	1.48	5.38	2.37	0.40	1.80	0.70	0.12	10.77
			EL	15	4.89	0.36	5.14	2.19	0.65	1.72	0.36	0.12	10.19
			ELB	25	5.18	0.22	6.65	3.42	0.89	2.19	0.41	0.09	13.64
1232	Пойма	Ельник 83 года	A	5-8	4.64	1.64	7.58	3.35	0.42	2.72	0.49	0.14	14.71
			AG	20	4.63	1.21	7.27	3.17	0.89	2.93	0.52	0.18	14.97
			G	50	4.96	0.94	6.71	2.94	1.11	2.40	0.33	0.16	13.65
1233	Покатый склон	Березняк 83 года	ELB	10	4.57	0.40	3.84	1.60	0.71	1.50	0.47	0.28	8.39
			BEL	20	4.69	0.50	3.84	1.64	0.69	1.21	0.19	0.87	8.44
1234	Плоское междуречье	Березняк 83 года	AEL	10	4.54	0.02	4.68	2.01	0.45	0.78	0.72	0.11	8.74
			EL	20	5.00	0.33	5.14	2.13	1.15	1.72	0.52	0.12	10.78
1236	Плоское междуречье	Коренной ельник	AEL	5	4.14	0.52	3.15	0.90	1.15	0.74	0.10	0.01	6.05
			EL	10-15	4.49	0.39	3.60	1.18	0.17	0.04	0.09	0.01	5.09
			ELB	20	4.78	0.08	5.57	1.99	0.24	0.07	0.10	0.01	7.98
			BEL	25	4.96	0.25	14.86	6.55	0.30	0.43	0.10	0.02	22.25
			B	35	5.02	0.46	10.22	4.29	0.39	0.56	0.10	0.01	15.57
1238	Пологий приводораздельный склон	Коренной ельник	EL	10	4.51	1.13	4.43	1.89	0.79	1.62	0.31	0.07	9.11
			ELB	25	5.12	0.09	5.39	2.53	0.51	1.81	0.48	0.08	10.79
1240	Пологий приводораздельный склон	Березняк 45 лет	EL	10	4.74	0.08	4.66	1.97	0.29	1.86	0.32	0.13	9.23
			ELB	20	5.03	0.10	5.87	2.80	0.28	0.97	0.49	0.07	10.47
1241	Крутой склон	Березняк 45 лет	AEL	5	4.15	0.99	5.61	2.36	1.48	2.11	0.95	0.06	12.57
			ELB	20	4.62	0.49	6.70	2.68	0.64	1.62	0.64	0.31	12.60
			BEL	30	4.86	0.51	7.96	3.65	0.92	2.50	0.53	0.59	16.16
			B	45	4.98	0.64	10.46	4.57	0.16	3.98	0.52	0.45	20.14

1,1% на глубине 10 см и 0,1–0,25% на глубине 15 см). В то же время на поймах, пологих и крутых склонах долин, наоборот, почвы молодых сообществ обеднены гумусом, а в климаксовой стадии обогащены. На плоских междуречьях при достижении возраста древостоя около 80 лет происходит обогащение горизонтов в верхних 10–15 см обменным кальцием (до 6–7 ммоль-экв./100 г), магнием (до 3–4 ммоль-экв./100 г), калием (до 2–3 ммоль-экв./100 г) (табл. 27). Такой возраст древостоя в Кологривском лесе соответствует стадии доминирования мелколиственных пород, прежде всего осины, в древостое. По мере приближения к климаксу, т.е. постепенного вытеснения осины и березы елью и пихтой, содержание этих элементов опять падает. Почвы старовозрастных лесов водораздельных поверхностей обеднены магнием, кальцием, и особенно достоверно — водородом, алюминием, калием на глубине 10 см по сравнению с почвами нарушенных лесов с заметным уменьшением вариабельности. Иначе говоря, *вид связи между свойствами древостоя и химическими свойствами почв меняется в ходе восстановительной сукцессии*. Достоверного подкисления почв под старовозрастными лесами не обнаружено, что согласуется со снижением концентраций водорода и алюминия. В то же время зафиксировано обеднение основаниями по мере достижения климаксной стадии. Также нет достоверных различий между химическими свойствами почв под сообществами разных возрастов в долинных (водосборных, склоновых, пойменных) урочищах.

Для всего массива данных независимо от стадии сукцессии ожидаемо достоверны положительные корреляции (Спирмена) доли неморальных видов с pH, содержанием обменного кальция и магния на глубине 10 см, калия — на глубине 15 см, гумуса — на глубине 25 см (табл. 28). Однако отдельно в группе для старовозрастных ельников достоверная корреляция отсутствует. На стадиях сукцессии до возраста 85 лет доля неморальных видов связана положительной корреляцией с pH на глубине 10 см. Для доминирующих урочищ плоских поверхностей и пологих приводораздельных склонов положительна связь с содержанием обменного кальция на глубине 15 см (R = 0,58) и с pH на глубине 10 см (R = 0,64). Полностью отсутствуют достоверные корреляции химических свойств почв с долей неморальных видов от суммы обилий всех травянистых видов фитоценоза.

Таблица. 28.

Коэффициент корреляции Спирмена между химическими свойствами почв заповедника «Кологривский лес» и долей неморальных видов в травяном ярусе.

pH, глубина 10 см	0,47
Ca обменный, глубина 10 см	0,44
Mg обменный, глубина 10 см	0,42
K обменный, глубина 15 см	0,47
C органический, глубина 25 см	0,59

Все доминирующие урочища плоских междуречий и приводораздельных очень пологих склонов, которые характеризуются повышенным содержанием кальция, калия, гумуса, водорода, алюминия, с суммой обменных оснований более 8 ммоль-экв./100 г, относятся к категории вторичных лесов. Одновременно во всех урочищах старовозрастных лесов кальция и других обменных катионов меньше. Даже в тех двух случаях, когда обнаружено повышенное количество кальция, калия, гумуса на глубине 15 см

под ненарушенным лесом, повышения доли неморальных видов травостоя не наблюдалось. Следовательно, *одинаковая доля неморальных видов может быть свойственна урочищам с резко различным содержанием обменных оснований*.

Проверка гипотезы о влиянии морфологических свойств почв на степень неморальности показала, что доля неморальных видов не может превышать 30% при слабых признаках периодического оглеения верхней части лессовидного чехла, которая выражается в значениях оттенка (Hue) 2,5Y. Этот оттенок встречается почти исключительно в урочищах плоских междуречий и очень пологих приводораздельных склонов. Понижается доля неморальных видов до 0–20% на почвах с сизыми пятнами в профиле и глеевыми горизонтами, которые встречаются в водосборных понижениях и на поймах. Достоверны положительная связь доли неморальных видов от суммы бореальных и неморальных с мощностью подстилки (коэффициент корреляции Пирсона 0,48, в старовозрастных лесах 0,64) и отрицательная — с мощностью торфяного горизонта (–0,60, в старовозрастных лесах –0,73). Доля неморальных видов понижается до 15% и менее только на почвах с развитым торфяным горизонтом, т.е. в водосборных понижениях. Эти закономерности проявляются только на иерархическом уровне ландшафта; внутри местности доминантных плоских междуречных поверхностей связи недостоверны. Доля неморальных видов от суммы всех видов не имеет достоверных связей с мощностями почвенных горизонтов в урочищах с коренными лесами.

В работе (Дворников и др., 1987) по материалам исследований ключевого участка 40 × 50 м в Кологривском лесе отмечается, что под производными липовыми парцеллами, в отличие от коренных ельников развивается гумусовый горизонт. По нашим исследованиям, охватившим существенно более обширную территорию, эта закономерность неоднозначна: возможны разнообразные варианты. Например, мощность гумусированных горизонтов может достигать 14–18 см в липовых парцеллах с суммой площадей сечений липы 10–12 м^2/га при низком обилии ели (3–7 м^2/га). Однако при противоположных значениях обилия липы и ели (3 и 27 м^2/га соответственно) также возможно развитие гумусированных горизонтов мощностью до 23 см. Вероятно, существенный вклад в формирование таких аномально мощных гумусированных горизонтов вносят процессы турбаций почв, связанные с ветровалами. Этому механизму большое, хотя возможно и преувеличенное, значение придает М.В. Бобровский (2010).

В масштабе местности плоских междуречных поверхностей проведено сравнение свойств урочищ с лесными сообществами разного возраста: 45, 83 и более 200 лет. Подзолистые почвы липняка в возрасте 83 года (т. 1216), выделяются повышенной долей неморальных видов (50% от суммы бореальных и неморальных и 28% от общей суммы обилий видов), по сравнению с почвами соседних урочищ старовозрастных ельников (тт. 1215, 1219). Они обогащены в верхних горизонтах кальцием и магнием и обеднены водородом и алюминием, что, казалось бы, и указывает на причину повышения неморальности (табл. 27). Однако еще большее обогащение кальцием и магнием в осиннике того же возраста в аналогичном урочище (т. 1230) не дает дополнительных выгод неморальным видам по сравнению с бореальными: их доля убывает до 38% от суммы бореальных и неморальных и 9% от общей суммы обилий видов. При этом не исключен вклад в бореальный характер осинника повышенного содержания водорода и алюминия и слабых признаков оглеения в виде сизоватых пятен и мелких железистых новообразований (табл. 27). В аналогичном и близкорасположенном урочище 45-летнего березняка (т. 1229) верхний элювиальный слабогумусированный горизонт

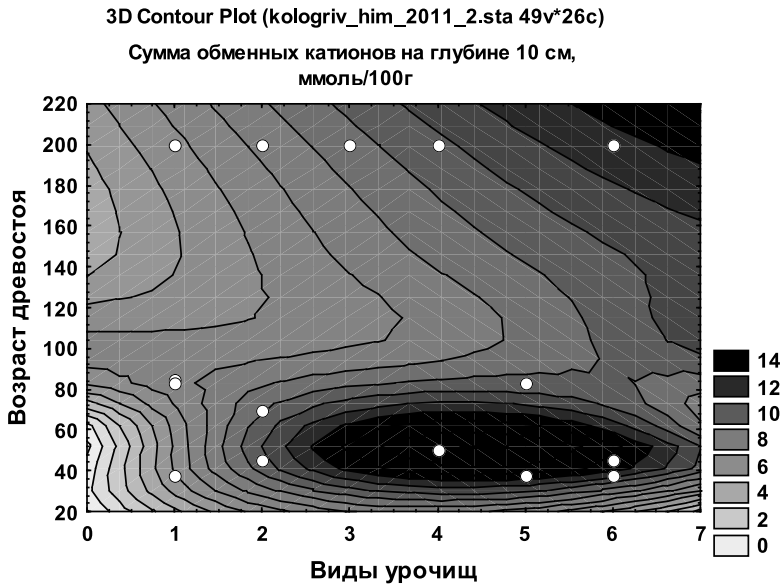

Рис. 67. Зависимость суммы обменных катионов в почвах на глубине 10 см от возраста древостоя в разных видах урочищ в южнотаежном ландшафте заповедника «Кологривский лес» (Костромская область). Виды урочищ. 1 — плоские междуречья, 2 —пологие приводораздельные и придолинные склоны, 3 — водосборные понижения, 4 — пологие склоны долин, 5 — покатые склоны долин, 6 — поймы.

почв обогащен по сравнению с липняком, но обеднен по сравнению с осинником обменными кальцием, магнием, калием, водородом, алюминием (табл. 27). Верхние (10–15 см) горизонта EL почв под всеми перечисленными сообществами вторичных лесов, по сравнению с почвами коренных лесов, заметно обогащены кальцием, магнием, калием, а также имеют повышенный pH. Однако нет основания утверждать, что это отражается на повышении или понижении доли неморальных видов, так как похожая доля неморальных видов встречается на т. 1215. Ее отличие от второго урочища со старовозрастным лесом заключается в близости дренирующего водотока и повышении расчлененности рельефа окрестностей.

Таким образом, *устойчивая связь меняющейся во времени доли неморальных видов с химическими свойствами почв отсутствует. При этом сами химические свойства по мере старения древостоя меняются в сторону обеднения основаниями*. Можно назвать, по крайней мере, три причины этого факта. Во-первых, внутрифитоценотические отношения оказываются более значимыми, чем почвенно-фитоценотические. Во-вторых, химические свойства почв, видимо, все-таки более инертны, чем видовой состав травостоя и древостоя. В-третьих, существует целый ряд почвенных и почвенно-гидрологических процессов, управляющих содержанием химических элементов независимо от состояния фитоценоза. В частности, существенный вклад вносит перераспределение элементов по рельефу. На всех стадиях сукцессии (на момент исследования — 35, 83, более 200 лет) содержание в почвах органического углерода, обменных

Ca, Mg, K на глубинах 10–15 см значимо больше на склонах и в поймах, по сравнению с плоскими водораздельными поверхностями, пологими приводораздельными склонами и водосборными понижениями (рис. 67).

Следует напомнить, что «связь» — строго говоря, означает «ограничение разнообразия состояний». Относительно слабые показатели связи могут получиться при расчете, если при некотором диапазоне значений свойства А диапазон допустимых значений свойства Б широк. С точки зрения устойчивости это означает повышенную пластичность, способность свойства Б находиться в разных устойчивых состояниях. Поэтому во многих случаях оказывается недостаточно просто сравнить коэффициенты корреляции или какие-либо другие показатели связи. Необходимо выявлять диапазон условий (во времени или в пространстве), при которых резко сокращается возможное разнообразие состояний. На примере заповедного ландшафта Кологривского леса мы провели сравнительный анализ диапазонов значений свойств-предикторов и свойств-откликов, который позволил уточнить представления о жесткости внутрифитоценотических и почвенно-фитоценотических связей на разных стадиях восстановительной сукцессии.

Характерная особенность установленных видов зависимости между свойствами компонентов ландшафта — неодинаковая вариабельность зависимых свойств при разных диапазонах значений свойства-предиктора. Приведем некоторые примеры, значимые для характеристики местообитаний неморальных видов травостоя.

- ✓ При большом обилии березы (сумма площадей сечений (СПС) более 10 м^2/га) доля неморальных видов от суммы бореальных и неморальных не может быть малой (менее 20%), а при малом обилии березы, то есть в коренных лесах, — какой угодно. Следовательно, *исход конкуренции бореальных и неморальных видов травостоя более предсказуем в нарушенных молодых лесах; в старых лесах бореальные виды могут получить существенное преимущество*.
- ✓ При высоком содержании обменного кальция на глубине 10 см (более 5 ммоль-экв/100 г) доля неморальных видов от суммы бореальных и неморальных составляет всегда не менее 50%, при меньших значениях может быть какой угодно. Следовательно, *обогащенные основаниями почвы детерминируют неморальность травостоя, а бедные необязательно ее «запрещают»*.
- ✓ При pH на глубине 10 см менее 4,3 неморальных видов обязательно мало – менее 25%, при более высоких pH — может быть сколько угодно. Следовательно, *только сильнокислые почвы обусловливают однозначно бореальный характер травостоя*, *а слабокислые и нейтральные — допускают сосуществование бореальных и неморальных видов*.
- ✓ Липа как одна из коренных лесообразующих пород южнотаежных ландшафтов на лессовидных легких суглинках, подстилаемых тяжелыми моренными суглинками, может присутствовать (но необязательно) в большом обилии (СПС более 6 м^2/га) только если суммарная мощность оподзоленных горизонтов не превышает 20 см. При глубокой оподзоленности обилие липы всегда мало как в коренных, так и в нарушенных сообществах. Следовательно, запас элементов минерального питания в верхней лессовидной толще мог существенно влиять на пространственную структуру древостоя в коренных сообществах южной тайги. Однако наши данные не дают доказательств, что в отсутствие липы (и, следовательно, при абсолютном преобладании темнохвойных пород) оподзоливание охватывает более глубокие горизонты почв.

- ✓ При высоком обилии липы (СПС более 8 м²/га) доля неморальных видов травостоя обязательно велика (более 40%), а при низком — может варьировать в широких пределах. Эта закономерность особенно ярко проявляется в коренных лесах (коэффициент корреляции Спирмена 0,72 для доли неморальных видов от суммы обилий всех видов и 0,62 — от суммы бореальных и неморальных). Следовательно, *существует относительно жестко детерминированное сочетание ландшафтных условий плоских междуречных поверхностей с неглубокой оподзоленностью лессовидного чехла, высоким обилием липы и высокой долей неморальных видов*.
- ✓ Сумма обменных оснований и сумма водорода и алюминия на междуречьях жестко лимитированы в диапазоне низких содержаний, на склонах жестко лимитированы в диапазоне высоких содержаний, в то время как в долинах содержание может варьировать в широком диапазоне. Эта закономерность проявляется как в масштабе всего ландшафта, так и для группы урочищ коренных лесов. Следовательно, *мозаичность ландшафтно-геохимической обстановки зависит от генезиса форм рельефа*.
- ✓ Доля элювиальных горизонтов EL в лессовидном плаще не бывает больше 0,2 при большой вертикальной расчлененности рельефа в окрестности 630 м, то есть в придолинных и долинных позициях рельефа, но может быть как большой, так и малой при слабой расчлененности в приводораздельных позициях.

Таким образом, в *пределах ядра заповедника с коренными лесами резко различаются, с одной стороны, урочища с жестко детерминированными межкомпонентными отношениями, с другой — урочища с высоким разнообразием возможных сочетаний свойств компонентов и поэтому с пониженными возможностями индикации типа местообитания по структуре фитоценоза*. В более общем смысле, *возможности применения методов ландшафтной индикации как одной из главных традиционных задач ландшафтоведения неодинаковы в разных ландшафтных ситуациях, в частности — в зависимости от стадии развития ландшафта*.

Итак, анализ временных рамок действия межкопонентных связей показал следующее.

1. Теснота связей между биотическими и абиотическими компонентами меняется в ходе восстановительных сукцессий лесной растительности.
2. Формирование адаптивной почвенно-фитоценотической системы протекает по-разному в средней тайге и в более южных ландшафтах южной тайги и смешанных лесов.
3. В средней тайге с приближением к стадии старовозрастных лесов взаимоадаптированность почв и фитоценоза возрастает, а зависимость фитоценоза от механического состава почвообразующих отложений ослабевает. Формируется парциальная геосистема, объединяющая свойства нижних подчиненных ярусов фитоценоза и почвенный профиль. Одновременно ослабляются связи в парциальной геосистеме, связывающей подчиненные ярусы фитоценоза и свойства почвообразующих отложений.
4. В южной тайге и зоне хвойно-широколиственных лесов, напротив, развитие идет по пути уменьшения зависимости фитоценоза от строения почвенного профиля, но по пути адаптации к динамическим свойствам почв, выраженных цветовыми характеристиками. Хвойно-широколиственные фитоценозы на ранних стадиях развиваются сопряженно со свойствами почв, но при приближении к старовозрастной стадии усиливают независимость от внешней среды и внутреннюю прочность структуры.
5. В ландшафтном масштабе количество достоверных межкомпонентных связей по мере приближения к старовозрастной стадии уменьшается, а в местностном – уве-

личивается. Повышение ландшафтного разнообразия приводит к росту разнообразия стратегий развития вертикальной структуры геосистем.

6. Состав плеяд свойств фитоценоза и почв в ходе сукцессии претерпевает изменения, но сохраняет ядро наиболее тесно взаимосвязанных свойств.
7. На поздних стадиях сукцессии в средней тайге возрастает чувствительность фитоценоза к водному режиму почв и окислительно-восстановительным условиям.
8. Внутрифитоценотическая межъярусная сопряженность в ходе восстановительной сукцессии возрастает, особенно среди нижних ярусов фитоценоза.
9. Резонансный уровень отношений между древостоем и рельефом, как правило, не меняется при переходе от всего массива данных к возрастным группам.
10. Чувствительность древостоя к рельефу и устойчивым морфологическими признакам почв (набор и мощности горизонтов) меняется одинаково при смене возрастных стадий.
11. Гипотеза о направленной смене резонансного уровня отношений с рельефом по мере восстановительной сукцессии лесного сообщества в общем случае не подтверждается.
12. По характеру изменений тесноты связей в ходе сукцессий можно судить о степени влияния лесного сообщества на почвы, о мере адаптированности лесопосадок к почвенным условиям, о потенциале устойчивого доминирования древесных пород в ходе сукцессии.

4.8. Синтез геосистем на основе иерархии межкомпонентных отношений

4.8.1. Программа синтеза парциальных геосистем

Итак, на основании вышеизложенного мы знаем следующие признаки полимасштабной организации географического ландшафта, отраженные на рис. 68.

1. Свойства компонентов ландшафта контролируются как внутриуровенными (межкомпонентными) связями (цифра 1 на рис. 68), так и рамочными условями, навязанными вмещающими геосистемами (цифра 2 на рис. 68).
2. Свойства компонентов ландшафта объединяются в несколько взаимонезависимых или слабо связанных друг с другом плеяд, и с разным характерным пространством (цифра 2 на рис. 68). Каждая из плеяд функционирует и варьирует в пространстве согласованно как единое целое под действием того или иного ландшафтоформирующего процесса и поэтому может считаться парциальной геосистемой.
3. Разные свойства одного и того же компонента ландшафта могут контролироваться рамочными условиями разных вмещающих геосистем и влиянию одновременно нескольких уровней вмещающих геосистем (цифра 3 на рис. 68).
4. Свойства компонентов можно сгруппировать по соотношению вкладов в пространственное варьирование процессов, действующих в масштабах геосистем более высокого ранга и косвенно описывамых их рельефом (цифра 4 на рис. 68), и вертикальных межкомпонентных взаимодействий (цифра 1 на рис. 68).
5. Детерминирующее влияние морфолитогенной основы природного комплекса и вмещающих геосистем на свойства почвенно-растительного покрова не может считаться универсальным и повсеместным. Вклад саморазвития вертикальной

структуры лесного ландшафта в ее пространственное варьирование (цифра 6 на рис. 68) может перевешивать роль морфолитогенной основы.

6. Тип межкомпонентных связей варьирует в пространстве ландшафта, что может создавать кажущуюся слабость межкомпонентных связей, если нечетко определен иерархический уровень проявления анализируемой зависимости.
7. Часть дисперсии, необъясняемой внутриуровенными связями и рамочными условиями надсистем, может быть обусловлена пространственным варьированием на более низком иерархическом уровне (цифра 7 на рис. 68).
8. Прочность межкомпонентных связей и состав плеяд взаимосвязанных свойств могут меняться в ходе саморазвития вертикальной структуры природного комплекса, в том числе в ходе сукцессионных изменений.

Исходя из этого однозначно жесткие основания для выделения ландшафтных границ, которые были бы значимы для абсолютно всех свойств ландшафта, вряд ли существуют. Поскольку один из важнейших смыслов ландшафтно-географического исследования состоит в выявлении и разграничении на местности (картографировании) целостных природных систем, намечается следующая программа синтеза парциальных геосистем, реализация которой рассмотрена ниже.

На первом шаге идентифицируем парциальные геосистемы по принципу *приоритетной отзывчивости* некоторой группы свойств почвенно-растительного покрова

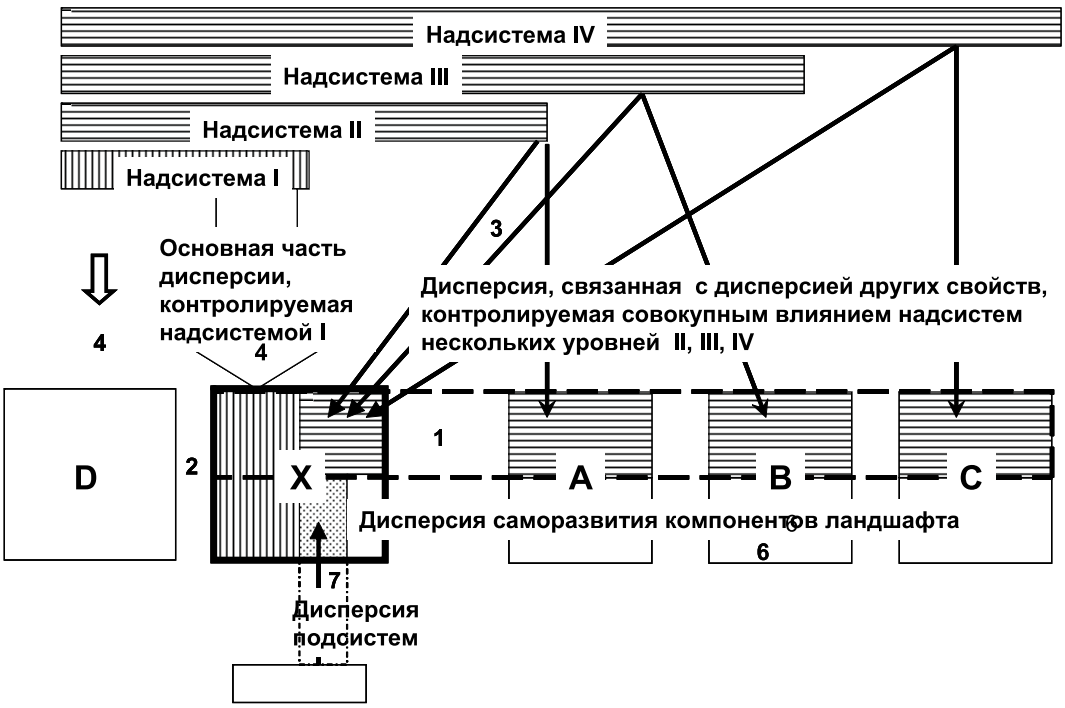

Рис. 68. Схема разделения вкладов в дисперсию свойства X. A, B, C, D — свойства других компонентов ландшафта. Пояснения см. в тексте.

(ПРП) к *одному и тому же иерархическому уровню вмещающих геосистем*. Следовательно, допускается наличие некоторого системообразующего процесса (современного или действовавшего в прошлом), характерное пространство которого приблизительно соответствует размеру вмещающей геосистемы. Связи свойств внутри плеяды на этом шаге не постулируются. Этот способ описания части дисперсии свойства показан в разделе 4.4. Его можно отнести к группе *дедуктивны*х. Выдвигается гипотеза о существовании некоторого иерархического уровня организации рельефа и оответствующего ландшафтоформирующего процесса. Границы предполагаемых геосистем определяются на основе классификации рельефа. Затем выявляются реальные свойства ландшафта, которые «вписываются» в заданные границы, то есть отзывчивы к рельефообразующим процессам данного масштаба. Результирующую картографическую модель можно назвать *двухуровневой*, поскольку картографирование производится на основании статистически значимых отношений между свойствами ОТЕ (первый уровень) и свойствами вмещающей геосистемы какого-то одного размера, оказывающей приоритетное влияние (второй уровень).

Однако на этом шаге мы не имеем оснований уверенно утверждать, что за чувствительностью разных свойств к одному и тому же уровню вмещающей геосистемы стоит единый процесс и что зависимость однотипна для всех свойств. Например, два свойства растительного покрова, чувствительные, соответственно, к влажности и трофности, могут варьировать в зависимости от рельефа вмещающей геосистемы одного и того же размера. Пусть классификация рельефа по морфометрическим свойствам этой окрестности хорошо различает днище долины (с такими признаками, как глубокое расчленение окрестности, вогнутая форма), крутой склон долины (глубокое расчленение окрестности, выпуклая форма) и прибровочную часть междуречья (малое расчленение окрестности, прямая форма). Единым фактором обособления этих геосистем послужили эрозионные процессы. Влажность может быть высокой в днище и на слабодренированном междуречье, но низкой на склоне, а трофность высока на склоне и в днище, но низка на междуречье. Таким образом два свойства не связаны друг с другом причинно-следственной связью но подчиняются вмещающей геосистеме одного и того же размера.

Поэтому **на втором шаге** необходимо описать еще одну составляющую часть дисперсии и для этого составляем *плеяды взаимосвязанных свойств ландшафта* и схемы отношений между плеядами. В каждой плеяде для каждого свойства устанавливаем *соотношение вкладов внутриуровенных (вертикальных) межкомпонентных связей* (цифра 6 на рис. 68) *и межуровневых связей, отражающих рамочные условия, накладываемые вмещающими геосистемами* и индицируемые по морфометрическим свойствам их рельефа (цифра 3 на рис. 68). На этом шаге описываемая часть дисперсии, обусловленная межуровневыми связями, частично пересекается с дисперсией, описанной в предыдущем абзаце и обусловленной влиянием только одного — самого главного — уровня вмещающих геосистем, но больше или равна ей, поскольку учитывает совокупное влияние нескольких уровней вмещающих геосистем. По результатам сравнения вкладов принимаем решение, есть ли необходимость в картографировании *многоуровневых парциальных геосистем*, т.е. картографировании с учетом рамочных условий нескольких уровней вмещающих геосистем. Такая необходимость возникает, если все или некоторые свойства, составляющие плеяду, варьируют в пространстве сопряженно с варьированием свойств вмещающих геосистем *нескольких* размеров. Ины-

ми словами — если варьирование свойства не описывается без привлечения гипотезы полимасштабности. Если же более значимым оказывается вклад внутриуровенных вертикальных межкомпонентных связей (преимущественно почвенно-растительных и внутрифитоценотических), то картографирование парциальных геосистем возможно без привлечения информации о рельефе вмещающих геосистем. **На третьем шаге** производится поиск оптимальной мультирегрессионной модели, отражающей сопряженное варьирование свойств, входящих в каждую плеяду. Для этого члены плеяды поочередно ставятся на место зависимой переменной, а остальные члены выступают как независимые. Выбирается уравнение с максимальным коэффициентом детерминации. Таким образом, выявляется свойство — *ядро плеяды*, которое в максимальной степени аккумулирует информацию о состоянии свойств остальных членов плеяды.

На четвертом шаге определяется ареал, в пределах которого свойства, входящие в плеяду, строго подчиняются единому фактору дифференциации. Иными словами, определяются интервалы значений свойств ландшафта, при которых достигается максимальное качество модели связей в плеяде. Принадлежность к такому ареалу определяется минимальной *разницей* между наблюдаемыми и предсказанными моделью значениями (*минимальными остатками*). Это позволяет выявить ареал *парагенетической системы-геохоры*, внутренняя мозаичность которой определяется разными количественными уровнями проявления одного и того же фактора.

На пятом шаге мозаичная по свойствам парагенетическая геохора разделяется на пространственные единицы (парциальные геосистемы) относительно монотонные по свойствам, входящим в рассматриваемую плеяду. Для этого проводится классификация полевых описаний по свойствам компонентов, входящим в плеяду. Если часть дисперсии свойств плеяды контролируется межуровневыми связями, то появляется возможность оценить, какой класс сочетаний свойств ПРП с наибольшей вероятностью может существовать при сочетании свойств рельефа вмещающих геосистем, характерном для каждой ОТЕ. На этом этапе реализуется *индуктивная процедура выявления геосистем*: по взаимосвязанным свойствам ПРП и их чувствительности в свойствам вмещающих геосистем определяются границы парциальных геосистем.

На шестом шаге оценивается степень неопределенности классификационной принадлежности (НКП) для каждой операционной территориальной единицы (Хорошев и др., 2002). Исходим из гипотезы, что существуют постепенные переходы между классами почвенно-растительного покрова: с одной стороны — как приспособление к постепенно меняющимся в пространстве характеристикам морфолитогенной основы и связанных с ней свойств ландшафта, с другой — как следствие саморазвития, внутрифитоценостических отношений, антропогенных нарушений. Если какое-либо сочетание свойств, входящих в плеяду (класс ПРП), встречается исключительно в определенном узком диапазоне собственных свойств рельефа ОТЕ и рельефа вмещающих геосистем, то неопределенность минимальная. В таком случае можно с уверенностью говорить о более или менее детерминированных отношениях в многоуровневой парциальной гесистеме. Если при данном сочетании свойств рельефа с близкими вероятностями могут встречаться разные классы ПРП (неопределенность велика), то можно констатировать неравновесные отношения между морфолитогенной основой ландшафта и ПРП либо наличие ареала континуальных переходов между парциальными геосистемами.

4.8.2. Двухуровневая дедуктивная картографическая модель парциальных геосистем

Рассмотрим подробнее дедуктивную процедуру построения ***двухуровневой картографической модели парциальных геосистем***, основанную на классификации ОТЕ по морфометрическим свойствам рельефа вмещающих геосистем, которые создают рамочные условия для дисперсии ряда свойств почвенно-растительного покрова.

Смысл выделения классов рельефа и соотнесения их с ландшафтными характеристиками на разных иерархических уровнях может быть многозначен.

Во-первых, мы вырабатываем основания для ландшафтного картографирования, т.е. выделения таких однородных в геоморфологическом смысле территорий, которые однородны и по почвенно-растительному покрову. Выявление резонансного уровня взаимодействия тех или иных свойств ландшафта с рельефом (точнее — со свойствами компонентов, контролируемыми рельефом) позволяет установить характеристики ландшафта, наиболее отзывчивые к каждому уровню организации рельефа (а точнее к пространственным изменениям свойств рельефа на данном уровне, к переходам от одного класса рельефа к другому). Например, в Удмуртии на самом высоком уровне организации рельефа с характерными размерами около 6 км имеются основания для подразделения геосистем по признаку соотношения широколиственных и хвойных пород деревьев, т.е. по степени проявления свойств соседних ландшафтных зон в зоне смешанных лесов. Поскольку с соотношением этих групп древесных пород находится в тесной связи группа кустарников (черемуха, шиповник, жимолость распространены «в противофазе» к можжевельнику, волчьеягоднику, крушине), то как сопутствующий классификационный признак можно использовать и состав кустарникового яруса. В то же время, структуры рельефа с характерными размерами 3,6 км хорошо выявляют геосистемы с существенными различиями по влажности местообитания, к которым отзывчивы другая группа древесных пород (способные произрастать на болотах сосна и береза «против» избегающих болот ели, пихты и осины). Поэтому на этом уровне можно подразделить геосистемы на переувлажненные (болотные) и нормально увлажненные (в юго-западной Удмуртии это преимущественно леса свежих гигротопов). В качестве диагностических признаков указываются состав перечисленных выше видов деревьев, а также сопутствующих им кустарников (в переувлажненных геосистемах — красная и черная смородина и крушина, а в мезофитных — лещина, рябина и бересклет). Наконец, к еще более низкому уровню организации рельефа со структурами порядка 2 км, приурочены различия чувствительных к влажности свойств почв. В частности это относится к степени окисленности (с ожелезнением) и оглеенности (с обезжелезнением) почвенного профиля, отражаемой цветовыми характеристиками Hue и Chroma, а также интенсивности преобразования подстилки в гумус (замедляющегося при недостаточной дренированности). Характеристики древесного и кустарникового ярусов на этом уровне можно считать второстепенными и не учитывать в диагностике геосистем.

Во-вторых, сопоставление факторов дифференциации ПРП с уровнями организации рельефа позволяет выявить в первом приближении основные современные и палео- процессы, ответственные за пространственные различия ПРП. Структуры рельефа с характерными размерами 2 км четко показывают не только малые долины, но и их участки с разной морфологией, в том числе концентрирующие и рассеивающие сток. Зная, что к этому уровню чувствительны оглеенность и окисленность почв, можно считать, что с

ним связано перераспределение влаги с грунтовым стоком. В зависимости от рельефа грунтовый сток либо выходит на поверхность (со следствием в виде оглеения почв), либо происходит на значительной глубине от поверхности (со следствием в виде окисленных почв с ярко ожелезненными нижними горизонтами). При этом древесный ярус может отличаться слабо, по крайней мере — по обилию видов (но, разумеется, возможны различия по продуктивности и жизненному состоянию). Одновременно могут существовать те или иные предпочтения древесных видов к описанным контрастам. Например, четыре оси дифференциации древесного яруса и две оси дифференциации травяного яруса достоверно коррелируют с характеристиками рельефа вмещающих геосистем в окрестности 2 км (табл. 13, рис. 37). Тогда следует проверить физический смысл факторов: прежде всего — выяснить, связаны ли они с перераспределением влаги. Интерпретация показывает, что 1-я ось дифференциации кустарникового яруса и 4-я — древесного яруса – это действительно чувствительность к влажности, но для обоих главным является уровень рельефа с иными размерами, а именно — 3,6 км (табл. 13, рис. 37). Следовательно, скорее всего, на них влияет процесс перераспределения влаги иного масштаба и иной природы — накопление влаги в центральных частях междуречий, отток с краевых частей междуречий (по склонам коренных увалов) и аккумуляция в главных долинах, в том числе вследствие наличия длительных пойменных режимов. Последние нехарактерны для долин малых водотоков, которые хорошо распознаются при классификации рельефа по структурам с размерами 2 км. Однако есть и другие факторы, не связанные напрямую с влажностью, но чувствительные к контрастам структур рельефа с размерами 2 км. Они интерпретированы как соотношение хвойных и широколиственных пород деревьев (1-я ось дифференциации древостоя), соотношение нетребовательной к минеральному питанию сосны и более требовательных пород (2-я ось дифференциации древостоя) и сукцессионное состояние (3-я ось дифференциации древостоя) (табл. 13, рис. 37). С одной стороны, это указывает на различия структур рельефа размером 2 км не только по влажности, но и по составу почвообразующих отложений, а также по приуроченности рубок и посадок разного времени к разным позициям в рельефе. Иначе говоря, возможны независимые друг от друга процессы одного масштаба. С другой стороны, логично предположить перемещение минеральных веществ вместе с потоками влаги. Безусловно, разгрузка щелочных (вследствие контакта с коренными пермскими породами увалов) грунтовых вод на склонах малых долин благоприятствует развитию широколиственных пород деревьев (клен, вяз, липа). В нижних же частях склонов крупных долин характерен песчаный чехол, благоприятный для сосны. Условно коренные старовозрастные леса сохранились в крутосклонных верховьях оврагов, а лиственные молодняки после рубок 1970–1980-х гг. господствуют на широких плоских междуречьях. С третьей стороны, у всех перечисленных факторов хотя и наблюдается достоверная связь со структурами размером 2 км, но основной резонансный уровень — все-таки 6 км (табл. 13, рис. 37), и значит, речь идет о вложенности структур размером 2 км в структуры размером 6 км. Покатая часть склона увала, выделяемая классификацией рельефа в окрестности 2 км, одновременно является частью всего склона увала, т.е. более крупной единицы, для выделения которой как геоморфологического единства необходима классификация в окрестности 6 км.

Представим результаты применения дедуктивной процедуры для построения серии двухуровневых моделей парциальных геосистем для модельных регионов.

Для **хвойно-широколиственнолесного ландшафта юго-западной Удмуртии** установлена следующая схема иерархии геосистем.

Крупные макроформы рельефа, разделяемые классификацией ОТЕ по морфометрическим свойствам рельефа окрестности со стороной 6000 м, контролируют основную часть дифференциации древесного и кустарникового ярусов и значительную (вторую по значимости) часть дифференциации травяного яруса и гумусонакопления в почвах. Таким образом, выделяются две группы ПТК уровня примерно местности, одна из которых более близка к бореальным, а другая — к неморальным условиям. В первом приближении это — широкие поверхности увалов с липодубравами черемухово-лещиновыми чистотеловыми и склоны увалов с сосняками и ельниками шиповниково-жимолостно-можжевеловыми золотарниково-щитовниковыми или нитрофильно-разнотравными. Подчеркнем, что в силу особенностей увалистого рельефа региона четкие структурные линии рельефа (по А.Н. Ласточкину, 2011) практически не выражены. Поэтому примененный метод позволяет найти ландшафтные границы при весьма постепенном изменении свойств рельефа.

На фоне этих крупных местностей существуют геосистемы с примерными линейными размерами 3600 м, контрастные по условиям дренирования и различающиеся по составу кустарникового яруса и интенсивности промывного режима почв. Противопоставляются сообщества со смородиной или ивой на постоянно переувлажненных оглеенных почвах и сообщества с рябиной, лещиной, бересклетом на оподзоленных отбеленных (т. е. с высоким значением цветовой характеристики Value) периодически дренируемых почвах.

Более дробное подразделение, учитывающее особенности травяного и кустарничкового ярусов и строения почвенного профиля, может основываться на признаках независимых от рельефа при данном разрешении цифровой модели (400 м). Установлена независимость ведущих осей дифференциации трав (ось азотообеспеченности 1), кустарничков (оси трофности 1 и дренирования 2) и почвенных горизонтов (ось дренированности 1) от механического состава почв, что заставляет отвергнуть гипотезу о значимости радиальных потоков элементов минерального питания и влаги. Гипотеза о зависимости от состояния древесного яруса как возможного эдификатора видового состава трав и кустарничков также отвергается на основании недостоверности нелинейных мультирегрессионных моделей 2-й степени. Предпочитается гипотеза о значимости не улавливаемых моделью рельефа выбранного разрешения форм микрорельефа или элементов форм мезорельефа. Вероятно, это указывает на необходимость разделения ПТК на достаточно низком уровне иерархии по особенностям травяного и кустарничкового ярусов и строения почвенного профиля в зависимости от локальных особенностей микрорельефа. Тогда потребуется разделение, например, сообществ брусничных ортилиево-ожиковых (также орляковых) и костянично-пролесниковых (также борцово-крапивных) или разделения ПТК на почвах торфянистого и подзолистого рядов. Возможно, для отражения дифференциации по этим признакам потребуется несколько разных уровней, связанных с элементами форм мезорельефа и микрорельефом.

Приведем содержательное описание классов ландшафтного покрова Удмуртии, выделенных в рамках двухуровневой модели парциальных геосистем на основе классификации рельефа по морфометрическим свойствам в окрестности 6000 м (рис. 42, В). Для 14 переменных-осей из 34 этот уровень вмещающих геосистем определен как резонансный. Принадлежность к классу рельефа выступала как группирующая перемен-

ная дискриминантного анализа. Зависимыми переменными были все оси дифференциации свойств компонентов. Корректность распознавания классов рельефа по свойствам ПРП составила 61%. 14 переменных-осей, для которых определен резонансный уровень вмещающих геосистем со средними размерами 6 км, позволяют распознать выделенные классы рельефа с коэффициентом Wilks-Lambda 0,16 (для 20 переменных-осей, для которых этот уровень не является резонансным или вообще связь недостоверна, — 0,32).

Отдельно оценивалось качество распознавания классов рельефа по группам свойств отдельных компонентов и ярусов фитоценоза. Еще раз подчеркнем, что речь идет исключительно о контрастах не ниже урочищного уровня, так как используемая цифровая модель рельефа имеет довольно грубое разрешение — 400 м. Безусловно, для объяснения варьирования многих, если не всех свойств ПРП требуется ЦМР более высокого разрешения, способная отразить варьрование фациального уровня.

Охарактеризуем выделенные классы рельефа по распознаваемым ими свойствам ПРП (рис. 42, В).

Класс 1. Придолинные склоны, пологие, слаборасчлененные с осиново-березовыми лесами на дерново-глубокоподзолистых песчаных и суглинистых почвах с мощной подстилкой. Точность выделения — 42%, пересекается по свойствам с классами 3 (более вогнутые и низкие позиции), 5 (более выпуклые и верхние позиции). Характерен для бассейна Казанки и верховьев Ныши и Сюги. Часто соответствует распаханным краевым частям междуречий. Наиболее своеобразен по составу древесного яруса (точность распознавания 42%) и мохового яруса (точность распознавания 42%).

Класс 2. Долины пологосклонные слабоврезанные плоскодонные с сосново-еловыми лесами с подростом пихты и липы на перегнойно-слабоподзолистых песчаных и супесчаных почвах с облегчением механического состава книзу. Класс очень своеобразен, не пересекается с водораздельными классами. Совершенно не встречаются суглинистые и лессовые почвы, что знаменует четкую геоморфологическую приуроченность песчаных отложений, прислоненных к пологим склонам долин. Точность распознавания 80%. Характерен для бассейна Казанки и верховьев Ныши и Сюги. Как правило, не распахивается, используется для лесозаготовок или служит как элемент экологического каркаса. Наиболее своеобразен по составу травяного яруса (точность распознавания 50%), кустарникового яруса (точность распознавания 50%), механическому составу почв (точность распознавания 40%).

Класс 3. Долины расширенные пологосклонные, плоскодонные, обычно в местах ветвления и слияния, с примыкающими придолинными склонами, с елово-осиново-березовыми лесами с подростом пихты и липы на мелкодерново-глубокоподзолистых песчаных и суглинистых почвах. Часто охватывает округлые междуречья-мысы, удаляясь от места слияния рек на расстояние примерно равное ширине междуречья между ними. По характеристикам иногда приближаются к водосборным и соседствующим элементам 1-го класса; при этом никогда не пересекается с водораздельными классами. Точность распознавания 53%. Характерен для бассейна Казанки и верховьев Ныши и Сюги. Повышенным своеобразием по отдельным компонентам не обладает.

Класс 4. Долины широкие, глубоко врезанные в коренные породы, с густорасчлененными покатыми склонами коренных увалов с прислоненными песками с сосново-еловыми с подростом ели и пихты лесами на перегнойно-подзолистых с вложенным подзолом почвах по склонам, с лугами, ивняками и сосняками на аллювиальных поч-

вах в днище. Наиболее своеобразен по сравнению с другими классами, встречается только в нижней части бассейна Ныши и Валы. Точность распознавания 93%. Почти повсеместно распахан, лишь с фрагментами лесов, играющими роль экологического каркаса, частично восстановленными. Наиболее своеобразен по составу кустарникового яруса — лещина, красная смородина, малина, бузина (точность распознавания 73%), цвета почв (точность распознавания 40%), механическому составу почв (точность распознавания 40%).

Класс 5. Краевые выпуклые мелкорасчлененные пологосклонные части междуречий в зонах формирования стока с елово-сосново-березовыми с подростом ели, пихты и липы лесами на глубокодерново-мелкоподзолистых обычно песчаных почвах. Точность распознавания 55%, по характеристикам может пересекаться с соседними классами 1 и 6. Не может встречаться на суглинистых и лессовых почвах. Обладает наибольшим своеобразием по составу древесного яруса (точность распознавания 55%), мощности почвенных горизонтов (44%).

Класс 6. Покатые вогнутые придолинные склоны увалов к неглубоковрезанным долинам с липово-елово-березово-осиновыми лесами с обильным подростом липы, вяза и клена на развитых глубокодерново-подзолистых почвах разного механического состава, но в целом с утяжелением книзу. Точность распознавания 46%, характеристики могут пересекаться со всеми классами, больше всего — с 1 классом. Представляет наиболее ярко выраженный переходный вариант ландшафта между неморальными и бореальными местообитаниями, имеет широкую экологическую амплитуду по минеральному питанию. Возможно, в наибольшей степени может быть подвержен изменениям структуры при внешнем воздействии, т.е. пластичен. Наиболее типичны вторичные варианты древостоя с хорошо выраженным широколиственным подростом, но практически всегда с подростом пихты и ели. При этом в коренных пихтово-еловых лесах широколиственного подроста нет, что смотрится как отклонения от «нормы». Хозяйственное использование также может быть разнообразное. Видимо, этот вид геосистем принадлежит к триггерной категории (Арманд, Ведюшкин, 1989; Арманд, 2006), допускающей два зональных состояния, что часто определяется двучленностью субстрата. Возможно, соответствует верхней краевой части прислоненного песчано-супесчаного плаща поверх коренных суглинков, мощность которого в этой зоне варьирует, создавая мозаику местообитаний в равной мере пригодных для бореальных и неморальных видов. Наиболее своеобразен по мощности почвенных горизонтов (точность распознавания 30%).

Класс 7. Плоские нерасчлененные водораздельные поверхности с максимальной вертикальной выпуклостью (т.е. с примыканием по краям глубоковрезанных долин) с липово-березовыми лесами с подростом клена, липы, ели, вяза на глубокодерново-подзолистых почвах, местами с торфяниками и вложенными подзолами. Механический состав почв может быть в широком диапазоне, но с тенденцией облегчения книзу. Абсолютно своеобразная группа, корректность выделения 100%. Встречается на Вала-Вятском и Казанско-Вятском водоразделах, в основном на отметках 170–200 м, но только при слабом расчленении. На подобных высотах в бассейне Валы не встречается. Возможно, это указывает на разные ландшафтные свойства геоморфологически единого уровня, обусловленные эрозионно-неотектонической переработкой. Наиболее своеобразен по составу древесного яруса (точность распознавания 71%), травяного яруса (точность распознавания 75%), цвету почв (точность распознавания 57%).

Класс 8. Густорасчлененные привершинные покатые и пологие части коренных увалов с пихтово-сосново-еловыми лесами с подростом ели и пихты на дерново-среднеподзолистых двучленных и суглинистых почвах с мощной подстилкой. Встречается преимущественно в бассейне Ныши и Валы, реже — Казанки. Очень своеобразен за счет сохранения условно-коренных хвойных лесов в крутосклонных позициях рельефа по склонам оврагов. Корректность распознавания 87%. Наиболее своеобразен по составу древесного яруса (точность распознавания 50%), травяного яруса (50%), кустарникового яруса (62%), мохового яруса (87%), цвету почв (75%).

Класс 9. Куполообразные и мысообразные слаборасчлененные междуречья с максимальной горизонтальной кривизной с липово-березово-осиново-еловыми лесами с подростом липы, клена, вяза, ели на мелкодерново-глубокоподзолистых супесчаных и двучленных почвах. Частично пересекается по свойствам с классом 6. Корректность выделения 70%. Возможно, представляет собой высокие остаточные поверхности, краевые части которых подверглась эрозионной переработке и перешли в другие классы. Класс 9 при этом может рассматриваться как более хорошо сохранившиеся внутренние части той же поверхности. Наиболее своеобразен по составу древесного яруса (точность распознавания 45%), травяного яруса (41%).

В условиях нечетких геоморфологических границ пологоувалистого ландшафта представляет интерес сравнение эффективности применения традиционной структурно-генетической и морфометрической классификаций рельефа для выделения целостных ландшафтных геосистем. В табл. 29 приводятся результаты такого сравнения. В целом генетическая классификация рельефа (с выделением междуречных поверхностей, склонов, террас, пойм, балок и др.) в Удмуртии лучше отражает комплексную ландшафтную дифференциацию, чем морфометрическая. Однако по отдельным компонентам ситуация может быть противоположная. Так, дифференциация древесного, кустарничкового ярусов и цвета почв лучше подчиняется морфометрической классификации, а травяного, кустарникового ярусов и мощностей горизонтов — генетической. В любом случае неполная дискриминация объясняется действием многочисленных неучтенных факторов, на что уже указывалось в литературе (del Barrio et al., 1997).

Для южнотаежного ландшафта **Кологривского района Костромской области** установлена следующая схема иерархии геосистем. при размерах ОТЕ 400 м.

Наиболее широкоохватные факторы имеют резонансные отношения с рельефом окрестностей размером около 12000 м. К ним относятся вторые по значимости оси дифференциации трав (ось возраста древостоя, т.е. соответствия трав стадии восстановительной сукцессии) и мхов (ось дренированности). Этим отделяются заболоченные ПТК с господством сфагнума, характерные для внутренних частей наименее расчлененных междуречий, от преобладающих дренированных зеленомошных ПТК. Нечувствительность первостепенных осей дифференциации свойств к данному уровню не дает оснований придавать ему ведущее значение в обособлении геосистем несмотря на большие размеры. Для южной тайги возвышенной провинции Северных Увалов, в отличие от средней тайги, фактор заболачивания имеет относительно небольшое значение и создает редкие ПТК.

На высоком уровне геосистем с линейными размерами около 6000 м наиболее существенными индикаторами ландшафтных контрастов служат оси трофности кустарников и мхов, что позволяет разделить: а) геосистемы закустаренные, с богатыми нитрофильными или неморальными местообитаниями зеленомошные; б) геосистемы без кустарников — боровые, с можжевельником или болотные.

Таблица. 29.

Дискриминация групп свойств компонентов классами рельефа, выделенными по морфометрическим свойствам рельефа в квадратной окрестности 6 км и по генетическому принципу. Коэффициент Wilks-Lambda (чем ближе к 0, тем лучше дискриминация). Смешаннолесной ландшафт в Удмуртии.

Группы свойств	Морфометрическая классификация в квадрате 6000 м Разрешение цифровой модели рельефа 400 м			Генетическая классификация			
	Количество классов рельефа			Количество классов рельефа			
	9	6	3	3	5	6	7
4 оси дифференциации трав	0,53	0,76	0,92	0,78	0,75	0,74	0,71
4 оси дифференциации деревьев	0,48	0,44	0,65	0,79	0,52	0,52	0,38
4 оси дифференциации кустарников	0,58	0,73	0,84	0,86	0,74	0,69	0,68
2 оси дифференциации кустарничков	0,83	0,88	0,96	0,98	0,96	0,95	0,93
4 оси дифференциации мощности почвенных горизонтов	0,76	0,68	0,82	0,86	0,70	0,68	0,67
4 оси дифференциации цвета почв	0,70	0,76	0,80	0,85	0,82	0,78	0,77
4 оси дифференциации механического состава почва	0,83	0,83	0,94	0,98	0,90	0,88	0,82
Все 26 осей дифференциации	0,08	0,18	0,44	0,38	0 ,15	0,12	0,08

На следующем уровне с линейными размерами форм рельефа 4400 м проявляется дифференциация большинства осей дифференциации растительного покрова. Ведущее значение придается контрасту древесной растительности в зависимости от обеспеченности минеральным питанием. Он проявляется в формировании либо типично таежных боровых либо экстразональных для Кологривского района широколиственно-темнохвойных сообществ. На местности это соответствует различию ПТК: а) с березово-сосновыми (обычно по песчаным террасам и моренно-водноледниковым междуречным равнинам) и б) кленово-липово-пихтово-еловыми лесами, обычно по более расчлененным междуречьям с покровом лессовидных суглинков. На этом же уровне проявляются и различия во влажности, контролирующие состав кустарникового и кустарничкового ярусов. Более влажные слаборасчлененные территории, в том числе

волнистые террасы, характеризуются появлением в лесах бореальных болотных кустарничков, а дренированные — черники. На этом же уровне разделяются сухие боры террас Унжи и влажные сероольшаники малых долин. Это уровень, соответствующий размерам долины Унжи, междуречий между ее притоками первого порядка. Возможно, есть необходимость разным сочетаниям этих компонентов придавать диагностическое значение на разных формах макрорельефа: боры грив с болотными кустарничками в межгривных понижениях, ольшаники глубоковрезанных долин, субнеморальные леса чернично-костяничные по дренированным междуречьям.

На более низких уровнях (1200, 2000, 2800 м) диагностическими признаками ПТК, находящимися в резонансных отношениях с рельефом становятся свойства травяного яруса и почв, чувствительные к дренированию и степени выноса вещества из почв. Границы ПТК этих низших уровней будут близки к размерам крупных мезоформ рельефа и переходных зон между ними.

Для среднетаежного ландшафта **Архангельской области** (полигон «Заячья») установлена следующая схема иерархии геосистем при размерах ОТЕ 400 м.

Уровень рельефа со средними линейными размерами структур 1200 м является резонансным для группы осей, ответственных за дифференциацию травостоя, кустарничкового яруса, кустарникового яруса, почв, в том числе первых по значимости осей; древостой и мхи к этому уровню нечувствительны (см. раздел 4.4). Поэтому есть основания рассматривать классификацию рельефа по морфометрическим свойствам в окрестности 1200 м как каркас карты геосистем, выделенных дедуктивным способом, как это продемонстрировано выше для Удмуртии. Она выглядит следующим образом (рис. 69). Подразумевается, что если несколько ОТЕ принадлежат геосистемам со сходными структурами рельефа с линейным размером 1200 м, то и характеристики ПРП, описываемыми данной группой факторов, у них должны быть сходными. Карта отчетливо показывает характерную для модельного ландшафта полосчатость, связанную с системой неотектонических нарушений северо-западного простирания (Хорошев, 2003), которая, безусловно, отражается на степени дренированности и степени экранированности коренных карбонатных пород четвертичными отложениями.

Эта карта демонстрирует следующую логику рассуждений: «Принадлежность к данному классу рельефа определяет такое-то сочетание свойств ПРП, чувствительных к данному иерархическому уровню организации рельефа вмещающих геосистем». Иначе говоря, карта отражает *детерминистский взгляд на отношения абиотических, биотических и биокосных компонентов ландшафта*. Отличие от традиционной модели морфологической структуры ландшафта заключается в двух аспектах. Во-первых, границы проводятся на основании формальных количественных критериев, исключающих субъективизм, за который часто критиковали и критикуют традиционное ландшафтное картографирование (Арманд, 1975; Ласточкин, 2011; Колбовский, 2013). Во-вторых, критерием проведения границ выступают эмерджентные свойства сочетания пространственных единиц, а не усредненная характеристика индивидуальной единицы.

Сформулируем задачу иначе — так, чтобы карта отражала следующую логику: «При таком-то сочетании свойств рельефа в данной окрестности наиболее вероятен такой-то класс свойств почвенно-растительного покрова чувствительных к данному иерархическому уровню организации рельефа». При такой формулировке мы допускаем, что

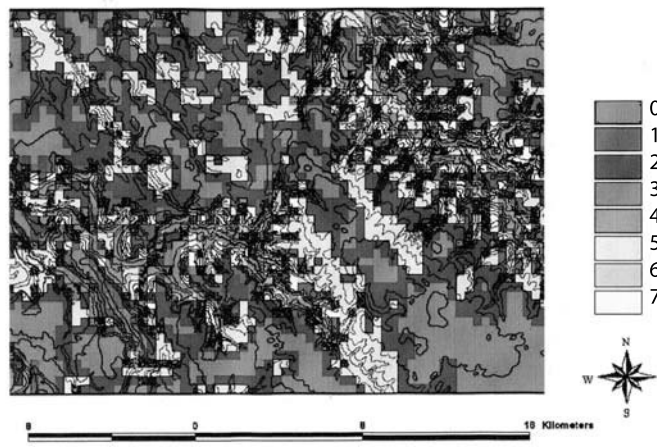

Рис. 69. Классы геосистем среднетаежного ландшафта в Архангельской области (полигон «Заячья»), выделенные на основе классификации операционных территориальных единиц по морфометрическим свойствам рельефа в квадратной окрестности со стороной 1200 м. Разрешение цифровой модели рельефа 400 м.

отношения между морфолитогенной основой и ПРП могут не быть строго детерминированными. Для каждого класса ПРП допускается не только существование специфичных именно для него условий рельефа, но и некоторая вероятность, что этот класс может существовать и при не совсем «привычных» для него условиях рельефа. Тогда на карте показывается возможный класс ПРП, наиболее часто встречающийся в подобных геоморфологических условиях.

Для создания такой *двухуровневой картографической модели* на примере среднетаежного ландшафта в Архангельской области выполнены следующие операции.

По совокупности осей дифференциации ПРП, наиболее чувствительных к рельефу в окрестности с линейным размером 1200 м, методом к-средних выделены 8 классов. Таким образом, составлена обучающая выборка. Методом дискриминантного анализа определена корректность различения (дискриминации) выделенными 8 классами ПРП морфометрических характеристик рельефа в окрестности 1200 м. Корректность составила 26%. Лучше всего распознаются рельефом 3, 5, 6, 8 классы ПРП. На основе обучающей выборки рассчитаны вероятности встречаемости каждого из 8 классов ПРП для каждого пиксела, не обеспеченного полевыми описаниями, но с известными морфометрическими характеристиками окрестности 1200 м. На основании наибольшего из восьми значений вероятности на карту нанесена принадлежность к классу ПРП (рис. 70, А). Таким образом, карта отражает наиболее вероятный класс ПРП (точнее группы его характеристик, чувствительных к трофности и влажности) в пределах ОТЕ при данных морфометрических условиях рельефа в окрестности со стороной 1200 м. Эта карта более корректно учитывает варианты приуроченности полевых данных к форма рельефа данного иерархического уровня, чем карта на рис. 69. Следует сделать оговорку, что класс ПРП тоже определяется с некоторой ошибкой, которая измеряется в ста-

тистических программах дистанцией от центра класса. В принципе на этом основании можно выделить «подклассы».

Анализируя полученную карту, видим достаточно закономерное расположение наиболее вероятных классов ПРП.

В густорасчлененных вогнутых позициях, соответствующих малым долинам, глубоким ложбинам, некоторым участкам днища долины Заячьей, формируются хорошо дренированные геосистемы 6 класса с сочетанием и гумусовых, и подзолистых (часто старопахотных) горизонтов, господством брусники в кустарничковом ярусе, малины — в кустарниковом, с травостоем из кислицы, костяники с участием неморальных видов (сныти, копытня, медуницы).

Еще более дренированные и богатые местообитания соответствуют геосистемам класса 3, встречающимся компактным ареалом на выпуклых крутых склонах глубоковрезанных малых и больших (Заячьей и Соденьги) долин с выходами мергелей на поверхность. Основная часть этих геосистем давно распахана, но по растительности на оставшихся под лесом краевых участках ареала можно судить о естественном их состоянии. Для этих геосистем характерно: максимальная гумусированность почв класса рендзин при минимальной или вообще отсутствующей оподзоленности, кис-

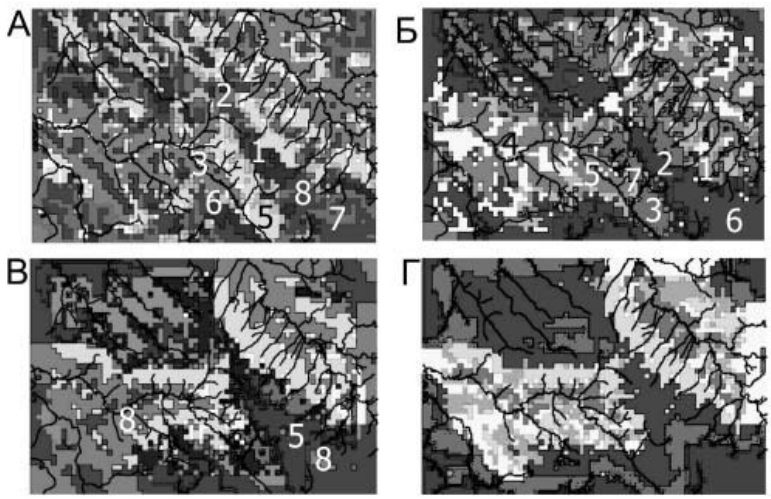

Рис. 70. Двухуровневые картографические модели наиболее вероятных парциальных геосистем среднетаежного ландшафта в Архангельской области (полигон «Заячья»).
Разрешение цифровой модели рельефа 400 м. А — 8 классов геосистем со средними линейными размерами 1200 м по чувствительности в основном трав, кустарничков, почв. Б — 8 классов геосистем со средними линейными размерами 2000 м по чувствительности в основном деревьев, кустарников, мехсостава. В — 8 классов геосистем со средними линейными размерами 3600 м по чувствительности в основном почвенных горизонтов и малозначительных факторов кустарников и кустарничков. Г — Классы рельефа, выделенные на основе классификации операционных территориальных единиц по морфометрическим свойствам рельефа в квадратной окрестности со стороной 3600 м. Номера классов и пояснения — см. в тексте.

лично-снытевые с костяникой и малиной сообщества, слабое развитие или отсутствие бореальных кустарничков черники и брусники.

Менее дренированные и богатые, но без накопления неразложившейся органики, геосистемы соответствуют преимущественно ровным пологим склонам долин, непосредственно примыкающих сверху к полосам интенсивного эрозионного вреза, то есть выше основных линий разрывных нарушений (класс 5). В верховьях Заячьей эти геосистемы выходят непосредственно к днищу долины. В среднем ее течении, где река вступает в зону наибольшего дробления и вреза в пермские породы, поднимаются к придолинным склонам междуречий. При этом нижней границей их ареала может становиться линия разрывных нарушений более низкого порядка (например, верхнее течение Стругницы, разветвление в верховьях ручья Медвежьего, верховья Мостницы). В отличие от предыдущих классов, здесь возможно присутствие верховодки в почвенном профиле. Глубокое оподзоливание свидетельствует как о возможности сезонного весеннего оглеения, так и о смене его интенсивным промыванием в летний период при отсутствии постоянного подпора верховодкой. Травостой становится более бореальным с абсолютным господством кисличной группы типов леса с небольшим участием сныти, но с очень слабым развитием кустарничков. О достаточно высоком, по сравнению с типичными таежными условиями, минеральном питании свидетельствует высокое обилие смородины и малины, что частично может объясняться наследием былой распашки, индицируемой по частой встречаемости старопахотных горизонтов.

В совокупности ареалы распространения классов 3, 5 и 6 соответствуют высокой потенциальной пригодности для земледелия, который по-прежнему в полной мере реализуется для геосистем класса 3, частично — для класса 6. Однако геосистемы класса 5 в течение второй половины XX века в силу удаленности от населенных пунктов практически полностью изъяты из сельскохозяйственного использования и поросли мелколиственным лесом (рис. 45). С точки зрения лесопользования это наиболее выгодные выдела. Они имеют высокое потенциальное качество древостоя (ельники-кисличники), благоприятные условия работы техники, а также относительно удалены от наиболее экологически уязвимых участков речных долин.

Геосистемы класса 2 в основном соседствуют с классом 5, занимая менее расчлененные, но все же слабовыпуклые позиции локальных междуречий между притоками Заячьей и Соденьги. Ареал их менее компактен в силу разорванности малыми долинами. Старопахотные горизонты здесь также встречаются, но, видимо, эти поля были заброшены в первую очередь в силу явных признаков нарастающего переувлажнения. Об этом свидетельствуют постоянно присутствующие органогенные торфяные горизонты, сокращение по сравнению с классами 5 и 6 глубины оподзоливания из-за длительного высокого положения верховодки, максимальное обилие бореальных видов — черники, брусники, седмичника, полное отсутствие неморальных видов травостоя, высокая встречаемость ивы.

Геосистемы класса 4 распространены спорадически и четко соответствуют средним по расчлененности участкам придолинных секторов междуречий. Для них характерно: глубокая оподзоленность, высокое обилие бореальных кустарничков (черники, брусники) и трав (грушанка, седмичник, кислица), частое присутствие влаголюбивых ив, осок и ятрышников. Территории подвергались распашке, особенно вблизи населенных пунктов, но в постсоветский период были заброшены как требующие осушительных мелиораций (рис. 45).

Геосистемы остальных классов 1, 7, 8 находятся за пределами условий, пригодных для сельскохозяйственного освоения в связи как с бедным минеральным питанием и избыточной увлажненностью, так и удаленностью от главных очагов освоения. Они выстраиваются в ряд по снижению расчлененности рельефа, возрастанию торфонакопления: класс 1 – класс 2 – класс 8 – класс 7. В этом ряду бореальные виды постепенно вытесняются гидрофильными и болотными, а неморальные практически отсутствуют. Классы 7 и 8 отличаются пониженной мощностью песчано-супесчаного чехла, что способствует более высокому положению водоупорного суглинистого слоя.

В описанном варианте классификации геосистем, основанной на соответствии ПРП морфометрическим характеристикам структур рельефа с линейными размерами не более 1200 м, отсутствуют признаки древесного и мохового ярусов. При наличии некоторых достоверных связей этот уровень организации рельефа не является для них основным. Эрозионное расчленение территории не служит достаточным основанием для варьирования видового состава довольно однообразного древостоя средней тайги Европейской части России. Соотношение ели, сосны, березы и осины в большой степени определяется историей рубок. Однако следует признать, что характеристики продуктивности (бонитет, запас древесины и т.п.) не могут не отличаться между геосистемами перечисленных классов. Например, максимальные диаметры и высоты древостоя наблюдаются в классе 6, а сомкнутость крон — в классе 5, то есть в классах с оптимальной степенью дренированности и обеспеченности минеральным питанием. Однако минимальных значений эти показатели достигают в еще более хорошо дренированном и плодородном классе 3, что легко объясняется небольшим возрастом древостоев, восстанавливающихся после рубок и распашки в наиболее легкодоступных частях территории.

Сравнивая карту наиболее вероятных классов ПРП (рис. 70) с картой классов геосистем на основе классов рельефа (рис. 69) обращаем внимание на ряд отличий. Карта наиболее вероятных классов ПРП показывает большее разнобразие на водораздельных поверхностях и меньшее — в глубоковрезанных долинах. Следовательно, постепенные переходы между геосистемами с размерами 1200 м в густорасчлененных секторах не столь значимы для ПРП, который остается в рамках диапазона дренированных богатых местообитаний с субнеморальными свойствами фитоценозов и активным гумусонакоплением в почвах. При этом четко выделяются в отдельный класс песчаные террасы расширенных днищ с лесами бореального облика. В силу ширины днища террасы не везде полностью перекрыты делювиальным чехлом, материал которого обогащен основаниями, смытыми с крутых коренных склонов. На приводораздельных поверхностях при похожем плоском собственном рельефе урочищ фактор соседства вносит существенные коррективы в условия дренированности, притока и оттока элементов минерального питания, особенно на суженных междуречьях в Мостницкой местности. В то же время выделяется особый класс на наиболее широких частях водораздельных поверхностей, подверженных верховому заболачиванию. Как класс рельефа этот ареал может быть выделен только при классификации по окрестности с линейным размером 2000 м.

Карта геосистем, построенная на основе изучения отношений осей дифференциации ПРП со структурами рельефа со средними размерами 2000 м (рис. 70, Б) (корректность 26%, при классификации по всем без исключения осям дифференциации компонентов — 27%) в целом похожа, но игнорирует эрозионные формы малых долин

и ложбин. Она отражает более крупные группы форм рельефа, образующие своеобразную зональность крупных междуречий и долин. Лучше всего распознаются 1-й, 2-й и 5-й классы. На междуречье Заячьей и Соденьги, особенно на более пологом юго-западном склоне в Гридинской местности, отделены плоская заболоченная поверхность междуречья (класс 2), длинный пологий приводораздельный склон (класс 3), узкая полоса придолинного склона (класс 7) и более крутой расчлененный борт долины Заячьей (класс 5). Наиболее широкие части междуречий выделены в класс 6. В Ростовской местности классификация различает расширенные участки долины с хорошо выраженными широкими песчаными террасами (класс 4) и суженные, где коренной склон приближен к пойме (класс 5). Только наиболее крупные (широкие и глубокие) эрозионные формы различаются классификацией на этом уровне, что подсказывает гипотезу об иных пространственно-временных масштабах по сравнению с предыдущей классификацией. Скорее всего, почвенно-растительный покров на этом уровне приспосабливается к наследию неотектонического дробления территории, находящейся на границе регионов с противоположными тенденциями вертикальных движений (Хорошев, 2005б). Для кустарничков, мхов и первостепенных осей дифференциации трав, подчиняющихся более узколокальным процессам, этот уровень не является резонансным. Основные ландшафтные различия проявляются в древесном и кустарниковом ярусе — прежде всего, в соотношении главных лесообразующих пород — ели и сосны - и вторичных пород березы и осины. Как известно, конкурентоспособность ели и сосны сильно различается в зависимости от состава почвообразующих пород. Наиболее очевидная гипотеза о господстве сосны в урочищах с повышенной мощностью легких отложений подтверждается. Классы 4 и 7, выделяющиеся резким преобладанием сосны над елью в древостоях, имеют переход от супесчаной к суглинистой толще в среднем на глубине 45 см, в то время как при типичном для территории двучленном строении этот контакт находится на глубине 30–35 см (как в классах 1, 2, 3, 6, 8). Класс 5 выделяется на общем фоне слабой выраженностью песчано-супесчаного плаща (что обусловлено близостью мергелей под маломощным суглинистым чехлом) и соответствующим господством осины и серой ольхи.

Характерная особенность ареала класса 4 — рост площади занимаемых им компактных участков по направлению от Заячье-Соденьгского водораздела к долине Кокшеньги. Последняя в валдайское время служила котловиной Важского приледникового озера и ложбиной ледникового стока (Квасов, 1975), что оставило наследие в виде чехла озерно-ледниковых и водноледниковых отложений, с постепенно убывающей мощностью по мере удаления от Кокшеньги. Важным фактором дифференциации песчано-супесчаного плаща по мощности служит ступенчатый характер не только террасовой местности долины Кокшеньги, но и примыкающего к ней с востока междуречья Пукомы и Заячьей, что объясняется дроблением этой территории на параллельные блоки разной высоты (Хорошев, 2003). Чем выше поверхность блока, тем меньше расчлененность рельефа и тем меньше мощность плаща.

Класс 6 и в некоторой степени класс 3 также имеет повышенную долю сосновых древостоев по сравнению с еловыми, что объясняется диаметрально противоположными условиями увлажнения при сходном (низком) уровне трофности. Он соответствует самым высоким уровням водораздельных поверхностей с депрессиями, заполненными торфяными отложениями. Происхождение депрессий, судя по их вытянутой форме и продолжению в виде приямолинейных водосборных ложбин, переходящих в малые

долины, также неотектоническое. Классы 1, 2, 8 отражают разное соотношение обилия четырех лесообразующих пород при общем доминировании ели. Отклонения в сторону большего или меньшего обилия мелколиственных пород объясняются разными сукцессионными стадиями, приуроченность которых определяется последовательностью рубок. Наибольшая доля мелколиственных пород в настоящее время характерна для 1-го и 8-го классов, расположенных в удаленных секторах Заячье-Соденьгского междуречья, где активные рубки начались лишь в 1970–1980-х гг. Значительная часть ареала класса 2 приурочена к относительно легкодоступному междуречью Заячьей и Пукомы, на котором пик лесоразработок пришелся на 1930–1940-е гг. В настоящее время мелколиственный древостой там активно вытесняется из 1 яруса темнохвойным.

Таким образом, основная закономерность распределения лесообразующих древесных пород — связь со структурой неотектонических блоков со средними размерами 2000 м и разным проявлением озерно-ледникового наследия на поверхности блоков разной высоты. Как видим, этот фактор дифференциации принципиально отличается от факторов, действующих на уровне 1200 м. Он в большей степени отражает палеопроцессы, чем современные процессы перераспределения элементов минерального питания и влаги, действующие на уровне 1200 м.

Еще один резонансный уровень отношений с рельефом (то есть размер вмещающей геосистемы) выявлен для первой оси дифференциации мощностей почвенных горизонтов (ответственной за распределение старопахотных и принципиально непригодных для распашки торфяных почв) и малозначимых 4-й оси дифференциации кустарникового яруса и 4-й оси — кустарничкового. Этим факторам соответствует вмещающая геосистема с характерным линейным размером 3600 м (рис. 70, В). Корректность дискриминации свойств рельефа классами ПРП — 24%, причем относительно уверенно распознается только 5 класс. Он отличается максимальной мощностью торфяного горизонта и приурочен к наименее дренированным плоским междуречьям. Однако интерпретация ареалов классов ПРП наталкивается на явное несоответствие полевым данным. Ареал класса 8 в основном сосредоточен в пределах глубокорасчлененной хорошо дренированной Ростовской местности с характерными крутыми склонами долин с выходами коренных мергелей. Аналогичная местность представлена в долине Соденьги. Однако в то же время предсказывается сходный ПРП в слабовогнутом пространстве верховьев правого рукава р. Межницы Заячерецкой и в совершенно плоском пространстве вблизи истоков Заячьей — почти 2 км в поперечнике. Столь явную некорректность следует связывать с малым количеством переменных, для которых этот уровень выступает как резонансный и с низким порядковым номером (то есть низкой значимостью) трудноинтерпретируемых осей дифференциации кустарников (противоположное поведение рябины и можжевельника) и кустарничков (противопоставление брусники багульнику и чернике), возможно отражающих случайные фитоценотические отношения. Поэтому нет серьезных оснований согласиться с гипотезой о существовании значимых для дифференциации ОТЕ вмещающих геосистем с линейными размерами 3600 м.

Довольно низкое качество дискриминации морфометрических характеристик рельефа в окрестностях 1200 и 2000 м классами ПРП показывает большое разнообразие возможных сочетаний свойств ПРП. Безусловно, описанные рассуждения отражают только небольшую часть вариабельности на соответствующих иерархических уровнях (хотя с высокой вероятностью — все-таки главную закономерность). Причина может

заключаться в высокой пластичности среднетаежных геосистем, нарушенных антропогенным воздействием, в простейшем случае — разнообразие сукцессионных состояний. Разумеется, выбранное разрешение, т.е. размер операционной территориальной единицы и кратных ему гипотетических размеров вмещающих геосистем, не отражает взаимодействий фациального и подурочищного уровней. Наличие положительных и отрицательных форм микрорельефа внутри урочища может оказывать существенное влияние на свойства описываемой фации наряду с рамочными условиями, заданными положением урочища (ОТЕ размером 400 м) в системе окружающих его урочищ и общими свойствами более крупных геосистем. Отсюда следует необходимость определения вклада локальных взаимодействий в варьирование ПРП. В идеале требуется изучить зависимость свойств тех же описанных фаций от свойств рельефа малых окрестностей при разрешении цифровой модели рельефа на порядок ниже, то есть близком к среднему размеру описываемых фаций (порядка первых десятков метров), что частично уже продемонстрировано выше в разделе 4.4.3.

4.8.3. Многоуровневая индуктивная картографическая модель парциальных геосистем

Теперь продемонстрируем процедуру построения ***многоуровневой индуктивной картографической модели парциальных геосистем*** на примере среднетаежного ландшафта в Архангельской области (полигон «Заячья»). Она отражает подчиненность плеяд *взаимосвязанных* (в отличие от предыдущей двухуровневой модели) свойств компонентов *одновременно нескольким* (опять-таки в отличие от предыдущей серии карт) уровням вмещающих геосистем. Ожидаемая карта должна продемонстрировать следующую логику: «При таком-то наложении рамочных условий, создаваемых рельефом вмещающих геосистем нескольких рангов, наиболее вероятен такой-то класс комбинаций свойств почвенно-растительного покрова, чувствительных к данному экологическому фактору».

Для выявления комбинаций свойств ПРП чувствительных к важнейшим ландшафтоформирующим факторам, составлены плеяды взаимосвязанных свойств ландшафта и схемы отношений между плеядами. Основанием для построения схемы стали непараметрические коэффициенты корреляции Спирмена между значениями осей. Для уточнения состава плеяд применен метод главных компонент. Оси дифференциации свойств компонентов выступали как исходные переменные. Выделены факторы (главные компоненты), каждый из которых показывает сопряженное варьирование группы осей в пространстве под действием какого-либо процесса. Выявлено три основных плеяды свойств компонентов (рис. 71).

Первая плеяда объединяет группу взаимосвязанных осей, чувствительных к варьированию режима влажности почв. Она отражает взаимозависимость следующих осей: 2-я и 3-я оси дифференциации древостоя, 1-я ось дифференциации мхов, 3-я ось дифференциации кустарничков, 1-я ось дифференциации мощности почвенных горизонтов. Построена серия мультирегрессионных уравнений второй степени, в каждом из которых зависимой переменной выступает одна из осей, входящих в плеяду, а независимыми — остальные члены плеяды. Из серии уравнений наилучшим качеством обладает уравнение, объясняющее пространственное варьирование 3-й оси дифференциации древостоя — оси соотношения хвойных (ель, сосна) и мелколиственных

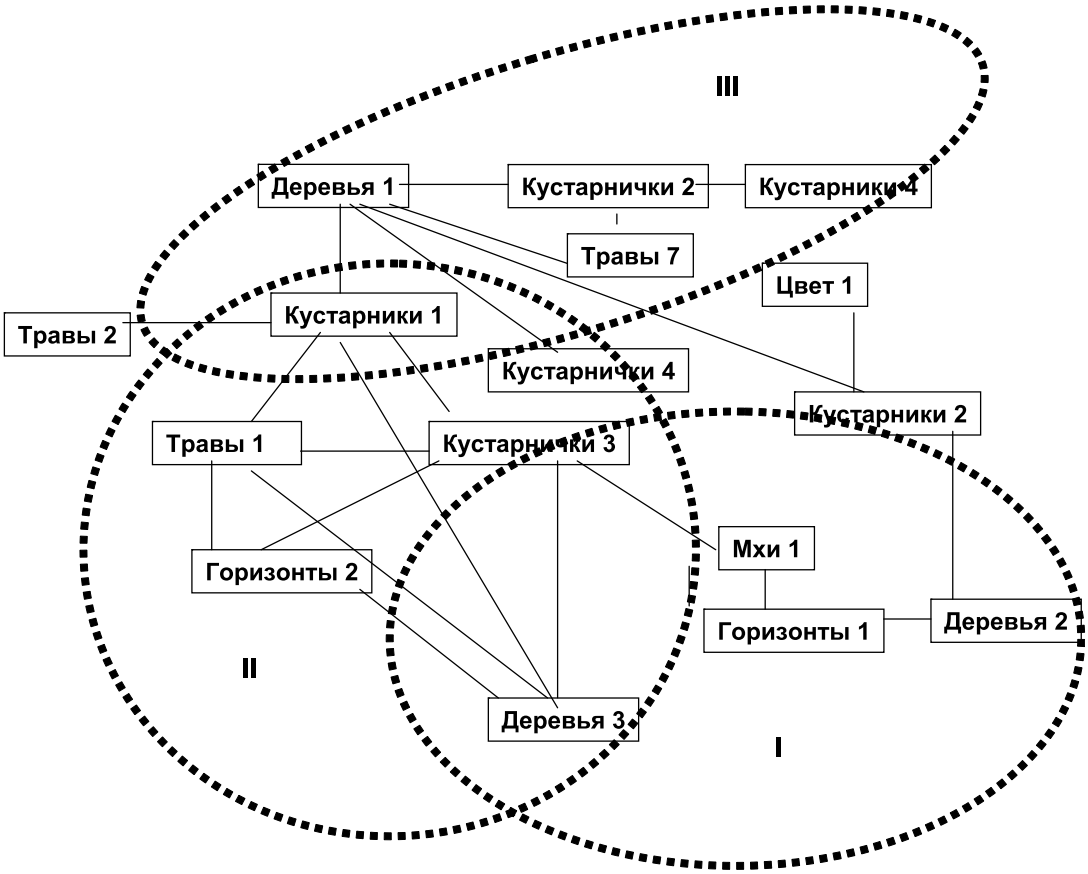

Рис. 71. Плеяды свойств компонентов среднетаежного ландшафта в Архангельской области (полигон «Заячья») по коэффициентам корреляции Спирмена. I, II, III — плеяды свойств, пояснения см. в тексте.

(осина, ольха) пород. Коэффициент детерминации составляет 0,52. Анализ остатков уравнения показал, что минимальные отклонения рассчитанных значений от наблюдаемых (остатки уравнения близкие к 0) характерны для следующих ландшафтных условий: старовозрастные (более 70 лет) леса неглубокорасчлененных местностей на двучленных супесчано-суглинистых отложениях, с типичным для средней тайги торфянистым горизонтом мощностью не более 25 см, с небольшим обилием березы и осины, с суммарной мощностью гумусированных горизонтов не более 20 см. В этих условиях можно говорить о существовании парциальной парагенетической геосистемы. Основанием ее целостности служит единое правило соответствия водного режима почв, свойств древостоя, мхов, кустарничков и соотношения торфонакопления и суходольного таежного почвообразования. Коэффициент детерминации уравнения для 3-й оси дифференциации древостоя для данных условий (около 50% массива наблюдений, т.е. около 90 «точек» комплексного описания) повышается до 0,92 (табл. 30). По мере нарастания длительности стояния верховодки в ареале этой геосистемы подзолообра-

зование и гумусонакопление в почвах замещается торфонакоплением, зеленомошный покров — сфагновым с черникой, требовательные к питанию сосновые леса с участием ольхи — лесами с господством ели и сосны при участии березы, реже осины. Разрушается данная парциальная геосистема (и вступают в действие иные процессы) при глубокорасчлененном рельефе, на суглинистых (не двучленных!) глубокогумусированных либо торфяно-глеевых почвах, в лесах с возрастом первого яруса древостоя до 70 лет, с господством мелколиственных пород. В ареале существования геохоры из свойств 1-й плеяды свойства древесного, кустарничкового, мохового яруса и почв весьма контрастны, но единым связующим фактором служит динамика верховодки в зависимости от степени расчлененности рельефа. На ранних этапах развития древостоя связи свойств почв и фитоценозов с динамикой верховодки ослаблены. Для старовозрастных лесов наличие единого интегрирующего фактора позволяет использовать свойство эргодичности и прогнозировать динамику свойств — членов плеяды при гипотетическом росте увлажнения на основании знания о закономерности межкомпонентных отношений в пространственном ряду. На рис. 72 показан ареал действия межкомпонентной связи, формирующей 1-ю плеяду, в пределах которого допустимо прогнозирование. Ареал этой геохоры получен путем интерполяции остатков мультирегрессионного уравнения методом обратно взвешенных расстояний Inverse Distance Weghted (IDW) по 12 ближайшим соседним точкам. Как ареал парциальной геосистемы выделены территории, где отклонения остатков от 0 заключены в интервале между нижним и верхним квартилями. Это означает, что 50% наблюдений подчиняются единому правилу межкомпонентных отношений.

Таблица. 30.

Параметры мультирегрессионного уравнения 2-й степени для первой плеяды свойств, где зависимая переменная — 3-я ось дифференциации древостоя, независимые переменные — 2-я ось дифференциации древостоя (d2tree), 3-я ось дифференциации кустарничков (d3low), 1-я ось дифференциации мхов (d1moss), 1-я ось дифференциации мощности почвенных горизонтов (d1hor). Среднетаежный ландшафт в Архангельской области, полигон «Заячья».

Независимая переменная	Коэффициент уравнения	Стандартная ошибка коэффициента	Т-критерий	p
Intercept	–3,56	1,73	–2,06	0,04
D2tree	–0,52	0,05	–10,41	0,00
D2tree^2	0,02	0,00	11,84	0,00
D3low	–0,50	0,04	–14,22	0,00
D3low^2	0,00	0,00	1,97	0,05
D1moss	0,07	0,04	1,87	0,06
D1moss^2	–0,01	0,00	–5,34	0,00
D1hor	–0,11	0,04	–2,92	0,00
D1hor^2	–0,00	0,00	–0,56	0,58
D2tree*D3low	–0,01	0,00	–6,81	0,00
D2tree*D1moss	–0,00	0,00	–0,41	0,69
D3low*D1moss	–0,00	0,00	–1,46	0,15
D2tree*D1hor	–0,01	0,00	–3,50	0,00
D3low*D1hor	0,01	0,00	4,11	0,00
D1moss*D1hor	0,00	0,00	0,87	0,39

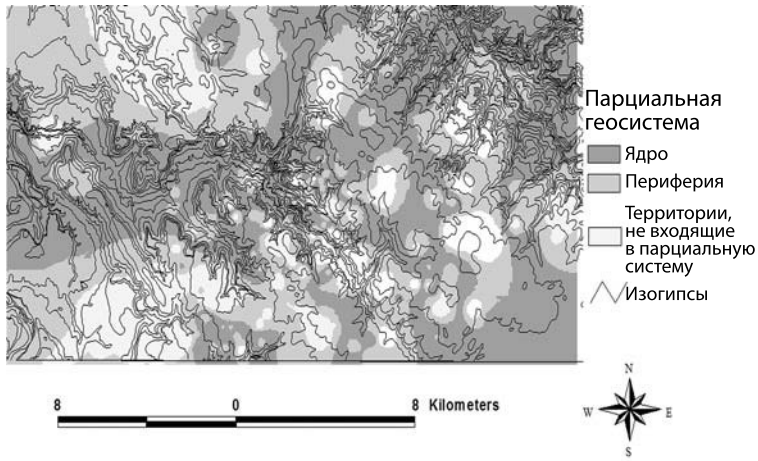

Рис. 72. Карта парциальной парагенетической геосистемы, образованной I плеядой свойств ландшафта, чувствительных к варьированию режима влажности почв (среднетаежный ландшафт, Архангельская область, полигон «Заячья»). Темно-серый тон — территории с минимальным отклонением остатков от 0, соответствуют ареалу наилучшего проявления межкомпонентной связи в плеяде (ядро). Светло-серый тон — территории с отклонением остатков от 0 в пределах двух квартилей (периферия). Территории с большими отрицательными и большими положительными (белый тон) значениями остатков соответствуют ареалу, где данный тип межкомпонентной связи не проявляется.

Среди членов 1-й плеяды есть свойства (древесного и кустарничкового ярусов), для которых вклад варьирования рельефа вмещающих геосистем перевешивает вклад внутриуровенных межкомпонентных взаимодействий (см. табл. 21). В связи с эти появляется возможность, пользуясь цифровой моделью рельефа, разграничить индивидуальные монотонные парциальные геосистемы. Внутри таких геосистем сочетание свойств однотипно. Различны же монотонные геосистемы по силе действия главного фактора формирования мозаичной парагенетической геохоры — перераспределения влаги.

Теперь можно создать *многоуровенную индуктивную картографическую модель парциальных геосистем-геомеров*, составляющих одну парагенетическую геохору и обособляющихся по свойствам первой пляды. Процедура с применением дискриминантного анализа в общих чертах аналогична описанной выше при выявлении наиболее вероятного класса ПРП для условий рельефа одной окрестности. Разница состоит в том, что теперь зависимыми переменными становятся значимые свойства нескольких окрестностей, а группирующей — класс свойств ПРП по чувствительности к одному экологическому фактору. Свойства, образующие первую плеяду положены в основу классификации почвенно-растительного покрова с выделением 8 классов. Принадлежность к классу каждого из 184 урочищ, снабженных полевыми описаниями доминантных фаций, использована как обучающая выборка. Принадлежность к классу выступает как группирующая переменная, свойства рельефа — как зависимая переменная. В результате определен наиболее вероятный класс ПРП для каждого индивидуального пиксела (ОТЕ) при данных условиях рельефа. В отличие от описанного выше вариан-

та двухуровневого картографирования парциальных геосистем, мы теперь исходим из гипотезы *полимасштабности геосистемных взаимодействий*: каждая ОТЕ (пиксел) находится в рамочных условиях, создаваемых геосистемами нескольких вышестоящих уровней, которые охарактеризованы морфометрическими свойствами рельефа (расчлененностью и кривизной). Кроме того, есть собственные свойства рельефа ОТЕ, контролирующие свойства компонентов, прежде всего — уклон, и позиционные факторы — расстояние до ближайшего тальвега. Методом прямого пошагового выбора (при критическом значении критерия Фишера F=1) определен набор характеристик рельефа, который значим для различения классов ПРП (табл. 31). Для первой плеяды в модель с наибольшим уровнем достоверности вошли показатели вертикальной расчлененности в окрестностях со стороной 2800, 3600, 6000 м, горизонтальной кривизны в окрестности 2000 м. Выделенная группа характеристик рельефа позволяет распознавать 32% наблюдений; наиболее точно распознаются 2-й, 6-й, 7-й и 8-й классы. Иными словами, для этих классов чувствительности ПРП к влажности существуют специфичные для них сочетания свойств рельефа собственно ОТЕ и значимых вмещающих ее геосистем нескольких иерархических уровней. Для каждой ОТЕ, в том числе не снабженной полевыми наблюдениями, рассчитана вероятность принадлежности к каждому классу ПРП, а точнее — сочетания свойств первой плеяды его свойств. На карте (рис. 73) показан наиболее вероятный класс парциальных геосистем, различных по увлажненности, образованных свойствами первой плеяды при существующем в каждой ОТЕ собственных свойств рельефа и рельефа вмещающих геосистем.

Таблица. 31.

Прямой пошаговый выбор (Forward stepwise) морфометрических характеристик рельефа, значимых для распознавания 8 классов урочищ, выделенных по группе осей, составляющих 1-ю плеяду (чувствительность к влажности). Среднетаежный ландшафт в Архангельской области, полигон «Заячья».

Discriminant Function Analysis Summary (Arkhan184.sta) Step 8, N of vars in model: 8; Grouping: Pleyad1_cl8 (8 grps) Wilks' Lambda: ,41441 approx. F (56,888)=2,8197 p< ,0000						
Морфометрическая характеристика рельефа и сторона квадратной окрестности	WilksLambda	Partial	F-remove	p-level	toler	1-toler
Вертикальная расчлененность 1200 м	0,44	0,95	1,24	0,28	0,06	0,94
Уклон	0,44	0,95	1,25	0,28	0,09	0,91
Вертикальная расчлененность 6000 м	0,46	0,90	2,63	0,01	0,12	0,88
Вертикальная кривизна, 1200 м	0,44	0,94	1,45	0,19	0,82	0,18
Горизонтальная кривизна, 2000 м	0,46	0,91	2,30	0,03	0,77	0,23
Вертикальная расчлененность 3600 м	0,46	0,90	2,47	0,02	0,02	0,98
Вертикальная расчлененность 2800 м	0,45	0,92	2,11	0,04	0,02	0,98
Вертикальная расчлененность 2000 м	0,43	0,95	1,14	0,34	0,05	0,95

Представим содержание каждого из классов этих парциальных геосистем

Для 1-го класса парциальных геосистем характерна слабая расчлененность рельефа вмещающих геосистем самого высокого ранга (с линейными размерами около 6000 м), положение на плоских междуречьях и в полосе слабоврезанных заболоченных или высокотравных водосборных понижений. Повышено обилие ели или (во вторичных

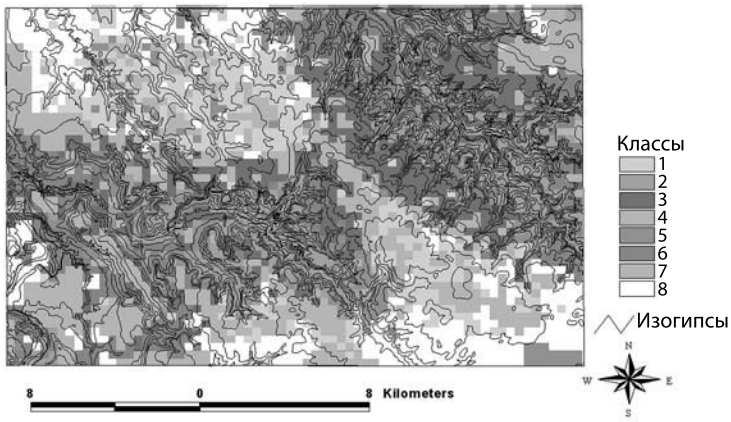

Рис. 73. Многоуровенная картографическая модель парциальных геосистем 1-й плеяды свойств, чувствительных к влажности почв (среднетаежный ландшафт, Архангельская область, полигон «Заячья»). Классы 1…8 — пояснения см. в тексте.

лесах) осины и березы, черники, оподзоленность при маломощности органогенных горизонтов (т.е. ярко выражен переменный режим влажности верхних горизонтов).

Для 2-го класса парциальных геосистем типична максимальная расчлененность и уклоны рельефа в зонах выходов коренных карбонатных пород, близость к глубоковрезанным водотокам. Характерно высокое обилие осины и ольхи, полное отсутствие черники, глубокая гумусированность и слабая оподзоленность хорошо дренированных почв

3-й класс парциальных геосистем формируется в краевых частях междуречий в полосе чередования плоских поверхностей и эрозионных форм с быстро нарастающей вниз по течению глубиной. Характерно повышенное обилие сосны, индицирующее нарастание мощности песчано-супесчаного чехла от внутренних частей междуречий к краевым. Высокое обилие зеленых мхов, наличие старопахотных горизонтов почв свидетельствуют о прошлой вовлеченности в хозяйство благодаря относительно недолгому (только весной) периоду высокого стояния верховодки.

4-й класс парциальных геосистем приурочен к краевым частям плоских междуречий, где, с одной стороны, возможно временное переувлажнение при высоком стоянии верховодки, с другой — повышена мощность песчано-супесчаного чехла и существует механизм оттока влаги в недалеко расположенные долины. Типично повышенное обилие сосны, черники и брусники, высокое обилие зеленых мхов, максимальная глубина оподзоливания, наличие маломощных органогенных и гумсовых горизонтов, иногда — старопахотных.

5-й класс парциальных геосистем встречается в переходной полосе от краевых частей плоских междуречий к крутосклонным долинам. Характерно глубокое положение грунтовых вод и слабая выраженность верховодки. Характерно повышенное обилие ели (как правило, в верхних частях крутых склонов, труднодоступных для хозяйственного освоения), высокое обилие зеленых мхов, повышенное обилие костяники, в прибровочных частях — наличие старопахотных горизонтов почв.

Для 6-го класса парциальных геосистем характерна высокая, но не максимальная, расчленность рельефа в полосе приближения коренных пород к поверхности и нарастания уклонов. Повышено обилие серой ольхи, характерно отсутствие мохового покрова, высокая встречаемость старопахотных горизонтов почв.

Для 7-го класса парциальных геосистем характерна минимальная расчлененность рельефа, удаленность от дренирующих эрозионных форм, высокое обилие сфагновых мхов, мощное развитие переувлажненных органогенных и оглеенных горизонтов почв.

Для 8-го класса парциальных геосистем характерно положение на максимальном удалении от глубоковрезанных участков долин с выходами коренных пород, отсутствие дренирующего влияния трещиноватости коренных пород, определяющее влияние водоупорных моренных суглинков. Типично высокое обилие сосны переувлажненных (в том числе приболотных) местообитаний, сфагновых мхов, черники и брусники

Вторая плеяда отражает взаимозависимость следующих осей: 1-я ось дифференциации трав, 1-я ось дифференциации кустарников, 3-я ось дифференциации кустарничков, 3-я ось дифференциации деревьев, 2-я ось дифференциации мощности почвенных горизонтов. Связующим центром этой плеяды является 1-я ось дифференциации трав: коэффициент детерминации мультирегрессионного уравнения составляет 0,55. При удалении из массива половины точек с большими отклонениями предсказанных значений от наблюдаемых коэффициент детерминации повышается до 0,92. Минимальные отклонения свойственны геосистемам со следующими характеристиками: молодые и средневозрастные леса (до 70 лет) с низким обилием ели, с обилием березы или осины не более 5 баллов, без ольхи серой в древостое, на двучленных или суглинистых (но не песчаных) отложениях с мощностью торфянистого горизонта не более 15 см, с мощностью элювиального горизонта не более 20 см или гумусированных горизонтов не более 20 см. Четкая зависимость остатков уравнения от морфометрических характеристик рельефа вмещающих геосистем отсутствует. Сущность парциальной геосистемы, образуемой 2-й плеядой, заключается в сопряженной реакции древесного, кустарникового, кустарничкового и травяного яруса на перераспределении элементов минерального питания в почвах, отражающемся в соотношении оподзоливания и гумусонакопления. Нарастание гумусонакопления свойственно урочищам глубокорасчлененных местностей, а оподзоливания — слаборасчлененных. Однако в ареалах крайних значений свойств мультирегрессионная модель дает большие ошибки, то есть «недооценивает» обилие неморальных и нитрофильных (на одном полюсе значений оси) и бореальных и боровых (на другом полюсе) видов трав. Иначе говоря, в богатых местообитаниях с глубокогумусированными (местами с перегнойным горизонтом) почвами неморальные и нитрофильные виды имеют большее обилие, чем предсказывается моделью парциальной геосистемы 2-й плеяды. В наиболее бедных местообитаниях с глубокоподзолистыми почвами, соответственно боровых и бореальных видов больше, чем предсказывается моделью. Это может означать возможность как минимум двух механизмов формирования вертикальной структуры ландшафта. Во-первых, формирование состава травяного яруса как реакция на возрастание (убывание) трофности почв может опережать адаптацию свойств кустарничкового, кустарникового и древесного ярусов, которые обладают большей толерантностью и могут иметь в таких местообитаниях состав хотя и своеобразный, но не столь радикально отличный от других местобитаний, как травяный ярус. Во-вторых, недостаточная точность модели в области крайних значений может индицировать наличие особых (не описываемых моделью)

процессов, способствующих повышенному обилию той или иной группы трав независимо от основного процесса, который охватывает своим влиянием всю плеяду свойств.

Обратим внимание на *большую значимость неаддитивных эффектов, когда определенный интервал значений зависимой переменной (в данном случае свойств травяного яруса) достигается только при некотором сочетании значений двух независимых переменных-предикторов*. Например, высокое обилие неморальных и нитрофильных видов травостоя отмечено только в условиях, когда одновременно присутствуют гумусовые горизонты в почве и кустарники с высокой и средней потребностью в почвенном азоте и основаниях (смородина, малина, жимолость, волчеягодник) (рис. 74, А). При этом наличие глубокогумусированных почв само по себе не означает формирование описываемой плеяды с высоким обилием неморальных и нитрофильных видов, а мезотрофные и мегатрофные кустарники могут встречаться и независимо от неморальных и нитрофильных видов травостоя. То же относится к сочетанию свойств кустарничкового и древесного ярусов (рис. 74, Б): высокое обилие ольхи (большие значения оси абсцисс) необязательно сочетается с высоким обилием неморальных и нитрофильных видов травостоя. Логика структуры естественного ландшафта, казалось бы, требует, чтобы нитрофильные растения имели высокое обилие в местах значительного влияния богатых грунтовых вод (поймы, подножья склонов, водосборные понижения и т.п.). В исследуемом же регионе это в полной мере относится к нитрофильным травам, но нитрофильные деревья и кустарники (ольха, смородина, малина) могут присутствовать и в суходольных местобитаниях, часто в парадоксальном сочетании с сосновым лесом, что может быть объяснено только наследием внесения удобрений в почвы, ныне покрытых лесом. Поэтому при повышенном обилии ольхи во многих урочищах обилие неморальных и нитрофильных видов становится меньше ожидаемого.

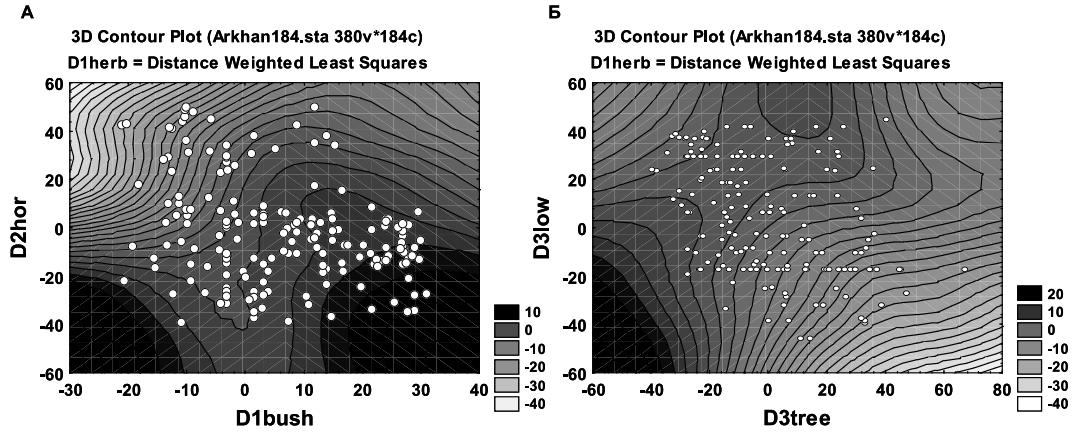

Рис. 74. Неаддитивные эффекты формирования травяного яруса (1-я ось дифференциации, d1herb). Среднетаежный ландшафт, Архангельская область, полигон «Заячья». А — в зависимости от состава кустарникового яруса (1-я ось, D1bush) и строения почвенного профиля (2-я ось, D2hor). Б — в зависимости от состава древесного яруса (3-я ось, d3tree) и кустарничкового яруса (3-я ось, d3low).

На карте парциальной геосистемы, соответствующей 2-й плеяде свойств ландшафта (рис. 75), хорошо заметно, что крупный ареал, не вписывающийся в модель (с большими остатками), приурочен к глубокорасчлененной и глубоковрезанной средней части долины Заячьей, где происходит активная разгрузка щелочных грунтовых вод и травяный ярус более чутко реагирует на этот процесс - неравновесно по отношению к другим ярусами фитоценоза и почвам. В менее расчлененных частях бассейна сформировалось равновесное состояние входящих в плеяду свойств и модель вполне адекватно описывает пространственную дифференциацию. Показательно также, что данная плеяда в старовозрастных древостоях практически распадается на пары тесно связанных свойств, причем травяный ярус становится более независимым от древостоя, кустарников и кустарничков.

Представляет особый интерес вопрос о соотношении остатков моделей, ставящих оси дифференциации свойств компонентов в зависимость от свойств компонентов плеяды и от свойств рельефа вмещающих геосистем. Бывает ли так, что свойства травостоя возникают независимо и от внутриуровенных связей (от связей в плеяде), и от межуровневых? Если да, то являются ли такие случаи свидетельством саморазвития травяного или древесного яруса, когда он сам создает себе оптимальную среду. Судя по рис. 76, такой вариант возможен. Если остатки минимальны (близки к 0) в модели внутриуровенных связей, то минимальны они и в наилучшей из моделей межуровневых связей (а таковой для 1-й оси травостоя является модель для окрестности с линейным размером 1200 м, для 3-й оси древостоя — размером 2000 м). Если же какие-либо фации имеют соотношение мегатрофных и олиготрофных видов травостоя, не вполне адекватное состоянию других компонентов, то это расхождение необъяснимо рамочными условиями вмещающей геосистемы. Этот результат позволяет заключить, что *одно и то же свойство не может быть повсеместно объяснено одним и тем же фактором или группой факторов*.

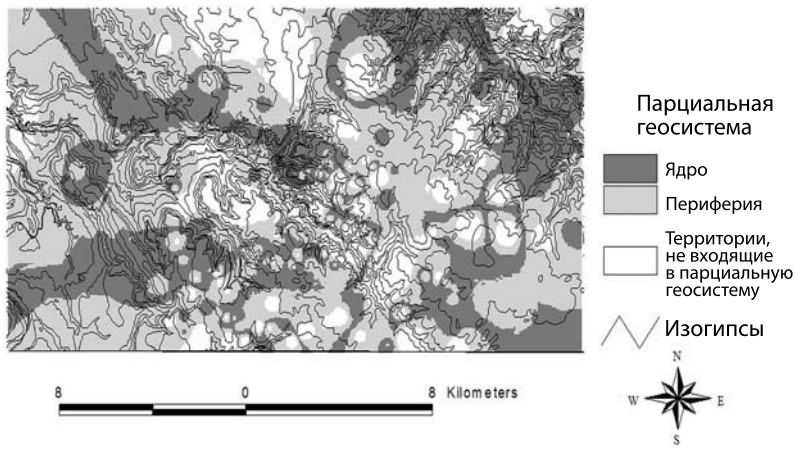

Рис. 75. Карта парциальной парагенетической геосистемы, образованной 2-й плеядой, отражающей сопряженную реакцию древесного, кустарникового, кустарничкового и травяного яруса на перераспределении элементов минерального питания в почвах (среднетаежный ландшафт, Архангельская область).

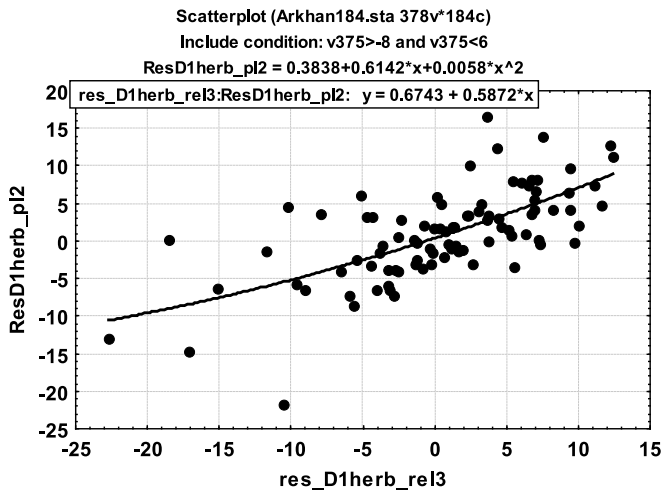

Рис. 76. Прямая связь остатков моделей внутриуровенных и межуровневых связей для 1-й оси дифференциации травостоя (чувствительность к трофности) для среднетаежного ландшафта, Архангельская область, полигон «Заячья».
Res_D1herb_rel3 — остатки мультирегрессионной модели 2-й степени, связывающей значения 1-й оси дифференциации травостоя с морфометрическими характеристиками рельефа в квадратной окрестности со стороной 1200 м. ResD1herb_pl2 — остатки мультирегрессионной модели 2-й степени, связывающей значения 1-й оси дифференциации травостоя со свойствами компонентов, входящими во 2-ю плеяду.

Например**,** высокое обилие неморальных и нитрофильных видов в одном секторе объясняется согласованным влиянием других компонентов в соответствии со свойствами рельефа, а в другом — является следствием процессов иной природы (не объясненных используемой моделью) или саморазвития. Хорошо заметно, что на графике для травостоя (рис. 76) основная часть точек концентрируется вблизи нулевых значений обоих осей, а на графике для древостоя (рис. 77) такой концентрации нет. Это свидетельствует о большей значимости рамочных условий вмещающей геосистемы для плеяды, в центре которой травостой, по сравнению с плеядой, в центре которой — древостой. Иначе говоря, *связь свойств, чувствительных к трофности, в большей степени определяется рельефом, чем свойств, чувствительных к влажности.* Это подтверждается и сравнением независимых вкладов внутриуровенных межкомпонентных связей и межуровневых связей методом суперфакторов, описанных в разделах 2.7, 3.2.3 и 4.5. Все члены 2-й плеяды характеризуются превышением вклада межуровневых связей. Это означает, что рельеф вмещающих геосистем (а именно — с линейными размерами 1200–2000 м) контролирует их сопряженное варьирование в пространстве (табл. 21). Напротив, члены 1-й плеяды, отражающие реакцию на влажность почвы и не входящие одновременно во 2-ю плеяду, отличаются превышением вклада внутриуровенных межкомпонентных связей. *Поэтому для ландшафта Архангельского среднетаежного полигона многоуровенное картографирование рельефа дает больше ландшафтной информации о трофотопах и соответствующих фитоценозах, чем о гигротопах.*

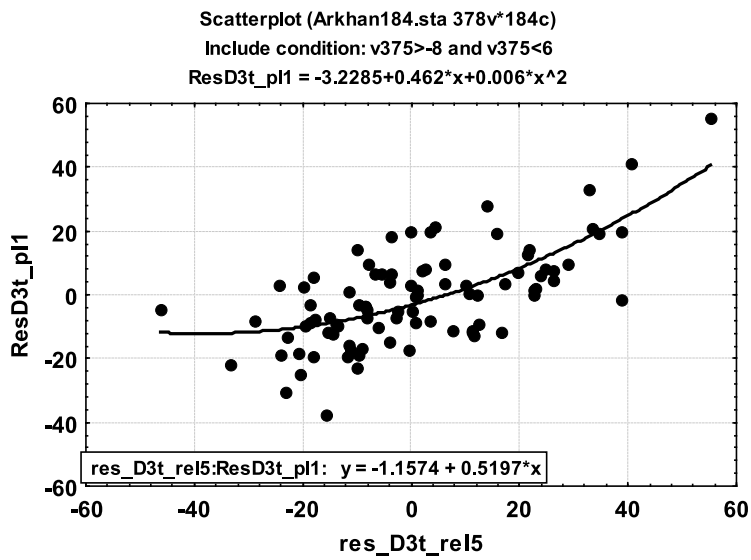

Рис. 77. Прямая связь остатков моделей внутриуровенных и межуровневых связей для 3-й оси дифференциации древостоя (чувствительность к трофности) для среднетаежного ландшафта, Архангельская область, полигон «Заячья».
Res_D3t_rel5 — остатки мультирегрессионной модели 2-й степени, связывающей значения 3-й оси дифференциации древостоя с морфометрическими характеристиками рельефа в квадратной окрестности со стороной 2000 м. ResD3t_pl1 — остатки мультирегрессионной модели 2-й степени, связывающей значения 3-й оси дифференциации древостоя со свойствами компонентов, входящими в 1-ю плеяду.

На рис. 78 показаны индивидуальные парциальные геосистемы, выделенные на основании многоуровенной модели для 2-й плеяды свойств. На рис. 79 для каждой ОТЕ, показана вероятность существования каждого их классов почвенно-растительного покрова при существующих значимых морфометрических свойствах рельефа вмещающих геосистем.

Опишем содержание каждого из классов этих парциальных геосистем

1-й класс парциальных геосистем приурочен к наиболее глубоковрезанным сильнорасчлененным частям долин с выходами на поверхность коренных пород, обусловливающим высокую обеспеченность основаниями, нейтральную или слабощелочную среду в почвах. Занимающий похожие позиции «сухой» класс 1-й плеяды менее компактен, фрагментирован вкраплениями других классов. Характерно высокое обилие мегатрофных видов трав нитрофильной и неморальной групп (таволга, борец, сныть, медуница и др.), высокое обилие серой ольхи и осины; повышенная встречаемость жимолости, волчьеягодника и смородины (виды с повышенной требовательностью к азотообеспеченности и минеральными веществами по шкалам Элленберга и Ландольта) в кустарниковом ярусе. Здесь почвы максимально глубоко гумусированы.

Для 2-го класса парциальных геосистем характерно повышенное обилие видов травостоя неморальной и нитрофильной групп, осины и ольхи, хотя и меньше, чем в клас-

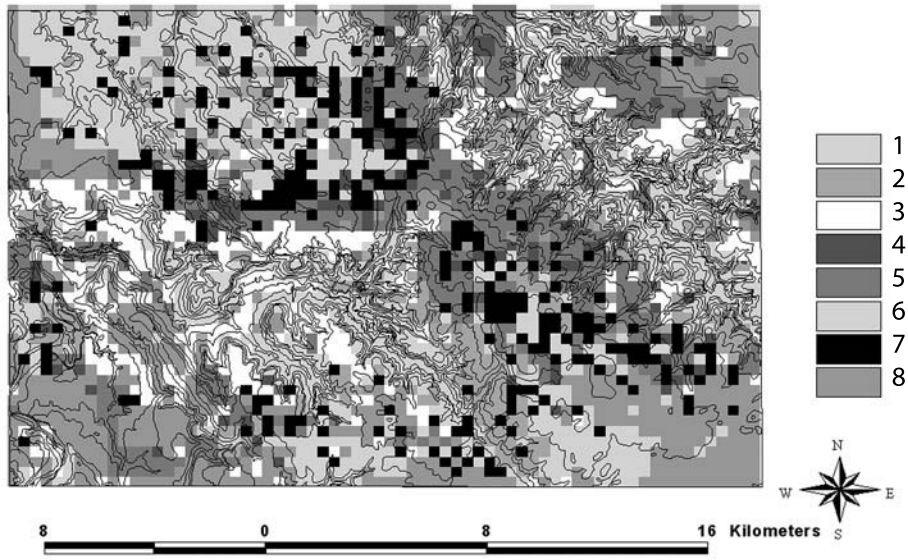

Рис. 78. Многоуровенная картографическая модель парциальных геосистем 2-й плеяды свойств, чувствительных к трофности почв (среднетаежный ландшафт, Архангельская область, полигон «Заячья»). Классы 1…8 — пояснения см. в тексте.

се 1, повышенная встречаемость жимолости, волчьеягодника и смородины в кустарниковом ярусе.

3-й класс парциальных геосистем формируется в краевых частях плоских междуречий с характерным относительно мощным чехлом обедненных песчано-супесчаных отложений, часто с оглеенными почвами. Характерно повышенное обилие сосны в древостое, преобладание бореальных или боровых мезофильных и гидрофильных видов травостоя (седмичник, линнея, плауны, ожика, грушанка, осоки, марьянник лесной, ятрышники), бореальных кустарников (ивы, можжевельник) и кустарничков (брусника, черника).

4-й класс парциальных геосистем распространен спорадически небольшими пятнами среди других классов (чаще — 5-го) и приурочен в основном к слабоврезанным верховьям эрозионных форм и пологим приводораздельным склонам с елово-сосновыми лесами на подзолистых негумусированных почвах. Характерно преобладание бореальных мезофильных и гидрофильных видов травостоя; повышенная встречаемость жимолости и смородины в кустарниковом ярусе, костяники. Степень дренированности достаточна для оподзоливания и выноса минеральных веществ; обогащающее влияние грунтовых вод не проявляется.

5-й класс парциальных геосистем встречается в неглубокорасчлененной полосе формирования эрозионных врезов и водотоков в приводораздельной части пологих склонов с выклиниванием грунтовых вод. Характерно преобладание бореальных мезофильных и гидрофильных видов травостоя. При этом повышена, по сравнению со всеми классами, кроме 1-го, мощность гумусовых горизонтов, часто встречаются перегнойные почвы в

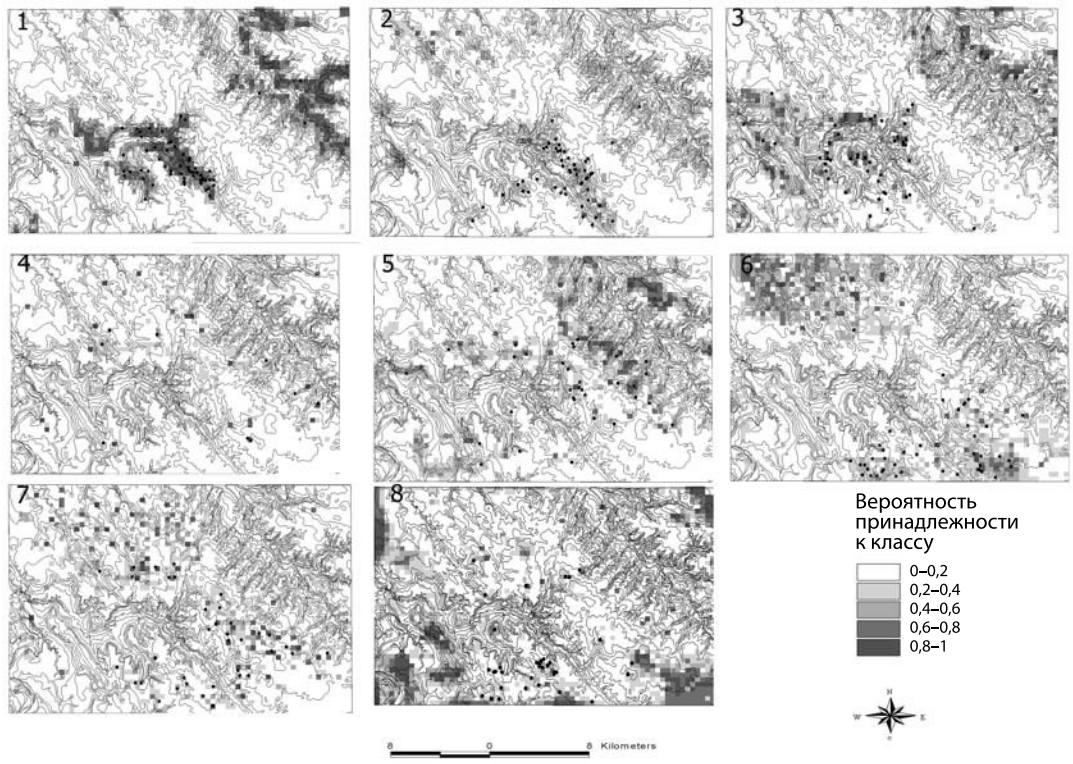

Рис. 79. Вероятность соответствия рельефа операционных территориальных единиц типичным значениям для классов почвенно-растительного покрова, выделенным на основании свойств чувствительных к трофности (2-я плеяда) (среднетаежный ландшафт, Архангельская область, полигон «Заячья»). Разрешение цифровой модели рельефа 400 м. 1…8 — классы почвенно-растительного покрова. Черные точки — ОТЕ, обеспеченные полевыми описаниями соответствующего класса почвенно-растительного покрова.

зонах склоновой разгрузки обогащенных грунтовых вод, оподзоливание ослаблено за счет нейтрализации органических кислот основаниями грунтовых вод.

6-й класс парциальных геосистем формируется на плоских или пологонаклонных расширенных междуречьях, но не заходя в центральные части самого широкого заболоченного междуречья Заячьей и Соденьги. Для этого класса типична небольшая удаленность от долин в их слабоврезанных верховьях. Степень дренированности такова, что позволяет накапливаться торфу, постепенно изолирующему растительный покров от источников минеральных веществ. Характерно преобладание сосново-еловых лесов, бореальных мезофильных и гидрофильных видов травостоя, бореальных кустарничков (черника), торфянисто-подзолистых почв без гумусовых горизонтов, иногда с перегнойным горизонтом.

7-й класс близок к 6-му, но больше тяготеет к суженным секторам водораздельных поверхностей, формируя переход от 6-го к 4-му классу. Характерны некоторые признаки повышенного минерального питания (повышенное обилие осины), но характерно преобладание бореальных видов травостоя, бореальных кустарничков (черника).

8-й класс парциальных геосистем формируется во внутренних частях широких плоских нерасчлененных водораздельных поверхностей с чередованием долгомошных лесов и верховых болот, а также на террасах Кокшеньги. Характерно преобладание сосново-еловых или сосновых лесов, преобладание бореальных мезофильных и гидрофильных видов травостоя, бореальных кустарников (ивы, можжевельник), бореальных кустарничков (черника, брусника). В целом это класс наиболее бедных местообитаний, которые образуются либо при высокой мощности песчаных отложений (террасы Кокшеньги), либо при высокой мощности верхового торфа (на междуречье Заячьей и Соденьги).

При сравнении пространственных структур, образованных первой и второй плеядами (формируемых, соответственно, потоками влаги и минеральных веществ) обращает на себя внимание большая дробность структуры во втором случае, особенно в приводораздельных секторах. Структуры, образованные перераспределением влаги в большей степени образуют зональность от водоразделов к днищам долин. В наиболее глубокорасчлененной Ростовской местности ландшафтные условия, наоборот, более контрастны по увлажнению, чем по трофности. Таким образом, видно, что невозможно одному из этих двух факторов отдать первенство при классификации геосистем и придать более высокое значение в иерархии.

Третья по значимости плеяда свойств, образующая отдельную парциальную геосистему включает 1-ю ось дифференциации древостоя, 4-ю ось дифференциации кустарников, 2-ю ось дифференциации кустарничков, 7-ю ось дифференциации трав, а также 1-ю ось дифференциации кустарников. Последняя служит связующим звеном со 2-й плеядой в структуре ландшафта. В плеяду входят свойства, имеющие самые разные (в отличие от 2-й плеяды) резонансные уровни отношений с рельефом вмещающих геосистем — от 1200 до 6000 м (табл. 22). Нет и единого соотношения вкладов внутриуровенных и межуровневых связей. Для 2-й оси дифференциации кустарничков и 4-й — кустарников обе модели зависимости от суперфакторов недостоверны (табл. 21). Все члены плеяды (за исключением 1-й оси дифференциации кустарников, входящей одновременно во 2-ю плеяду) не имеют также достоверных связей со свойствами почв. Мультирегрессионные уравнения зависимости каждой из них от совокупности осей дифференциации мощностей почвенных горизонтов, цветовых характеристик почв и механического состава отложений недостоверны. Отсутствие в 3-й плеяде свойств почв заставляет проверять наличие чисто внутрифитоценотических механизмов. Эта гипотеза абсолютно подтверждается: значения всех без исключения осей в плеяде варьируют в достоверной зависимости от возраста первого яруса древостоя. Следовательно, парциальная геосистема, независимая от первых двух, формируется группой свойств, сопряженно меняющихся в ходе восстановительной сукцессии. Мультирегрессионное уравнение, в котором 1-я ось дифференциации древостоя выступает зависимой переменной, а остальные члены плеяды — независимыми, имеет наивысшее качество (с коэффициентом детерминации 0,41) среди группы уравнений объясняющих взаимозависимости членов плеяды. Парциальная геосистема объединяет урочища сухих и свежих гигротопов, в которых почвы формируются на песчаных или двучленных (но не суглинистых) отложениях. Восстановительная сукцессия после нарушений идет через сосну, которая по мере развития древостоя замещается елью. Виды, характерные для молодых сосняков (можжевельник, вереск, плаун-баранец), в ходе сукцессии вытесняются бореальными спутниками ели (костяника, черника, хвощ лесной, майник, рябина, малина, шиповник).

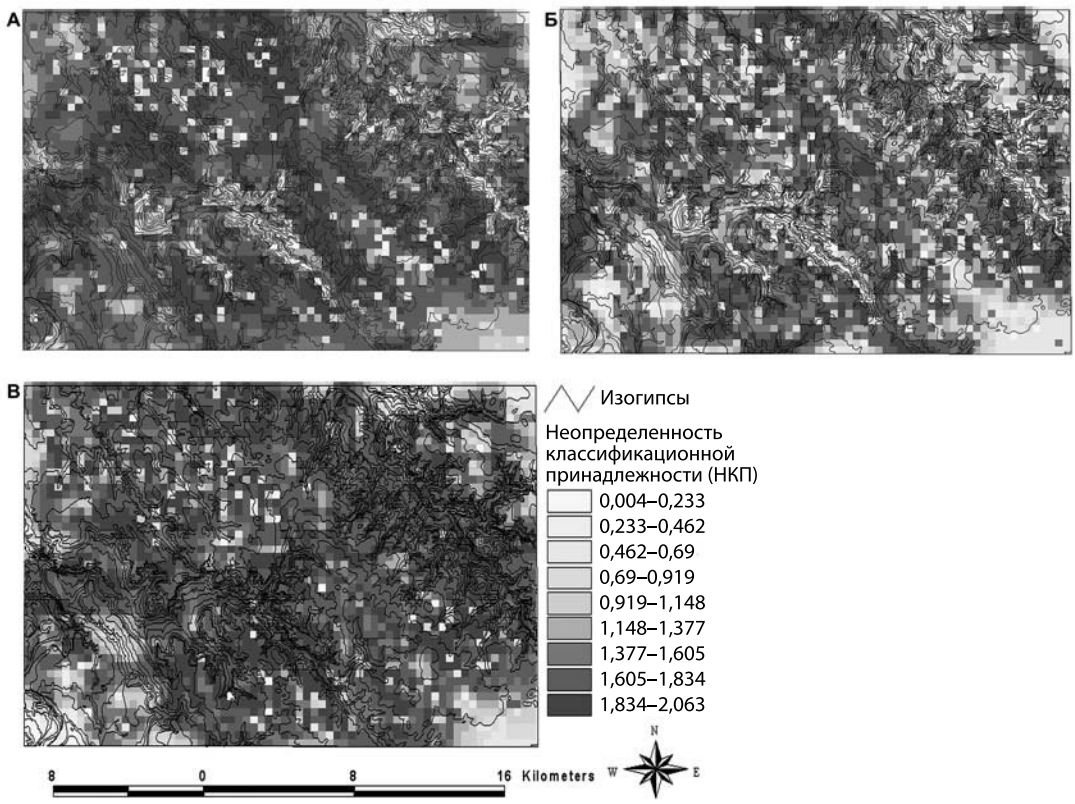

Рис. 80. Неопределенность классификационной принадлежности операционный территориальных единиц к классам почвенно-растительного покрова на основании морфометрических характеристик рельефа (среднетаежный ландшафт, Архангельская область, полигон «Заячья»). А — плеяда 1 (чувствительность к влажности). Б — плеяда 2 (чувствительность к трофности). В — плеяда 3 (положение в сукцессионном ряду).

Напомним, что у нас нет оснований утверждать, что существует жесткая связь между свойствами рельефа и свойствами ПРП. Практически все полученные коэффициенты детерминации дают основания предполагать многовариантность сочетаний свойств компонентов и наличие неучтенного моделью влияния мелкомозаичного варьирования. Поэтому однозначно определить принадлежность каждой ОТЕ к тому или иному классу ПРП в большинстве случаев невозможно. Более корректно будет утверждение: «с наибольшей вероятностью при данных условиях рельефа может сформироваться такой-то класс почвенно-растительного покрова». Более того, вероятностные карты и полевые наблюдения показывают, что в одной и той же ОТЕ могут сочетаться свойства разных классов, хотя бы в силу неодинаковой инертности компонентов на фоне динамических изменений. На рис. 80 оценена неопределенность классификационной принадлежности (НКП) операционных территориальных единиц для каждой плеяды свойств почвенно-растительного покрова. Очевидно, что многоуровенная модель парциальных геосистем, обособленных перераспределением минеральных веществ (плеяда 2), более адекватна

по сравнению с моделями других плеяд, поскольку гораздо бóльшую площадь занимают территории с низкой неопределенностью. Перераспределение влаги в ландшафте создает более континуальную пространственную структуру на выбранном уровне дробности описания (примерно урочищном). Безусловно, это отражает недостаточность данного уровня и необходимость учета контрастов микрорельефа.

Разумеется, наибольший интерес представляет многоуровенная картографическая модель, которая учитывает совместное действие факторов влажности и трофности, но при этом исключает наложение антропогенных факторов модификации почв и фитоценозов, то есть показывает естественную ландшафтную дифференциацию. По аналогичной схеме выявлены наиболее вероятные классы ПРП по свойствам, входящим в 1-ю и 2-ю плеяду. Дискриминантной моделью при критерии Фишера F>=1 отобраны 8 наиболее значимых морфометрических характеристик рельефа, совокупность которых позволяет с точностью 40% различать 8 классов ПРП. Пространственное расположение предсказанных наиболее вероятных классов ПРП показано на рис. 81, А. Хорошо заметна компактность ареалов классов ПРП, по сравнению с моделями отдельно для 1-й и 2-й плеяд.

1-й класс формируется на возвышенных плоских широких водораздельных поверхностях при минимальной расчлененности рельефа с наличием слабо выпуклых форм малого размера (до 1200 м в поперечнике). Особенностью класса является наличие еловых чернично-зеленомошных лесов с хорошим возобновлением, повсеместное формирование торфянистого горизонта мощностью 10–20 см, глубокое оподзоливание при повышенной мощности песчано-супесчаного чехла.

2-й класс формируется в краевых густорасчлененных хорошо дренированных частях водораздельных поверхностей и придолинных склонов, с относительно богатыми почвами, в прошлом подвергавшихся распашке. Характерны березово-сосновые, местами с ольхой, щитовниково-кисличные леса на агродерново-подзолистых почвах. Частое присутствие малины и ольхи серой свидетельствует о наследии распашки и искуственного привноса питательных веществ.

3-й класс характерен для неглубоко-, но густо расчлененных местностей, где происходит начальное формирование стоковых систем и врезание их в моренные суглинки. Повышенное минеральное питание способствует формированию субнеморальных свойств фитоценоза. Характерны осиново-еловые и елово-осиновые леса майниково-снытево-кисличные на мелкоподзолистых или дерново-подзолистых почвах.

4-й класс формируется в краевых слаборасчлененных частях водораздельных поверхностей и на широких террасах рек. Обратим внимание на предсказанное моделью отсутствие различий ПРП в, казалось бы, двух несходных позициях рельефа — на широких террасах Заячьей и Кокшеньги и в краевых частях плоских водораздельных поверхностей. На самом деле существует реальное сходство ПРП, объясняемое повышенной мощностью песчано-супесчаного чехла, развитием подзолистого процесса в почвах и бореальных черт фитоценозов при пониженном минеральном питании. Господствуют елово-сосновые зеленомошные леса чернично-брусничные, с высокой долей можжевельника, местами с белоусом, щучкой, на глубокоподзолистых почвах. Данный пример показывает *неочевидность или неповсеместность приоритета генетического принципа разделения природно-территориальных комплексов, традиционного предпочитаемого русскоязычным ландшафтоведением*. Геосистемы этого класса частично подвергаются распашке, но качество почв низкое, в краевых частях водораз-

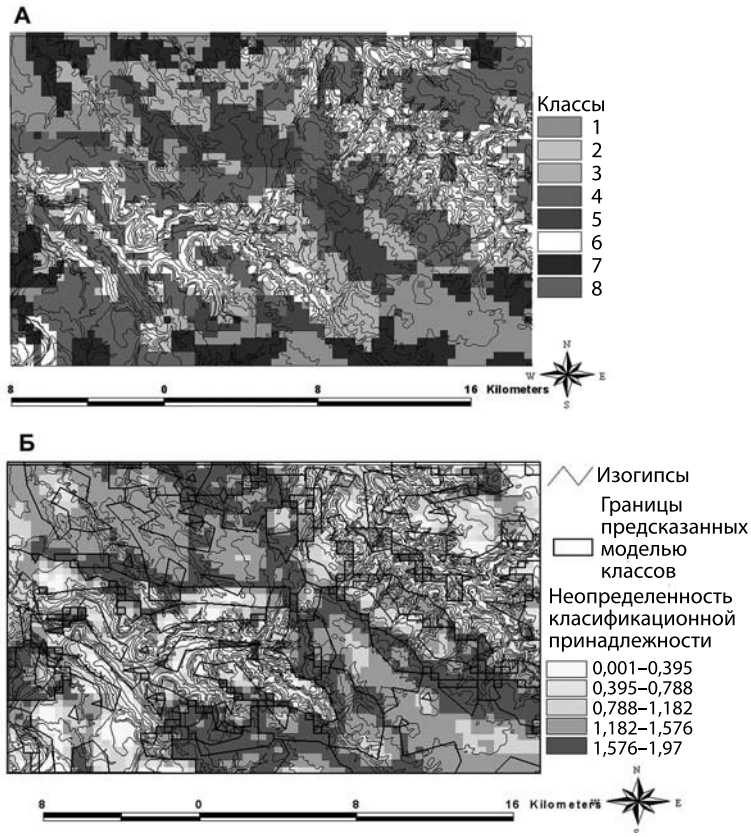

Рис. 81. Многоуровенная модель парциальных геосистем, выделенных по чувствительности свойств почв и фитоценозов, чувствительных к влажности и трофности (1-я и 2-я плеяды), и свойствам рельефа значимых уровней вмещающих геосистем (среднетаежный ландшафт, Архангельская область, полигон «Заячья»). А — наиболее вероятные классы почвенно-растительного покрова (пояснения см. в тексте). Б — неопределенность классификационной принадлежности.

дельных поверхностей проявляется оглеение. Большинство таких участков в 1990-е гг. было заброшено и ныне зарастают ивой, сосной и березой.

5-й класс формируется в центральных частях плоского слаборасчлененного междуречья Заячьей, Соденьги и Мостницы при слабом дренаже и значительной роли супесчаных и торфянистых отложений, экранирующих поступление минеральных веществ из карбонатных моренных суглинков. По сравнению с похожим 1-м классом, геосистемы 5-го класса принадлежат вмещающим крупным геосистемам (с размерами 2800–6000 м) с большей горизонтальной и вертикальной выпуклостью и горизонтальной расчлененностью, что отражается на менее интенсивном торфонакоплении (до 10 см). Преобладают елово-осиново-березовые леса черничные бореально-мелкотравные зеленомошно-долгомошные на торфянисто-подзолистых глееватых почвах.

6-й класс отличается наиболее густо- и глубокорасчлененным рельефом, что связано с расположением в зоне максимального неотектонического дробления, наивысшей

дренированности и максимального влияния богатых основаниями коренных пород. Характерны елово-березово-осиновые леса субнеморальные кислично-снытевые на дерново-подзолистых и агродерново-подзолистых почвах, рендзинах. В силу максимальной дренированности и богатства почв геосистемы этого класса в основном распаханы, леса сохранились только в наиболее крутосклонных позициях и на коренных останцах.

7-й класс формируется в неглубокорасчлененных верховьях рек и обособляется от широких плоских водораздельных поверхностей (класс 1) благодаря специфическому сочетанию относительно бедных и влажных местообитаний, формирующихся при пониженной мощности песчано-супесчаного чехла на очень пологих склонах с сосново-еловыми лесами бореального облика долгомошно-сфагновыми лесами на торфянисто-подзолистых почвах.

8-й класс отличается положением в полосе слабовогнутых водосборных понижений в пределах водораздельных поверхностей с высокой степенью заболоченности. Характерны сосново-березовые хвощово-черничные сфагновые леса на почвах с повышенной мощностью торфяного или перегнойного горизонта, часто без оподзоливания, в том числе торфяно-глееземы.

Карта неопределенности классификационной принадлежности (рис. 81, Б) показывает достаточно обширные области высокой неопределенности, которую можно интерпретировать как наибольшую пластичность ПРП в переходных зонах. В этих зонах с близкой вероятностью могут существовать разные сообщества и почвы. Безусловно, это следует связывать, прежде всего, с большей чувствительностью свойств биотических и биокосных компонентов к дробным форм рельефа, чем к формам, улавливаемых ЦМР с разрешением 400 м (рис. 68 — цифра 7). Поэтому продемонстрируем *значимость узколокальных эффектов* для дифференциации фаций на примере двух секторов высокой неопределенности классификационной принадлежности, изображенной на рис. 81, А.

Один из секторов высокой НКП соответствует выпуклой форме — узкой водораздельной поверхности между бассейнами малых рек Козловка и Стругница, второй — вогнутой форме мезорельефа балке Становской. Оба участка обеспечены квазирегулярной сеткой по 100 ландшафтных описаний со средним расстоянием между ними 100 м на междуречье, 20 м — в балке (Хорошев и др., 2008). Выделение осей дифференциации свойств компонентов проведено по аналогичной процедуре, как и для всего участка «Заячья».

Для водораздельной поверхности (участок «Козловка») проведен вычислительный эксперимент с целью определить оптимальное сочетание дробности классификации свойств компонентов и классификации рельефа. Для этого методом дискриминантного анализа определялась доля корректно распознанных классов почвенно-растительного покрова при разных сочетаниях размера ОТЕ и размера вмещающей геосистемы. Для 4-х, 6-ти, 8-ми, 10-ти, 12-ти классов ПРП расчитывались (табл. 32):

а) доля классов корректно распознанных четырьмя морфометрическими характеристиками рельефа (вертикальная и горизонтальная расчлененность, вертикальная и горизонтальная кривизна) при размере ОТЕ 10 м и размерах вмещающей геосистемы 30, 70, 110 м;

б) доля классов корректно распознанных четырьмя морфометрическими характеристиками рельефа при размере ОТЕ 30 м и размерах вмещающей геосистемы 90, 270, 330 м;

в) доля классов корректно распознанных совокупностью морфометрических характеристик рельефа в окрестностях 30, 70 и 110 м при размере ОТЕ 10 м (метод прямого пошагового выбора с критическим значением критерия Фишера F>=1);

г) доля классов корректно распознанных совокупностью морфометрических характеристик рельефа в окрестностях 90, 270 и 330 м при размере ОТЕ 30 м (метод прямого пошагового выбора с критическим значением критерия Фишера F>=1);

д) доля классов корректно распознанных совокупностью морфометрических характеристик рельефа в окрестностях 1200, 2000, 2800, 3600 и 6000 м при размере ОТЕ 400 м (метод прямого пошагового выбора с критическим значением критерия Фишера F>=1).

Для последнего случая морфометрическая характеристика определялась для точки описания, наиболее близкой к центру пиксела с размером 400 м, для остальных точек значения интерполировались, чтобы отразить континуальное изменение характеристик окрестностей.

При всех вариантах расчета разделение на 4 класса свойств ПРП наиболее адекватно отражается свойствами рельефа. При этом специфическое сочетание форм рельефа существует для чуть более половины описанных фаций. Следовательно, другая половина фаций на современной стадии развития либо находится в некотором переходном состоянии, не вполне адаптированном к абиотическим условиям, либо, наоборот, уже преодолела жесткие абиотические рамки благодаря саморазвитию вертикальной структуры. Размер ОТЕ вмещающей геосистемы 30 м лучше отражает фациальную дифференциация ПРП, чем 10 м и 400 м при оптимальном линейном размере вмещающей геосистемы 90 м. Оценка совокупного влияния свойств рельефа вмещающих геосистем всех размеров при ОТЕ 30 м дает примерно такой же результат. Следовательно, при данных параметрах дробности классификации и масштаба вклад вышестоящих уровней можно считать несущественным.

Таблица. 32.

Распознавание классов свойств почвенно-растительного покрова морфометрическими свойствами рельефа вмещающих геосистем. Доля фаций, корректно классифицированных методом дискриминантного анализа. Среднетаежный ландшафт в Архангельской области, полигон «Козловка».

Размер ОТЕ (разрешение цифровой модели рельефа), м	Размер вмещающей геосистемы (сторона квадратной окрестности), для которой рассчитаны морфометрические характеристики рельефа	Количество классов по свойствам почвенно-растительного покрова (совокупности всех осей дифференциации)				
		4	6	8	10	12
10	30	52	32	34	27	24
10	70	51	35	35	29	23
10	110	49	35	38	28	29
30	90	54	36	35	31	29
30	270	51	36	35	32	35
30	330	48	36	37	31	34
10	Все (прямой пошаговый выбор, F=1)	49	49	38	28	27
30	Все (прямой пошаговый выбор, F=1)	55	39	43	37	33
400	Все (прямой пошаговый выбор, F=1)	53	39	46	36	33

Содержание корректно распознаваемых классов ПРП таково.

1-й класс формируется в вогнутых слаборасчлененных позициях в водораздельном секторе. Преобладают елово-сосновые леса бруснично-черничные осоково-бореально-мелкотравные долгомошно-зеленомошные на торфянисто-подзолистых глееватых почвах.

2-й класс формируется в присклоновых позициях без эрозионного расчленения при соседстве с плоскими и крутосклонными фациями. Преобладают елово-березово-со-

сновые леса субнеморальные снытево-кисличные на дерново-подзолистых и серогумусовых почвах.

3-й класс формируется в неглубоко-, но густо расчлененных приводораздельных позициях, где начинает формироваться поверхностный сток по водосборным понижениям и неглубоким ложбинам. Преобладают березово-еловые леса кисличные на дерново-подзолистых и агродерново-подзолистых почвах.

4-й класс формируется в притальвеговых позициях в верховьях эрозионных форм. Преобладают ольхово-березово-елово-сосновые леса таволгово-разнотравные на дерново-подзолистых, местами перегнойных или серогумусовых почвах.

При возрастании количества классов ПРП больше 4-х доля корректно распознаваемых классов закономерно убывает при всех комбинациях параметров масштаба. Однако обращает на себя внимание, что при размере ОТЕ 30 м и окрестности 270 и 330 м (сопоставимом с шириной описываемого урочища) деление на 12 классов распознается практически не хуже, чем деление на 8 классов при худшем качестве распознавания 10 классов ПРП. Таким образом, очевидна целесообразность двух уровней классификации ПРП — на 4 и 12 классов, — поскольку они адекватно отражают рамочные условия вмещающих геосистем, по размерам сопоставимым с размером урочищ в данной местности.

Многоуровенная модель межкомпонентных отношений оказывается более адекватна, чем двухуровневая, при размере ОТЕ 10 м и выделении 6 классов ПРП, при размере ОТЕ 30 м и выделении 8 классов ПРП. При других сочетаниях параметров масштаба многоуровенная модель не дает дополнительного объяснения варьирования свойств ПРП.

Таким образом, проведенный анализ показал целесообразность отражения варьирования свойств ПРП на нескольких иерархических уровнях.

Поскольку, как уже было показано, есть два аспекта проблемы масштаба — размер ОТЕ и охват — имеет смысл вернуться к выбору способа оптимальной классификации рельефа, который наиболее адекватно отражал бы совместное варьирование групп свойств почв и растительного покрова. Одновременно рассмотрим вопрос определения необходимой дробности классификации рельефа, то есть количества классов.

На примере балочного урочища (участок «Становская балка») применен способ выявления межуровневых связей, который подразумевает дискретное представление рельефа через классы, выделенные по морфометрическим характеристикам, и оценку распознавания полученных классов свойствами ПРП. Он может давать несколько иной результат по сравнению с описанным выше (разделы 4.4 и 4.6.2) континуальным представлением рельефа вмещающих геосистем, поскольку резонансный размер вмещающей геосистемы определяется не для каждой из взаимонезависимых осей отдельно, а для их совокупности. Этот способ противоположен по отношению к продемонстрированному для участка «Козловка», где рассматривалось распознавание свойств рельефа классами ПРП. Проведен эксперимент с последовательным расчетом доли корректно классифицированных точек описания при заданном количестве классов рельефа как группирующей переменной и разных вариантах группировок свойств ландшафта как независимых переменных. В качестве независимых переменных в разных вариантах использовалось 5 групп, каждая из которых включала 4 оси дифференциации свойств компонентов: 1) обилия видов травостоя, 2) мощностей почвенных горизонтов, 3) химических свойств верхнего горизонта почв, 4) цвета почв, 5) механического состава почв. В одном из вариантов в качестве группы независимых переменных использовалась вся совокупность осей дифференциации — всего 20. Использовался стандартный метод без выбора переменных, то есть

все 4 переменные включались в расчет. Априорные вероятности считались одинаковыми для всех групп. Для каждой из 5 групп свойств, включающей 4 оси, и для одной группы, включающей все 20 осей, проведено 30 вычислительных экспериментов: классификации рельефа по морфометрическим свойствам окрестностям 5 размеров для 3 уровней дробности классификации рельефа (2, 4, 6 классов) при 2 вариантах размеров ОТЕ (10 и 30 м). В качестве критерия приоритетного способа выделения целостных геосистем использовалось сочетание максимальной доли корректно классифицированных точек при минимальном значении критерия Wilks-Lambda. Смысл процедуры — установить, какое количество классов рельефа наиболее адекватно различает гипотетические дискретные сочетания свойств компонентов. Основной задачей применения метода было получить ответ на вопрос: существует ли приоритетный способ классификации рельефа, который был бы наиболее значим для распознавания максимального количества свойств разных компонентов ландшафта? Если такой (или такие) способ классификации удается выявить, то его можно рассматривать как основание для выделения целостных геосистем с согласованным сочетанием свойств компонентов.

Полученные результаты (табл. 33) позволяют считать наиболее адекватным для отображения межуровневых связей в балочном урочище линейный размер ОТЕ 10 м и линейный размер вмещающей геосистемы 210 м, причем наиболее целесообразно выделять целостные геосистемы на основе четырех классов рельефа. При таких параметрах комбинации большинства свойств наилучшим образом распознаются классами рельефа вмещающих геосистем. Иначе говоря, существует наименьшее количество пересечений в диапазонах значений свойств между классами рельефа. Для каждого из четырех классов рельефа вмещающих геосистем существует своеобразный диапазон значений свойства, не пересекающийся с диапазонами, типичными для других классов. Обратим внимание, что при выделении двух классов рельефа с ОТЕ 10 м приоритетное влияние оказывает окрестность с линейными размерами 270 м, а при выделении шести классов — окрестность 330 м.

При ОТЕ с линейным размером 30 м приоритетный размер вмещающей геосистемы не может быть определен однозначно. Окрестности 150 и 270 м становятся приоритетными реже, чем другие окрестности при выделении 2, 4 или 6 классов рельефа. При выделении 4 классов рельефа есть некоторые основания считать приоритетным размером вмещающих геосистем 90 и 330 м, однако нельзя утверждать, что при этом существуют целостные геосистемы, так как для некоторых свойств максимальная доля корректно классифицированных точек приходится на другие окрестности. При выделении двух классов рельефа мощности почвенных горизонтов, цветовые характеристики почв и видовой состав травостоя подчиняются свойствам вмещающих геосистем с линейными размерами 90 м. При выделении шести классов рельефа «максимумы» корректной классификации приходятся на окрестность 210 м, но опять же этого нельзя утверждать про все свойства.

Продемонстрированный опыт двухуровневого и многоуровенного картографирования геосистем позволяет сделать ряд общих заключений.

Проверка гипотезы полимасштабности геосистемных взаимодействий подтвердила наличие эмерджентных эффектов, возникающих в ПТК от трансляции информации одновременно несколькими уровням вмещающих геосистем. Показана большая значимость неаддитивных эффектов, когда определенный интервал значений свойства ПТК достигается только при необходимом сочетании значений других свойств. Одно и то же свойство не может быть повсеместно объяснено одним и тем же фактором

Таблица. 33.

Распознавание свойств почвенно-растительного покрова классами рельефа вмещающих геосистем, выделенными по морфометрическим свойствам квадратной окрестности. Доля фаций, корректно классифицированных методом дискриминантного анализа. Среднетаежный ландшафт в Архангельской области, полигон «Становская балка».

Группы осей дифференциации	Количество классов рельефа														
	2					4					6				
	Линейный размер квадратной окрестности														
	90 м	150 м	210 м	270 м	330 м	90 м	150 м	210 м	270 м	330 м	90 м	150 м	210 м	270 м	330 м
	Линейный размер ОТЕ (разрешение цифровой модели рельефа) 10 м														
Горизонты почв	57	59	69	57	61	41	34	37	30	39	33	29	21	22	25
Химические свойства почв	59	56	57	78	75	44	46	52	49	47	41	52	51	42	40
Цвет почв	65	72	59	71	65	43	46	42	46	44	30	30	36	31	34
Механический состав почв	65	77	65	74	77	44	50	56	51	51	40	39	41	39	43
Травы	54	70	62	66	61	41	43	44	43	40	33	34	28	30	30
Все оси	77	91	84	88	80	65	76	78	78	65	64	70	71	70	69
	Линейный размер ОТЕ (разрешение цифровой модели рельефа) 30 м														
Горизонты почв	62	52	58	65	60	35	32	33	36	46	19	25	23	25	30
Химические свойства почв	64	66	80	57	76	56	51	45	44	54	38	41	42	36	36
Цвет почв	70	71	68	57	69	36	39	44	46	45	33	37	38	31	36
Механический состав почв	68	72	72	62	75	60	47	39	50	51	37	43	36	40	36
Травы	68	61	60	63	63	44	44	47	42	37	28	34	30	34	34
Все оси	84	87	88	82	85	78	73	65	69	75	64	75	72	66	64

или группой факторов. В ландшафте наблюдается варьирование значимости факторов от места к месту. Плеяды свойств, чувствительных к трофности, в большей степени определяются рельефом вмещающих геосистем, чем плеяды свойств, чувствительных к влажности. Поэтому для изученного ландшафта Архангельского среднетаежного полигона многоуровневое картографирование рельефа дает больше ландшафтной информации о трофотопах и соответствующих фитоценозах, чем о гигротопах. В изученном ландшафте равновесные закономерные отношения между свойствами ПТК и свойствами вмещающих геосистем наблюдаются в менее расчлененных местностях; возрастание расчленения рельефа способствует упрощению или распаду связей с вмещающими геосистемами. Наше исследование показало неочевидность или, по крайней мере, неповсеместность приоритета генетического принципа разделения природно-территориальных комплексов: сходный почвенно-растительный покров может возникать на участках различного генезиса при сходстве условий минерального питания и морфологических свойств вмещающих геосистем.

Глава 5

Полимасштабный анализ структуры ландшафта в применении к ландшафтному планированию

В этой книге не преследуется цель глубоко погружаться в вопросы ландшафтного планирования. Однако автор видит ряд применений разработанных методологических приемов к некоторым задачам ландшафтного планирования, которые прямо вытекают из общих принципов, предложенных ранее для ряда модельных ситуаций природопользования (Кощеева, Хорошев, 2008; Хорошев, 2009, 2011, 2012б; Khoroshev, Koshcheeva, 2009; Khoroshev, 2010; Дьяконов, Хорошев, 2011; Хорошев, Чижова, 2013). В контексте вышеизложенных результатов наиболее уместным представляется дать некоторые иллюстрации принципа иерархичности планировочных решений применительно к планированию лесопользования. Прежде чем перейти непосредственно к изложению примеров применения нашей методики к ландшафтно-планировочным задачам необходимо кратко остановиться на авторском видении сути ландшафтно-географического подхода применительно к территориальному планированию вообще и ландшафтному планированию в частности.

Ландшафтное планирование, как известно, пока не имеет в России законодательного статуса (в отличие от, например, Германии, Словакии, Чехии) и пока может рассматриваться лишь как идеология, которая частично может быть реализована через существующие инструменты лесоустройства, землеустройства, территориального планирования.

Суть этой идеологии, на наш взгляд состоит, прежде всего, в корректном применении информации об иерархии вертикальных (межкомпонентных) связей в ландшафте и горизонтальных (латеральных) связей между геосистемами в процессе принятия пространственных решений о размещении видов хозяйственной деятельности и охраны ландшафтов. Результатом применения ландшафтно-планировочной идеологии должна являться максимальная адаптация многофункционального землепользования к ландшафтной структуре. В ландшафтоведении ключевое значение для развития ландшафтного планирования имеет представление о полиструктурности, иерархичности и цепных реакциях между компонентами ландшафта. Полиструктурность требует применения разных типов описания пространственной структуры в зависимости от целевой функции планировочных решений и типов потоков вещества, которые ими затрагиваются. Разные типы взаимонезависимых структур организованы в разные иерархии. Прогноз цепной реакции в ландшафте, возникающей при размещении того или иного вида деятельности, возможен при точном знании о физических механизмах взаимодействия компонентов и о включенности их одновременно в серию независимых друг от друга процессов, происходящих в разных пространственно-временных масштабах. Если качественные модели межкомпонентных связей издавна являлись предметом науки о ландшафте, то разработка количественных строго формализован-

ных технологий разделения вкладов разномасштабных процессов пока находится на ранней стадии развития.

При планировании хозяйственной деятельности с применением ландшафтного подхода существует необходимость строгого выбора иерархического уровня, который является основным для управления или использования свойств того или иного свойства ландшафта, которое сопряжено со множеством других свойств. Удаленные эффекты, или эффекты дальнодействия, обусловленные обменом веществом, энергией и инфомацией между геосистемами, заслуживают наиболее пристального внимания ландшафтоведения в применении к планировочным задачам. По мнению автора, их исследование должно являться наиболее привилегированным вкладом науки о ландшафте в развитии такой междисциплинарной сферы деятельности как территориальное планирование. Об этом еще 40 лет назад писал, например, А.А. Крауклис, который считал, что «эффект дальнодействия играет гораздо большую роль в функционировании геосистем, чем взаимосвязи компонентов в масштабах малых участков земной поверхности» (Крауклис, 1975, с. 275). Как следует из предыдущих глав, обычна ситуация, когда вмещающие госистемы нескольких иерархических уровней вносят сопоставимый вклад в пространственное варьирование и, возможно, в поведение во времени того свойства ландшафта, которым предполагается управлять посредством планировочных решений. Корректный выбор иерархического уровня позволяет извлекать пользу из цепных реакций между компонентами ландшафта или, наоборот, избежать нежелательных цепных реакций.

Другой важный для планировочных решений аспект ландшафтной организации, которому много внимания было уделено в предыдущих главах, — это варьирование типов межкомпонентных отношений в пространстве и возможность идентификации ареала, в котором компоненты связаны по единому правилу. Тем самым, планировщик получает возможность:

а) интерпретировать процесс, сформировавший ту или иную структуру (например, движение грунтовых вод в зависимости от рельефа),

б) знать мощность его влияния на компоненты ландшафта в каждой точке ареала (например, наблюдая за долей гигрофитов);

в) прогнозировать будущее состояние конкретного ПТК в результате изменения мощности основного организующего пространство фактора (например, понижения уровня грунтовых вод) по аналогии с другим ПТК ареала, уже испытывающего такое воздействие;

г) оценить степень желательности такого изменения;

д) принять решение о допустимости изменения структуры ПТК в результате планировочного решения, влияющего на природный фактор.

Важно, что используя, по сути, метод аналогий, мы точно знаем, в пределах какого ареала (необязательно компактного) или типа ландшафтных условий действует конкретное правило пространственной организации, выраженное математически, и к какой территории допустимо применять аналогии.

Степень чувствительности свойства к изменению фактора дифференциации (например, росту увлажнения) можно оценить, если мы знаем:

- ✓ положение конкретного ПТК на оси значений каждого из экологических факторов пространственной дифференциации (увлажнения, обеспеченности минеральным питанием, освещенности, стадии сукцессии и др.),

- ✓ тип статистического распределения «оси» (то есть интегральной переменной для нескольких коррелирующих свойств),
- ✓ позицию данного интервала значений в распределении (на гистограмме — фоновое, в области положительных или отрицательных отклонений).

Рассмотрим несколько типовых случаев (рис. 82).

Если гистограмма свидетельствует о нормальном распределении, а значение свойства в данном ПТК близко к модальным (фоновым), то, скорее всего, ПТК по данному свойству находится в зоне устойчивости (рис. 82, А, 1). Тогда требуются большие усилия (то есть мощный неравновесный процесс), чтобы «сместить» его в область редко встречающихся значений.

Если гистограмма отражает нормальное распределение, а значение свойства в данном ПТК находится в периферийной зоне распределения, то, скорее всего, ПТК может быть неустойчив на фоне ландшафта с устойчивой пропорцией элементов: он нетипичен и поэтому уязвим (рис. 82, А, 2). В таком состоянии, например, находятся ПТК с популяциями растений на краю ареала вида.

Если гистограмма отражает отклонение от нормального распределения с асимметричным или полимодальным распределением, а значение свойства в данном ПТК находится в зоне модальных значений, то вероятна принадлежность ПТК к ареалу максимально интенсивного проявления некоторого ландшафтоформирующего прогрессирующего процесса, и состояние данного свойства может быть достаточно устойчиво (рис. 82, Б, 3).

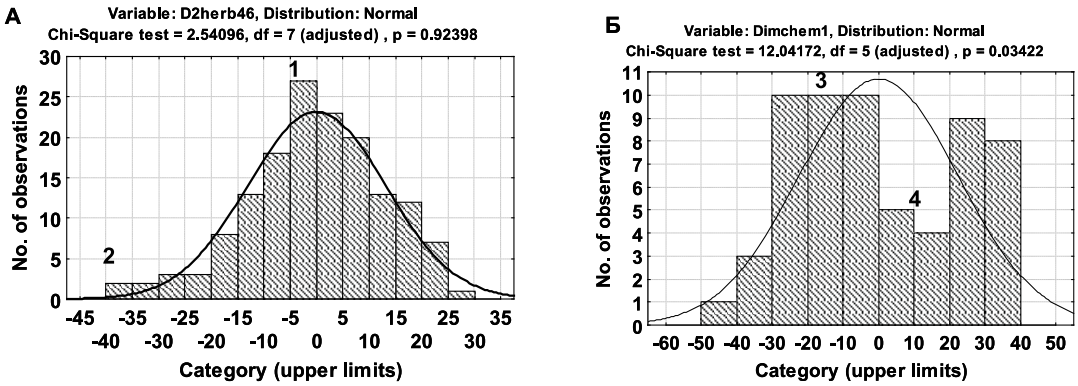

Рис. 82. Типовые интерпретации устойчивости состояния свойства ПТК по гистограммам значений свойств.

А — пример нормального распределения свойства петрофильности травяного яруса фитоценоза Айтуарской степи (отрицательные значения — высокая петрофильность, положительные значения — низкая петрофильность). Б — пример полимодального распределения, отклоняющегося от нормального, свойства обеспеченности основаниями и фосфором черноземных почв Айтуарской степи (отрицательные значения — высокое содержание фосфора, низкое содержание кальция при периодически промывном режиме в днищах эрозионных форм; положительные значения - низкое содержание фосфора, высокое содержание кальция при непромывном режиме на коренных склонах и гребнях). 1, 2, 3, 4 — объяснения см. в тексте.

Если гистограмма показывает асимметричное или полимодальное распределение, а значение свойства в данной точке далеко от модальных, то весьма вероятна неустойчивость современного состояния ПТК, причем мера удаленности от модальных значений может одновременного служить как мера удаленности от наиболее устойчивых состояний (рис. 82, Б, 4).

Знание о корреляционных связях между свойствами позволит прогнозировать, какие свойства будут сопряженно меняться или оставаться устойчивыми.

Вряд ли существует некий интегральный показатель устойчивости геосистемы «вообще», равноценно описывающий возможное поведение каждого свойства в меняющихся условиях. Поэтому важно сгруппировать свойства компонентов ландшафта таким образом, чтобы в каждой группе значимость факторов пространственной дифференциации была сходной. Тогда можно считать сопоставимыми характерные времена процессов, управляющих свойствами одной группы. Если есть хотя бы приблизительное представление об условиях восстановления группы свойств компонентов (то есть влияющих на нее факторах), то можно получить ряд важных для оценки устойчивости и ландшафтного планирования результатов:

1. степень «обязательности» восстановления группы взаимосвязанных свойств после нарушения;
2. возможность управления процессом восстановления:
3. необходимое для восстановления время;
4. степень предсказуемости хода восстановительных процессов;
5. целесообразность или реалистичность планирования на том или ином иерархическом уровне организации ландшафта.

Целью планировочных мероприятий, зависимых от оценки устойчивости геосистем, может быть либо максимально длительное использование какого-либо свойства ландшафта (использование «надежности»), либо защита (максимально возможное «продление жизни») геосистем с неустойчивыми в существующей ландшафтной обстановке свойствами, либо восстановление утраченных желательных для человека свойств геосистемы.

В целях управления ландшафтом и прогнозирования последствий воздействия свойства компонентов ландшафта можно объединить, как уже говорилось, в следующие плеяды:

1. строго контролируемые морфолитогенной основой (например, собственным рельефом ПТК или рельефом вмещающей геосистемы);
2. определяемые взаимодействием нескольких компонентов (например, почв и фитоценоза);
3. определяемые взаимодействиями свойств одного компонента (например, ярусов фитоценоза между собой или видов одного яруса);
4. случайные процессы (например, порожденные климатическими явлениями или деятельностью животных, нестрого привязанных к конкретному виду ПТК).

Ниже будет описано различие ландшафтно-планировочных подходов для каждой из этих плеяд.

Следует принять во внимание, что то или иное свойство компонента (например, обилие вида растений) может подчиняться одному или нескольким факторам. Используемые в работе методы снижения размерности позволяют ранжировать значимость и вклад каждого фактора в наблюдаемое значение свойства. Степень многофакторности пространственной

дифференциации свойства (одному или нескольким факторам подчиняется свойство) пропорциональна сложности прогноза его изменений и восстановления при нарушении. Кроме того, еще раз подчеркнем, что речь идет не о бесконечном «препарировании» ландшафта на отдельные свойства, а о *выделении плеяд свойств, которые сопряженно меняются в пространстве и времени*. Это является выражением идеи полиструктурности ландшафта, который благодаря этому может меняться не весь целиком одновременно, а реагировать лишь частью свойств, в том числе благодаря разной инерции компонентов.

Первая плеяда свойств компонентов ландшафта подчиняется свойствам рельефа и/или почвообразующих пород. Какое бы изменение не постигло ландшафт (вырубка, распашка, подтопление…) эти свойства после прекращения воздействия рано или поздно восстановятся в рамках, предопределенных морфолитогенной матрицей. Данная плеяда свойств ландшафта обладает высокой эластичностью (способностью к восстановлению), но время восстановления различается в зависимости от характерного времени компонента. Нарушенная почва восстановится за столетия-тысячелетия, древесный ярус (точнее некоторые деревья) — за десятилетия-столетия, а травяный (точнее, некоторые виды трав) — за годы-первые десятилетия. *Планировочные мероприятия для регулирования этой плеяды свойств можно жестко привязывать к морфолитогенным границам*. При этом необходимо строго определить иерархический уровень организации рельефа, к которому чувствительна данная плеяда, и классификационные подразделения этого уровня использовать для «вписывания» мероприятий в морфолитогенные границы. Изменить или ускорить какими-либо хозяйственными мероприятиями эту траекторию, как правило, нельзя. Правда, легко представить, что восстановление древостоя можно ускорить рубками ухода, а восстановление почвы — искусственным внесением каких-либо веществ (скажем, известкованием), однако это возможно только при условии, что восстанавливаемое свойство подчиняется какому-либо еще фактору (вид деревьев — фактору межвидовых и внутривидовых взаимодействий, а почва — эдафическому фактору). Приведенные выше рассуждения относятся исключительно к свойствам, *полностью* контролируемым рельефом.

Допустим, с точки зрения ландшафтного планирования ценностью является обеспечение устойчивого существования популяций редких неморальных видов на границе ареала в средней тайге. Пусть доказано, что встречаемость неморальных видов зависит исключительно от рельефа (а точнее — контролируемых рельефом свойств ландшафта). Если они распространены всегда в широких глубоковрезанных долинах и не встречаются на плоских междуречьях, то вырубка леса на склоне не должна считаться для них необратимой катастрофой: сообщество сохранится или легко восстановится по мере естественного восстановления древесного яруса. Примерно такой вариант устойчивости имел в виду как основной Н.А. Солнцев (1984). Приведенный пример достаточно условен; в нем содержится информация о подчиненности группы неморальных видов по крайней мере еще одному фактору — взаимодействию с другим ярусом фитоценоза. Тем не менее, значимость морфолитогенного фактора для многих свойств более высока, по сравнению с другими факторами. Следует лишь оценить на следующих этапах анализа, является ли вклад иных факторов пренебрежимо малым для планирования хозяйственных решений.

Планировочное решение о привязке мероприятий к морфолитогенным границам непременно упирается в проблему выбора иерархического уровня организации рельефа. В приведенном выше примере о неморальных видах гипотетическая привязка хо-

зяйственных мероприятий к крупным мезоформам или макроформам рельефа вполне оправдана и реализуема. Однако рельеф, как показано в предыдущих главах, можно характеризовать на нескольких иерархических уровнях, используя современные технологии построения цифровых моделей рельефа при разных разрешениях (размерах пиксела, операционной территориальной единицы). Не исключено, что наиболее адекватное описание обилия ценных для охраны в тайге неморальных видов будет получено при учете и макроформ, и микроформ рельефа. Например, в долинах эти виды встречаются обязательно на любых микроформах, а на междуречьях — только по выпуклым микроформам, соответствующих отдельным фациям. Очевидно, что в условиях лесопромышленного природопользования практически невозможно вести столь мелкоконтурное хозяйство, чтобы исключить рубки в отдельных фациях с ценными неморальными видами. Для долин же в приведенном примере вполне реально назначать единую стратегию щадящего лесопользования, отличную от стратегии на плоских междуречных поверхностях. Если будет получен результат, что на всей территории встречаемость неморальных видов контролируется микрорельефом, то очевидна нереалистичность адаптации стратегии лесопользования по фациям. Вероятно, в таком случае придется принимать «волевое решение» о выборе лишь некоторых групп фаций с высоким обилием неморальных видов для создания особо защитных участков леса. Если же речь идет о ландшафтном дизайне внутри урочища (например, при проектировании рекреационной зоны), то разработать меры поддержания популяций неморальных видов путем проектирования тропиночной сети и расположения объектов на уровне фаций вполне реально. В приводившемся выше примере исследования в заповеднике «Кологривский лес» (раздел 4.7) оказалось, что доля неморальных видов в травяном ярусе адаптирована к группам мезоформ рельефа, и тогда способы управления этим свойством (в случае необходимости на незаповедных территориях) можно реализовывать, используя карту соответствующей дробности. Итак, реализация ландшафтно-планировочной идеологии проявляется для первой плеяды свойств в *адекватном выборе иерархического уровня геосистем* для принятия решений.

Вторая плеяда свойств не зависит от морфолитогенной основы; их пространственная дифференциация определяется межкомпонентными взаимодействиями между фитоценозом, почвами, водами. В этом случае нельзя быть уверенным, что после нарушения одного компонента (например, вырубки леса) он восстановится в прежнем виде, так как не исключается параллельное изменение свойств почв и вод. Г.А. Исаченко (1999) называет подобные процессы ведущими, отличая их от производных, которые не влияют на большинство компонентов. Например, в тайге после рубок широко распространен процесс формирования гумусового горизонта и подщелачивания почв под вторичными травяными мелколиственными лесами и/или повышение уровня грунтовых вод с оглеением почвы. Известно, что в северной тайге этот процесс может оказаться необратимым и привести к заболачиванию с изменением видового состава древостоя, в то время как в южной тайге обычно последующее «разболачивание» (Погребняк, 1968). Наше исследование в заповеднике «Кологривский лес» (южная тайга) показало обогащение почв основаниями по мере приближения к стадии доминирования старовозрастной осины, но последующее обеднение и подкисление по мере вытеснения мелколиственных пород темнохвойными.

Используем прежний пример с реализацией задачи сохранения популяций неморальных видов в тайге при лесопользовании. Пусть доказано, что неморальные виды распре-

деляются в пространстве таежного ландшафта независимо от рельефа, но сопряженно с морфологическим строением почв: популяции устойчиво встречаются при наличии гумусовых горизонтов, но не встречаются на подзолистых почвах без явного гумусонакопления. Тогда морфолитогенные границы непригодны для планирования мероприятий по охране неморальных видов. Способность популяций к восстановлению будет зависеть от наличия или отсутствия направленного развития почвенного профиля (прогрессирующее оподзоливание или гумусонакопление) либо периодических колебаний его строения. Можно допустить изменения строения почв в зависимости от факторов, не связанных с рельефом: например, климатическими изменениями. Установленные прогрессирующие изменения почвенного профиля, неблагоприятные для неморальных видов, могут сделать неэффективными мероприятия по защите местообитаний. Как уже упоминалось в разделе 4.7, наши исследования в заповеднике «Кологривский лес» показали смену типов отношений между химическими свойствами почв и свойствами фитоценозов по мере старения древостоя и приближения к климаксу: наблюдаемое в конкретный момент обилие неморальных видов может быть обманчиво и показывает лишь относительно короткую стадию развития ПТК. С другой стороны, может потребоваться работа по выявлению местообитаний с наибольшим «запасом прочности» почв, например с максимальной гумусированностью или с постоянным привносом гумусовых веществ из соседних геосистем. Таким образом, доминирование фактора межкомпонентных взаимосвязей может создавать значительную непредсказуемость способности изучаемого свойства к восстановлению и резко осложнять оценку устойчивости и планирование природопользования в отношении данного свойства.

Третья плеяда свойств может заключаться внутри одного компонента. В нашем исследовании это в основном относится к связям между ярусами фитоценоза. При этом, по сравнению с предыдущими случаями, резко повышаются «шансы» на взаимодействие ярусов в силу близости характерных времен. В одном варианте свойство А фитоценоза зависит от свойства Б фитоценоза, но свойство Б в свою очередь контролируется свойством В почв (то есть подчиняется 2-й группе факторов). Например, неморальные виды травостоя «привязаны» в южной тайге к древостоям с участием широколиственных пород, но последние постепенно исчезают вследствие прогрессирующего заболачивания почв. В другом варианте свойство Б подчиняется естественным колебаниям (например оконная динамика древостоя со случайно распределенными в пространстве вывалами по мере достижения определенного возраста), сопряженно с ним колеблется и свойство А независимо от почв или рельефа. В третьем варианте свойство Б следует за направленным изменением свойства А, например в ходе восстановительной сукцессии древостоя. Этому варианту соответствует описанный в разделе 4.7 случай постепенной бореализации травостоя в заповеднике «Кологривский лес» по мере восстановительной сукцессии через березу и осину к пихтово-еловому лесу. В этом случае существует механизм управления ходом процесса в желательном направлении (разумеется, речь не идет о заповеднике). Допустим, поставлена планировочная задача поддержания популяций неморальных видов в восстанавливающемся после рубки хвойно-широколиственном лесу. При этом известна положительная связь между обилием неморальных видов травостоя и обилием лиственных деревьев. Тогда возможно создание благоприятных условий путем рубок переформирования или ухода. Итак, реализация ландшафтно-планировочной идеологии проявляется для второй и третьей плеяд свойств *в учете межкомпонентных взаимодействий и их изменчивого характера* для принятия решений.

Четвертая плеяда свойств подчиняется случайным процессам и индицируется по отсутствию значимых связей со всеми остальными свойствами, с собственным рельефом ПТК и с рельефом вмещающих геосистем. Тогда невозможно охранять то даже очень ценное, что существует в конкретной фации лишь на краткой стадии ее развития (например, пока существует окно после вывала старых деревьев). Планировочное решение должно быть нацелено в данном примере на управление на уровне ландшафта или местности – не препятствовать подобной случайной оконной динамике, исключить искусственное выравнивание возрастного состава древостоя, иногда даже искусственно создавать мозаичность выборочными рубками. Требуется просто поддержание мозаичной пространственной структуры — «мерцающей мозаики» с кажущимся постоянным перемещением пятен по ландшафту в течение длительного периода при сохранении набора и пропорции элементов. Тогда условный ценный вид будет гарантированно присутствовать в любой момент времени «где-то» в данном ландшафте, хотя и необязательно в какой-то конкретной фации (которую, соответственно, нет смысла объявлять «особо защитным участком»). Обратим внимание, что реализация «географичной» ландшафтно-планировочной идеологии для четвертой плеяды свойств заключается в *учете взаимодействия элементов пространственной структуры ландшафта, необходимых пропорций пространственных элементов на достаточно большой территории, т. е. ее эмерджентных свойств*.

Переходя к примерам, необходимо предварительно выделить два уровня принятия планировочных решений. Первый обозначим как компетенцию собственно ландшафтного планировщика, задача которого — *разместить, «вписать» виды землепользования в ландшафтную структуру,* подобрать оптимальный вид использования для каждого ПТК, распределить виды деятельности в пространстве ландшафта с минимальной конфликтностью землепользования и максимальной экологической безопасностью. Участие экономиста в этом процессе должно способствовать еще и экономической эффективности принятых решений, а органов управления и местных жителей — социальной бесконфликтности. Второй уровень обозначим как *«технологический»*: он является компетенцией отраслевого специалиста. Его задача — выбрать оптимальную технологию для угодья, которое на первом уровне принятия решений признано наиболее целесообразным для данного ПТК. На втором уровне речь идет о подборе севооборота или пастбищеоборота, способа рубок, технологии строительства, дизайне для рекреационного использования и т.п.

Приведем пример логики разработки ландшафтно-планировочных рекомендаций на основе разделения вкладов факторов, действующих на нескольких иерархических уровнях.

Пусть в лесопромышленном районе целевой породой считается ель и для успеха лесохозяйственных мероприятий необходимо обеспечить максимально быстрое ее возобновление. Такова ситуация, например, на среднетаежном полигоне «Заячья» в Устьянском районе Архангельской области. Необходимо выяснить факторы пространственной дифференциации обилия елового подроста и выбрать стратегию лесовосстановительных мероприятий.

Для снижения размерности массива полевых данных применен уже многократно описанный выше метод многомерного шкалирования. Для древесного яруса (включая обилие видов в первом ярусе и в подросте) установлено 4 главных оси дифференциации. Обилие подроста ели подчиняется двум из них и описывается на 63% (табл. 34).

Первая по значимости ось описывает соотношение первичных еловых и вторичных сосновых лесов: обилие подроста ели имеет сильную положительную корреляцию с обилием ели в первом ярусе, более слабую положительную — с обилием березы, сильную отрицательную — с обилием сосны в первом ярусе и в подросте. Ось отражает положение геосистем на градиенте восстановительной сукцессии и показывает хорошо известный факт, что высокое обилие елового подроста достигается постепенно по мере вытеснения сосны и формирования сомкнутого елового древостоя. Ко второй по значимости оси (влажности) подрост ели безразличен. Третья ось отражает соотношение пород с разной требовательностью к минеральному питанию: с одной стороны требовательных осины и серой ольхи, с другой — менее требовательных ели и березы, в том числе интересующего нас подроста ели. К четвертой оси подрост ели также нечувствителен. Итак, на первом месте по значимости для возобновления ели ось сукцессии, на втором — ось богатства почв.

Таблица. 34.

Коэффициенты чувствительности свойств древостоя к осям дифференциации. Среднетаежный ландшафт в Архангельской области, полигон «Заячья».

Характеристики древостоя (обилие)	Оси дифференциации древостоя			
	Сукцессия 1 (в бедных местообитаниях)	Влажность	Трофность	Сукцессия 2
Сосна	0,37	0,20	–0,90	–0,25
Ель	–0,78	–0,38	–0,32	0,39
Береза	–0,36	–0,24	–0,02	–0,78
Осина	–0,06	–0,39	0,70	0,00
Ольха	–0,24	1,08	0,17	0,12
Сосна подрост	1,35	0,24	0,08	–0,05
Ель подрост	–0,85	–0,07	–0,32	0,04
Береза подрост	0,63	–0,40	–0,32	0,47
Осина подрост	0,24	–0,70	0,47	–0,03
Ольха подрост	–0,29	0,67	0,44	0,09

Теперь необходимо выяснить, насколько значения обеих осей подчиняются стабильным во времени признакам рельефа и если да, то какого иерархического уровня, а также — каково соотношение вкладов морфолитогенного фактора и фактора внутриуровенных межкомпонентных связей. Для этого применяем описанный выше *«метод суперфакторов»,* т.е. методом главных компонент выделены плеяды коррелирующих друг с другом «осей» многомерного шкалирования. Полученные результаты свидетельствуют, что первый (сукцессионный) фактор дифференциации гораздо слабее связан с совокупностью характеристик рельефа разных окрестностей (описывается 16% варьирования), чем третий (эдафический) (39% варьирования) (табл. 35). Это означает, что в разные периоды не было строго предпочтения тех или иных условий рельефа: в любой период рубки охватывали более или менее широкий набор условий рельефа. Отметим, что в Кологривском районе Костромской области, наоборот, довольно четко обозначается связь между сукцессионной стадией и условиями рельефа – иными словами, в разные периоды предпочитались разные условия рельефа, хотя иногда и вынужденно. Там в первую

очередь (1950–60-е гг.) вырубались леса плоских междуречий, позже (1970–1990-е гг.) в силу истощения наиболее удобных запасов — леса менее удобные для рубок склонов. В Архангельской области межкомпонентные связи более существенны для сукцессионного фактора дифференциации елового подроста (34% варьирования), чем для эдафического (20% варьирования) (табл. 35). Отметим, что четыре суперфактора, связанные с рельефом, описывают более значительную часть варьирования эдафического фактора, чем четыре морфометрические характеристики любой из пяти гипотетически влияющих окрестностей (с размером квадрата 1200, 2000, 2800, 3600 и 6000 м — соответственно, 19, 22, 16, 11 и 13%). Отсюда следует, что значимо именно совокупное влияние закономерностей, связанных с несколькими уровнями организации рельефа.

Таблица. 35.

Коэффициент детерминации мультирегрессионного уравнения (*100) (доля объясненной дисперсии), где зависимая переменная — ось дифференциации древостоя, независимые переменные — «суперфакторы», отражающие совокупное влияние рельефа вмещающих геосистем и почвенно-фитоценотических отношений. Среднетаежный ландшафт в Архангельской области, полигон «Заячья».

Оси дифференциации древостоя, значимые для подроста ели (зависимая переменная)	Независимые переменные (группы «суперфакторов»)	
	Свойства рельефа надсистем	Свойства почв и фитоценоза, независимые от рельефа надсистем
Ось сукцессии 1	16	34
Ось влажности	31	40
Ось трофности	39	20
Ось сукцессии 2	13	9

Поскольку независимые от рельефа окрестностей (вмещающих геосистем) признаки компонентов ландшафта более значимы для сукцессионного фактора, то теперь выясняем соотношение межкомпонентных (почвенно-фитоценотических) и внутрикомпонентных (внутрифитоценотических) факторов дифференциации елового подроста. Для этого построены мультирегрессионные уравнения второй степени, связывающие сукцессионную ось дифференциации елового подроста по отдельности с совокупностью осей дифференциации каждого из ярусов фитоценоза, а также набора почвенных горизонтов, цвета почв, механического состава почв. Установлено, что наиболее тесны связи с кустарниковым и кустарничковым ярусами, незначимы — с мохово-лишайниковым ярусом и почвенными характеристиками (табл. 36) (Хорошев, 2013б). Отсюда следует, что еловый подрост развивается в связанной плеяде признаков с кустарниками и кустарничками и при этом «предпочитает» наличие взрослого елового древостоя, «на худой конец» - березового, но плохо развивается при доминировании осины или серой ольхи. Последнее, видимо, связано с негативным влиянием плотного горизонта лиственного опада на прорастание сеянцев ели. Известно, что возобновление через ольху и осину происходит на более богатых почвах, чем возобновление через сосну или березу, что и отражается эдафическим фактором дифференциации елового подроста. С точки зрения выбора стратегии лесовозобновления отсюда следует, что еловый подрост будет более обилен и быстрее превратится в полноценный еловый древостой

после рубки, если на лесосеке будут оставлены семенные группы ели, а также максимально сохранен кустарниковый или кустарничковый ярус. Это, как известно, достигается выборочными рубками, рубками в зимний период и ручной валкой. Чем дольше сохраняется нежелательный при выбранной стратегии сосновый ярус, тем слабее будет развиваться еловый подрост. Поэтому при одновременном наличии еловых семенных групп и возобновлении сосны важное значение приобретают рубки ухода, направленные на постепенное разрежение соснового древостоя и создание благоприятных условий для развития групп елового подроста.

Таблица. 36.

Вклады внутриуровенных межкомпонентных и внутрикомпонентных связей для подроста ели. Коэффициент детерминации мультирегрессионного уравнения (*100) (доля объясненной дисперсии), где зависимая переменная — ось дифференциации древостоя, независимые переменные — группа осей дифференциации другого компонента. Среднетаежный ландшафт в Архангельской области, полигон «Заячья».

Оси, дифференциации подроста ели	Группы независимых переменных (свойств ярусов фитоценоза и почв)						
	Мхи	Травы	Кустарнички	Кустарники	Цвет почв	Горизонты почв	Механический состав почв
Ось сукцессии 1	5	19	36	31	8	6	4
Ось трофности	16	34	31	36	12	36	6

Однако мы знаем, что существенен еще и эдафический фактор. Применение «метода резонансных уровней рельефа» показывает, что наилучшее описание варьирования эдафического фактора (как, впрочем, и сукцессионного) получено для окрестности с квадратной стороной 2000 м (табл. 37), причем наиболее важна горизонтальная расчлененность. Связь последней с обилием подроста положительная – чем гуще эрозионная сеть, тем больше подроста ели. В относительно богатых местообитаниях повышается вероятность возобновления через осину и ольху. На Архангельском полигоне такие условия соответствуют местам плоскостной разгрузки щелочных грунтовых вод на пологих склонах или выклинивания песчано-супесчаного чехла с приближением к поверхности карбонатных моренных суглинков. Возможны ситуации, когда в относительно богатых местообитаниях условия для возобновления ели окажутся неблагоприятными из-за конкуренции с осиной и ольхой. Отметим, что в более бедных местобитаниях этой проблемы нет, так как возобновление в них пойдет через сосну и березу. Следовательно, «осиновые» и «ольховые» богатые местообитания при целевой установке на выращивание ели могут потребовать лесохозяйственных мероприятий по искусственному стимулированию возобновления ели, то есть — приоритета лесопосадок после сплошных рубок без сохранения подроста, желательно с оставлением семенных групп ели. В «осиновых» местообитаниях поэтому будут допустимы летние рубки при условии сухих погод, чего нельзя сказать про переувлажненные «ольховые» из-за высокого риска разрушения почвенного покрова и ущерба технике. Поскольку пространственное распределение богатых и бедных местообитаний контролируется рельефом вмещающих геосистем со средними линейными размерами 2000 м, то проводится классификация рельефа по морфометрическим характеристикам данной окрестности (рис. 83). Затем из полученных классов

выбираются те, которые характеризуются повышенной горизонтальной расчлененностью (в данном случае классы 1 и 2 на рис. 83), и для них назначаются описанные выше мероприятия по искусственному стимулированию возобновления ели. Для остальных классов (0 и 3 на рис. 83), приуроченных к слаборасчлененным урочищам водораздельных поверхностей и проводораздельных склонов (с более бедными местообитаниями и возобновлением через березу и сосну) рекомендуются зимние, предпочтительно выборочные, рубки, с сохранением семенных групп ели, кустарникового и кустарничкового ярусов и последующими рубками ухода или переформирования.

Таблица. 37.

Межуровневые связи для подроста ели. Влияние рельефа надсистем.
Коэффициент детерминации мультирегрессионного уравнения (*100) (доля объясненной дисперсии). Среднетаежный ландшафт в Архангельской области, полигон «Заячья».

Оси, дифференциации подроста ели	Линейный размер квадратной окрестности (размер гипотетических надсистем), м				
	1200	2000	2800	3600	6000
Ось сукцессии 1	13	20	15	15	14
Ось трофности	19	22	16	11	13

Таким образом, обилие елового подроста контролируется неаддитивным нелинейным эффектом взаимодействия двух факторов дифференциации древостоя: сукцессионного и эдафического. Максимальное обилие достигается при одновременно минимальных значениях соответствующих осей, то есть в бедных местообитаниях с березо-

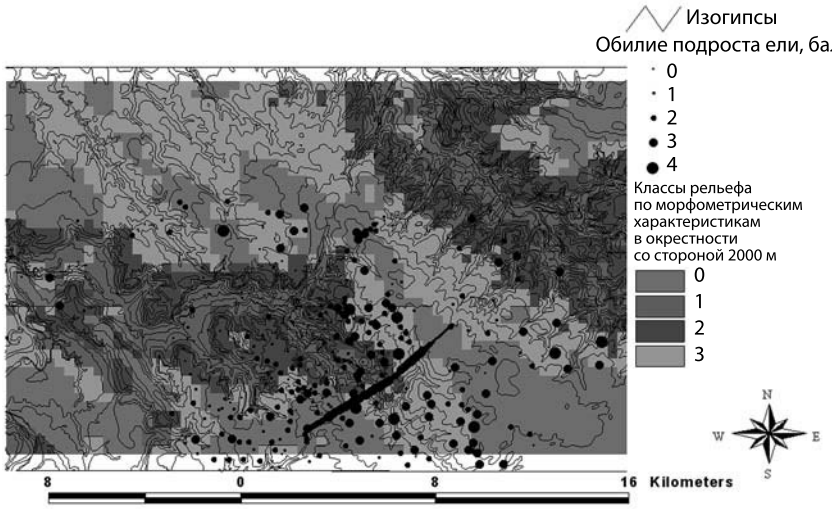

Рис. 83. Распределение обилия подроста ели по 4-м классам рельефа, выделенным по морфометрическим характеристикам рельефа квадратной окрестности со стороной 2000 м (среднетаежный ландшафт, Архангельская область, полигон «Заячья»).

во-еловыми лесами. Минимальное обилие наблюдается в богатых местообитаниях из-за высокой конкуренции осины и ольхи или на ранних стадиях сукцессии. Разделение вкладов морфолитогенных, межкомпонентных и внутрикомпонентных факторов и определение контролирующего иерархического уровня организации рельефа позволило разграничить территории с разным направлением лесохозяйственных и лесовосстановительных мероприятий. Эти результаты применимы для «технологического» уровня принятия планировочных решений внутри лесных угодий, относящихся к категории эксплуатационных лесов.

Теперь рассмотрим процедуру выделения и ландшафтно-планировочной интерпретации ареалов единообразных межкомпонентных отношений в системе «рельеф – растительный покров» на примере того же среднетаежного полигона «Заячья» в Архангельской области. Речь пойдет о распределении влажности местообитаний в ландшафте, индицируемой по растительному покрову, в зависимости от характеристик морфолитогенной основы, а именно — от рельефа ПТК и вмещающих геосистем. Будут продемонстрированы способы интерпретации полученных результатов как для «размещенческого», так и для «технологического» уровней принятия планировочных решений.

В качестве независимых переменных использованы характеристики рельефа операционной территориальной единицы примерно ранга урочища (линейный размер 400 м) и ее окрестностей, т.е. вмещающих геосистем. В качестве зависимой переменной выступала мера чувствительности растительного покрова к влажности местообитания (ниже — «фактор влажности»). Она рассчитана по многоканальному космическому снимку Landsat методом главных компонент как третий по значимости фактор дифференциации растительного покрова. (Первый и второй факторы отражают, соответственно, соотношение безлесных и лесных территорий и соотношение хвойных и мелколиственных древостоев. Обе характеристики отражают в основном антропогенное воздействие и потому малоинтересны для рассматриваемого сюжета.)

В скользящем квадрате с линейным размером 5, 9, 13, 17 пикселов (соответственно, 2000, 3600, 5200 и 6800 м) в программе Fracdim рассчитаны линейные регрессионные уравнения, описывающие вариабельность значений фактора влажности. Исходными данными для посстроения уравнения послужили морфометрические характеристики рельефа, рассчитанные для каждого пиксела в окрестности центрального пиксела. Зависимой переменной являлось значение фактора влажности в каждом пикселе. Таким способом получены параметры уравнения, связывающего характеристики растительности и рельефа, отнесённые к центральному пикселу квадрата. Рассчитаны: а) регрессионные коэффициенты и свободный член уравнения; б) мера отклонения центрального пиксела от подобранного линейного уравнения (остаток); в) стандартизованные коэффициенты регрессии BETA, которые поддаются сравнению как коэффициенты чувствительности фактора влажности к каждой из характеристик рельефа; г) коэффициент детерминации r^2. Проверялась гипотеза о том, что в пределах группы урочищ существует единый тип отношений между растительностью и рельефом/водами. Доказательство существования единого типа отношений — высокие (стремящиеся к 1) значения коэффициента детерминации. Коэффициент детерминации около 0 свидетельствует о невозможности объяснить распределение растительности (точнее — ее свойств, чувствительных к влажности местообитания) при помощи характеристик рельефа. Тогда необходимо проверять иные гипотезы, например, о влиянии почвообразующих отло-

жений, стадий сукцессии, саморазвития и т.п., а также о существовании связи растительности и рельефа в каком-либо другом масштабе (например, для окрестностей другого размера, другой дробности описания с меньшим или большим размером пиксела). Как правило, жёсткость линейной связи между растительным покровом и степенью дренированности возрастает с приближением к зонам разрывных нарушений.

На следующем этапе произведена дихотомическая классификация стандартизованных коэффициентов регрессии BETA по метрике Евклида методом к-средних на трех уровнях с выделением соответственно 2, 4 и 8 классов. Таким образом, установлена общность пикселов-урочищ не только по факту существования связи между растительностью и рельефом в заданном квадрате (группе урочищ), но и по виду этой связи. Фактически выявляется группа урочищ, различия между которыми обусловлены количественными различиями значений одного организующего фактора. Подробный анализ способа выделения ареалов типов межкомпонентных отношений с обсуждением вопроса о характерных масштабах процессов был проведен нами ранее (Хорошев, Алещенко, 2007). Здесь мы остановимся только на интерпретации результатов с точки зрения их применимости к задачам ланшафтного планирования.

Продемонстрируем интерпретацию классов отношений фактора влажности с рельефом вмещающих геосистем с линейным размером 2000 м (рис. 84):

1-й класс характеризуется сильноотрицательной связью фактора влажности с вертикальной расчленённостью при сильной положительной связи с горизонтальной расчленённостью и уклонами. Наименьшая влажность характерна для пологих или плоских позиций с большой вертикальной расчленённостью и малым количеством водотоков вмещающих геосистем. Возрастает влажность при росте уклонов и количества водотоков, но уменьшающейся вертикальной расчленённости, т.е. в многочисленных слабоврезанных лощинах с ручьями. Увлажнение варьирует в зависимости от скорости влагопереноса и соответствующего положения уровня грунтовых вод: он наиболее высок на плоских водораздельных поверхностях и понижается по направлению к крупным долинам.

Переувлажнение наступает при небольших скоростях влагопереноса и высоком уровне грунтовых вод и исчезает при увеличении скоростей в глубокорасчлененных местностях и понижении уровня грунтовых вод. Растительный покров демонстрирует сокращение количества влаголюбивых растений по мере слияния многочисленных ручьёв в редкие глубоковрезанные речки, что происходит при уменьшении мощности четвертичных отложений и врезании в коренные породы. Как показал сравнительный анализ качества регрессионных моделей для разного территориального охвата, максимальные площади охватываются таким типом отношений, если расчет ведется для скользящего квадрата со стороной 6800 м (Хорошев, Алещенко, 2007). Такое характерное пространство процесса формирования уровня грунтовых вод примерно соответствует расстоянию от основного водораздела (Заячья-Соденьга) до пойм этих рек. Оно достаточно для охвата всего диапазона гигротопов, создаваемого градиентом уровня грунтовых вод. Иначе говоря, внутри ареала, показанного на рис. 84 (Г), в окрестности 3200 м в каждую сторону от каждой ОТЕ (еще 400 м приходится на размер самой ОТЕ) представлено достаточно высокое разнообразие сочетаний форм рельефа, которое контролирует уровень грунтовых вод и гигротопы по правилу, описанному в предыдущем абзаце. На этом фоне могут сосуществовать и другие закономерности распределения гигротопов, подчиняющиеся иным ландшафтным структурам.

Теперь охарактеризуем значимость результатов для ландшафтно-планировочных решений первого, т.е. «размещенческого» уровня. Размещение видов хозяйственной деятельности в ареале этого типа должно адаптироваться к рельефу достаточно обычным для Европейского Севера образом: пригодность для земледелия возрастает по мере роста расчлененности рельефа, то есть по мере приближения к глубоковрезанным долинам. В связи с этим в описываемом районе (Ростовской местности) лишь в XX веке произошло земледельческое освоение территорий, удаленных от бровки долины Заячьей более чем на 1000 м, и то с обязательным применением осушительных мелиораций и с гораздо более низкой продуктивностью, чем в хорошо дренированных глубокорасчлененных прибровочных позициях. В данном ареале планировочное решение, хорошо адаптированное к ландшафтной структуре, по сути, выработано веками. Решение заключается в своеобразном зонировании, предусматривающем смену приоритета по мере приближения к долине Заячьей от лесного хозяйства через пастбищное животноводство и сенокошение к земледелию. Примерно к границе зон животноводства и земледелия приурочено и большинство населенных пунктов. В советское время была попытка нарушить эту адаптацию и расширить зону земледелия вглубь переувлажненных водораздельных поверхностей. Выпас крупного рогатого скота был вытеснен в леса, а на месте пастбищ проведены активные осушительные мелиорации в интересах земледелия. Однако в постсоветский период эти территории с глееватыми почвами были заброшены и активно зарастают ивняком с щучкой, осоками, ситниками в травостое (рис. 45). Если переходить на «технологический» уровень принятия решений (то есть являющийся компетенцией отраслевого специалиста), то выявленная закономерность может оказаться полезной для выбора способа дренажа дороги, глубины заложения мелиоративных канав, типа севооборота и т.д.

2-й класс характеризуется отрицательной связью фактора влажности с вертикальной расчлененностью и расстоянием до водотока при положительной связи с уклонами. Наименьшая влажность достигается при большой вертикальной расчлененности и небольших уклонах (узкие пологие или плоские междуречья с интенсивным оттоком влаги в соседние глубокие долины). Наибольшая влажность достигается в приречных позициях с малой вертикальной расчлененностью и значительными уклонами. Это соответствует зонам формирования стока при выклинивании грунтовых вод на поверхность или слиянии слабоврезанных водотоков и перегибу от плоской нерасчленённой поверхности к эрозионной форме, либо слиянию притоков в зонах повышенной трещиноватости, смены геологического строения днища, перегиба продольного профиля реки. Участки максимальной влажности указывают на скачкообразный рост обводненности днища после принятия многоводных притоков с соответствующим ростом эрозионной активности. В днищах ниже по течению становится в целом суше из-за нарастания вреза и скорости течения и преобладания руслового притока над склоновым. Влажность определяется положением по отношению к заболоченным зонам формирования стока или его быстрого транзита. Максимальные площади охватываются таким типом отношений, если расчет ведется для скользящего квадрата со стороной 5200 м (рис. 84, В) (Хорошев, Алещенко, 2007). Такое характерное пространство примерно соответствует размеру местностей, выделенных при ландшафтном картографировании территории в масштабе 1 : 50000 (Хорошев, 2005а). Они обособляются под влиянием неотектонических движений, в результате которых либо сохраняется моренный чехол, либо он почти полностью смывается эрозией с выходом на поверхность коренных кар-

бонатных пород. Во втором случае формируется густая сеть глубоковрезанных долин с контактом моренных отложений и пермских мергелей на склонах. В пределах ареала второго типа на расстоянии 2400 м в каждую сторону от каждой ОТЕ присутствует высокое разнообразие гигротопов, обусловленное наличием как областей питания грунтовых вод в пределах моренного чехла, так и областей их склоновой разгрузки по контакту морен с коренными породами.

С ландшафтно-планировочной точки зрения в ареале данного типа распределение влажности заставляет размещать виды деятельности принципиально иначе по сравнению с ареалами 1-го типа, поскольку к склоновым позициям могут быть приурочены не хорошо дренированные, а наоборот переувлажненные позиции. Тогда описанный для 1-го класса отношений способ адаптации неприменим. При этом осушительные мелиорации переувлажненных фаций пологих склонов могут оказаться бесполезны в силу постоянного притока разгружающихся грунтовых вод со стороны смежных территорий. Обилие водосборных понижений заставляет переходить к мелкоконтурности угодий, что может сделать земледелие экономически неэффективным. С точки зрения лесного хозяйства разгрузка богатых основаниями грунтовых вод может получить положительную оценку благодаря росту продуктивности по сравнению с лучше дренированными, но бедными местообитаниями. В то же время на «технологическом» уровне принятия решений может возникнуть потребность в сложной мозаике способов адаптации: выбора сезона и способа рубок, способа сохранения напочвенного покрова. Во всяком случае, если ландшафтная структура будет игнорироваться (что вполне обычно при отрисовке выделов и отведении прямоугольных лесосек) лесопользователь должен быть готов к существенным расхождениям между рассчитанными и фактическими запасами древесины.

3-й класс характеризуется отрицательной связью между «фактором влажности» и горизонтальной расчлененностью рельефа, уклонами, расстоянием до водотока, положительной связью — с вертикальным расчленением. положительной связью фактора влажности с вертикальной расчленённостью, отрицательная — с уклонами. Рост влажности происходит либо при минимальной горизонтальной расчлененности плоских водораздельных поверхностей, либо при концентрации стока в ограниченном пространстве днищ глубоковрезанных долин при сохранении суходольного режима на территориях с густой сетью неглубоврезанных водотоков. Наибольшая влажность достигается в вогнутых позициях при малом уклоне (заболоченная пойма медленно текущего ручья) при большой вертикальной расчлененности (ручей глубоко врезан, вскрывает водоносные пласты). Высокая влажность достигается при притоке влаги с крутых склонов, которая накапливается в днище эрозионной формы, в котором формируется полузастойный режим. Наименьшая влажность характерна для урочищ с небольшой вертикальной расчлененностью в выпуклых позициях (верхние прибровочные части крутых склонов долин; часть окрестности лежит на плоской поверхности выше бровки). Иначе говоря, в отличие от первых двух классов отношений в системе «рельеф – растительный покров», влага накапливается не на плоских поверхностях и не на склонах, а в днищах долин; водораздельные поверхности при этом невелики по размерам и хорошо дренированы. За подобное пространственное распределение гигротопов ответственен процесс самоорганизации стока. Последовательность событий можно представить так: слияние многочисленных слабоврезанных водотоков, собирающих сток с узких водораздельных поверхностей; рост водности потока, рост глубины

вреза; приобретение необходимой мощности потока для разработки пойм и террас; образование обширных относительно плоских поверхностей в днищах в нижнем течении; замедление течения и обводнение пойм; приток влаги с крутых склонов в нижней глубоковрезанной части долины; формирование переувлажненных местообитаний в днищах глубоковрезанных частей долин. Как показал сравнительный анализ качества регрессионных моделей для разного территориального охвата, максимальные площади охватываются таким типом отношений, если расчет ведется для скользящего квадрата со стороной 2000 м. Это уровень группы урочищ от локального водораздела до ближайшей долины. Таково характерное пространство процесса самоорганизации стока, обусловливающего пространственное распределение гигротопов. Оно соответствует среднему расстоянию между разрывными нарушениями, которые ограничивают неотектонические единицы, ранее условно названные нами микроблоками и имеющие комплексное ландшафтное содержание (Хорошев, 2003б). По таким разрывным нарушения заложились долины притоков Заячьей и Соденьги, бассейны которых (притоков) в верхнем течении представляют густую сеть параллельных слабоврезанных лощин, ниже сливающихся и формирующих глубоковрезанную долину. В пределах ареала третьего типа на расстоянии 800 м в каждую сторону от каждой ОТЕ (линейный размер которой, напомним, 400 м), присутствует высокое разнообразие гигротопов, связанное с наличием как дренированных локальных водораздельных массивов, так и переувлажненных днищ долин.

С точки зрения планирования в этом ареале возникают серьезные ограничения на землепользование в днищах долин несмотря на удобный рельеф, причем не только на расширенных поймах, но и на террасах за счет притока вод по склонам. Заболоченные широкие поймы могут оказаться непригодными даже для сенокошения (что характерно для некоторых участков поймы р. Заячьей). Рубки в отрицательных формах рельефа могут быть ограничены как пониженным бонитетом, так и низкой проходимостью для техники и требованиями охраны гигрофитных сообществ. В то же время водораздельные поверхности привлекательны для многих видов деятельности пониженной влажностью. Однако небольшая ширина водораздельных пространств между верховьями водотоков может накладывать ограничения на размеры пахотных угодий, строительных площадок, делая их неэффективными. Для некоторых видов деятельности суженные водораздельные пространства могут оказаться, наоборот, приемлемыми или даже привлекательными. Например, для рекреационных учреждений, охоты высокое разнообразие рельефа и мозаичность местообитаний создает преимущества по сравнению с монотонными пространствами. Для сенокошения небольшие размеры угодий не составляют проблемы. В случае согласия лесоустройства с приоритетностью выборочных рубок узкие хорошо дренированные водораздельные урочища с высокой продуктивностью также вполне пригодны, причем соседство небольших зарастающих лесосек с облесенными долинами может создать преимущества для некоторых видов охотничье-промысловых животных (лось, медведь, тетерев, заяц, кабан).

Мы приводили примеры ареалов единообразных типов межкомпонентных отношений в основном в системе «рельеф – почвы – грунтовые воды – растительный покров». Однако в еще большей степени предлагаемый подход применим к планировочной задаче оптимизации пространственной структуры ландшафта в тех случаях, когда ландшафтный покров может искусственно регулироваться для сохранения или развития той или иной хозяйственной или экологической ценности. Речь идет о намеренном из-

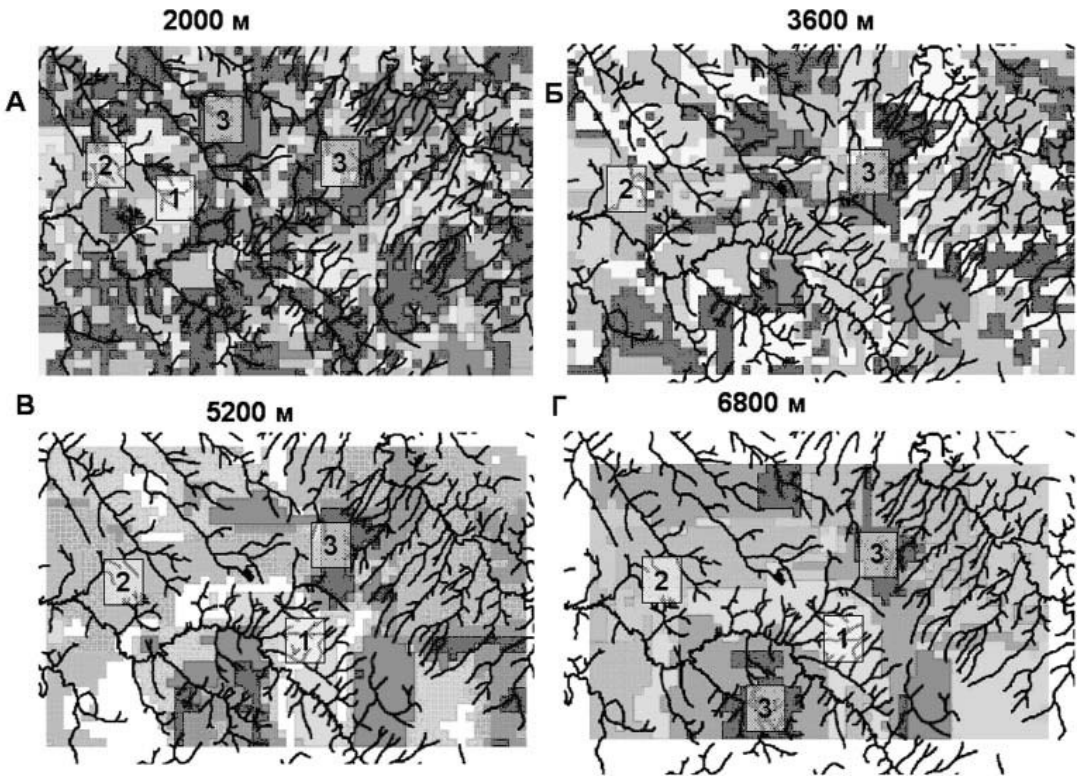

Рис. 84. Характерные масштабы реализации типов межкомпонентных отношений (среднетаежный ландшафт, Архангельская область, полигон «Заячья»). Пояснения см. в тексте.

менении доли тех или иных угодий в ландшафте (степени лесистости, распаханности, запечатанности асфальтовыми покрытиями и т.п.), конфигурации, соседства угодий. Это может быть необходимо для регулирования жизнеспособности и миграционной способности популяций охраняемых или промысловых животных, эстетической ценности пейзажа для рекреации, микроклимата на полях, дачной застройки и многих других видов управления ланшафтом. Тогда в уравнениях связи в качестве зависимых переменных могут участвовать измеренные в ключевых точках количественные характеристики перечисленных индикаторов (численность популяций, посещаемость рекреантами, урожайность на полях и др.), а в качестве независимых — характеристики разнообразия, фрагментации, связности, соседства контрастных ландшафтных единиц. Если становится известен ареал, в пределах которого связь существует и однотипна, то при принятии планировочного решения легко прогнозировать, как изменится целевой показатель при том или ином намеренном изменении ландшафтного покрова в конкретном месте ландшафта. Например, планировщик сможет ответить на такие вопросы. Критически ли сократится численность популяции охраняемого вида при снижении связности лесных местообитаний после рубок? Будет ли привлекательной для пикниковой рекреации группа урочищ после изменения конфигурации границы лесной

и луговой территорий? Как отреагирует урожайность на увеличение размеров полей за счет дополнительной распашки степных участков? Не возрастет ли повторяемость разрушительных паводков на горных реках в результате роста доли заасфальтированных поверхностей в курортной зоне? Большое количество методических наработок по проблемам оценки пространственной структуры и оптимизации ландшафтного покрова, в том числе с богатым арсеналом количественных методов, представлено в ландшафтно-экологической литературе (Papadimitriou, Mairota, 1996; Strayer et al., 2003; Forman, 2006). Однако проблема идентификации мозаичных ареалов с однотипными отношениями между свойствами ландшафта фактически только ставится. Автору эта проблема представляется слаборазработанной, но очень актуальной и интересной для ландшафтоведения XXI века и его прикладного раздела (и одновременно трансдисциплинарной сферы деятельности) — ландшафтного планирования.

Рассмотренные в этой книге методы решения как фундаментальных, так и прикладных проблем науки о ландшафте по сути сводятся к способам интерполяции информации, полученной на ключевых точках, на слабоисследованные или труднодоступные территории. Для этого, по мнению автора, конструктивное значение имеет не просто количественный анализ связей между свойствами компонентов ландшафта, а именно полимасштабный анализ. Он позволяет учесть наложение эффектов разномасштабных процессов, которое мы наблюдаем при полевом исследовании природно-территориального комплекса, оценить вклады рамочных условий, создаваемых вышестоящими уровнями геосистем. Географичность такой работы обеспечивается привязкой полученной информации к территории посредством выделения ареалов действия того или иного типа отношений между свойствами компонентов и между геосистемами разных иерархических уровней.

Заключение

Проведенное исследование показало, что ключевые для ландшафтоведения вопросы о плотности межкомпонентных связей и о дискретности-континуальности ландшафтных единиц — это вопросы о масштабе исследования. Геосистема разными своими свойствами участвует одновременно в полимасштабной системе межкомпонентных отношений и подчиняется геосистемам разных уровней. Одно и то же свойство компонента ландшафта не может быть повсеместно объяснено одним и тем же фактором или группой факторов.

Свойства компонентов ландшафта подчиняются разноуровенным и разнотипным вмещающим геосистемам, то есть несут отпечаток действия процессов (в том числе палео-процессов), проявляющихся в характерных пространствах более крупных пространственных единиц. Эти вмещающие геосистемы необязательно укладываются в систему традиционных морфологических единиц ландшафта. Постепенное изменение в пространстве свойств вмещающих геосистем вносит вклад (необязательно решающий) в континуальное изменение свойств конкретных природных комплексов низкого ранга. Резкие изменения свойств мобильных компонентов в пространстве могут быть обусловлены не только резким изменением свойств инертных компонентов (морфолитогенной основы) *in situ,* но и тем, что начинает «ощущаться» влияние удаленных комплексов, совокупность которых составляет вмещающую геосистему. Для конкретного свойства компонента возможны следующие ситуации: 1) приоритетное подчинение свойствам вмещающей геосистемы какого-либо ранга (простая межуровневая связь); 2) одновременная подчиненность свойствам геосистем нескольких рангов (сложная межуровневая связь); 3) подчиненность свойствам других компонентов, независимым от вмещающих геосистем (внутриуровенная связь).

Межкомпонентные связи в ландшафте должны характеризоваться не только традиционными разнообразными коэффициентами корреляции между парами свойств, но и математическим видом связей между парами или группами свойств. Тип связей описывается набором значимых регрессионных коэффициентов, знаками при коэффициентах. Построение мультирегрессионных уравнений межкомпонентных связей второй степени позволило выявить эмерджентные эффекты одновременного воздействия нескольких факторов через свойства почв на конкретные свойства фитоценозов. Тип связей может варьировать в пространстве, что часто создает ложное впечатление об их отсутствии, если расчет ведется для территории с высоким ландшафтным разнообразием или с разнообразием типов отношений. Региональный масштаб охватывает противоречивые типы отношений, которые нивелируют друг друга — например, если в одном секторе (или типе ландшафтных условий) связь положительная, а в другом отрицательная. Высокое ландшафтное разнообразие означает и разнообразие стратегий развития вертикальной структуры геосистем: далеко не во всех местностях ландшафта имеет место тенденция к взаимоадаптации компонентов. На фациальном уровне теснота связей значительно возрастает по сравнению с урочищным и региональным. Территориально близко сопряженные геосистемы имеют гораздо более высокий уровень взаимоадаптированности компонентов, чем территориально рассредоточенные.

Предложенные в данной работе методы позволяют распознать частично пересекающиеся в пространстве ареалы проявления связей разного типа. Могут быть установлены точные диапазоны ландшафтных условий, при которых группы свойств компонентов связаны по тому или иному правилу. Важнейшая прикладная задача современного ландшафтоведения видится автору в замене декларативного утверждения об однозначных взаимозависимостях точным выделением ареалов проявления того или иного правила ландшафтной организации, то есть ареалов межкомпонентных связей конкретного типа. Проведенное исследование свидетельствует о локальном характере однотипных межкомпонентных отношений и частой смене типов отношений в пространстве. Ареалы с единообразным правилом пространственного варьирования сопряженных свойств относительно невелики — в пределах территории 3–5-кратной размеру операционной территориальной единицы. В целом сопряженность свойств компонентов на ландшафтном уровне снижается по сравнению с местностным и, особенно, фациально-урочищным уровнями. Однако, «размывание» показателей связей с ростом ландшафтного разнообразия (обычно — с ростом территориального охвата) может означать не только частую смену типов связи в пространстве, но и разрыв в «лестнице масштабов». Иначе говоря, для некоторых свойств при дальнейшем увеличении территориального охвата анализа связь вновь может становиться значимой, что означает «вписанность» в некоторое правило пространственного варьирования в более крупной геосистеме. Обычно в ландшафтоведении вышестоящий уровень «назначался» в соответствии с геолого-геоморфологическими границами того или иного ранга. Предлагаемые в нашей работе методы позволяют не только оценить размеры вышестоящего уровня геосистем формализованными количественными методами, но и распознать особые эмерджентные свойства природных комплексов, которые возникают как следствие взаимодействия контрастных ландшафтных единиц.

Кроме того, появляется возможность описать причины постепенного сопряженного изменения свойств компонентов в пространстве единой геолого-геоморфологической единицы по мере ослабевающего или усиливающегося влияния соседних единиц. Размер природных комплексов фактически может выступать как самостоятельный фактор дифференциации. Фации одной мезоформы рельефа имеют разные свойства в зависимости от близости к другим мезоформам и их свойств (а точнее – процессов, которые охватывают и собственную мезоформу и совокупность соседних). Аналогично свойства природных комплексов более высокого ранга варьируют в зависимости от соседства.

В качестве способа визуального отображения подобных континуальных пространственных изменений рекомендуется вероятностное картографирование межкомпонентных связей. Оно показывает, с какой вероятностью то или иное сочетание свойств компонентов природного комплекса является типичным для конкретного вида вмещающих геосистем. Построение серии вероятностных карт принадлежности к классам литогенной основы позволяет решать несколько задач при анализе пространственной структуры ландшафта и ее развития.

Во-первых, выявляются контуры реально существующих разнотипных ландшафтных структур, в пределах которых соотношения свойств почв и растительности строго детерминированы свойствами морфолитогенной основы.

Во-вторых, можно установить, какой из морфолитогенных факторов выступает как ведущий при формировании вертикальной структуры ПТК.

В-третьих, становится возможным визуализировать родственные отношения между пространственно удаленными друг от друга ПТК на основе не просто сходства набора доминантных признаков (зачастую субъективно заданных), но и единства межкомпонентных отношений, сходства структуры.

В-четвертых, выявляются ареалы неравновесных межкомпонентных отношений, где наиболее вероятны смещения границ ПТК, их слияние (конвергенция) и разделение (дивергенция). Выбор стратегии природопользования или географический прогноз для неравновесных территорий сопряжен с наибольшим риском и неопределенностью последствий антропогенного воздействия.

В-пятых, высокая вероятность соответствия мобильных компонентов какому-либо классу морфолитогенной основы за пределами ареала этого класса может указывать на территориальную экспансию данного типа межкомпонентных отношений и позволяет уточнить родство ПТК по признаку сходства функционирования при структурных отличиях.

Расчет меры неопределенности классификационной принадлежности рассматривается как инструмент оценки меры равновесности вертикальной структуры ландшафта на конкретном его участке, что может послужить основой для оценки инертности или пластичности в условиях внешних воздействий. Близкие значения вероятности соответствия свойствам нескольких разнотипных вмещающих геосистем могут индицировать относительно высокую приспособляемость к внешним изменениям за счет устойчивости-пластичности, то есть принадлежность к триггерной системе, допустимость нескольких устойчивых состояний. С точки зрения ландшафтного планирования при множественности интересов землепользователей это может означать разнообразие возможностей использования. Возможно (это покажут дальнейшие исследования) вероятностное картографирование послужит инструментом отображения в реальном пространстве нуклеарных систем, давно теоретически предложенных А.Ю. Ретеюмом (1988) как альтернатива генетико-морфологическому подходу.

Вопрос о степени морфолитогенной детерминированности почвенно-фитоценотического блока ландшафта в последние годы обострился в связи появлением публикаций представителей смежных наук, отстаивающих противоположные точки зрения: что почвы и фитоценоз строго детерминированы рельефом и отложениями (Ласточкин, 2011) и что эти компоненты практически независимы и их пространственно варьирование в основном определяется саморазвитием (Бобровский, 2010; Смирнова, 2011). Наши результаты показывают, что обе позиции неоправданно категоричны. Свойства компонентов ландшафта объединяются в несколько взаимонезависимых или слабо связанных друг с другом плеяд, обусловленных ландшафтоформирующими процессами разной природы и с разным характерным пространством. Необходимо количественно оценивать вклады саморазвития и морфолитогенной основы (в том числе – вмещающих геосистем) отдельно для каждого свойства, что представляется автору одним из магистральных направлений развития ландшафтоведения.

Автор предпринял попытку разделить и сравнить эмерджентные эффекты, которые создают группы компонентов и совокупности вышестоящих геосистем для конкретных свойств ландшафта. Проверка гипотезы о вкладе эмерджентных эффектов в пространственное варьирование свойств ландшафта, показала следующее. Эмерджентные эффекты одновременного действия рамочных условий разноранговых вмещающих геосистем для большинства свойств ландшафта могут перекрывать по значимости ра-

мочные условия вмещающих геосистем по отдельности. Эмерджентные эффекты совокупного воздействия групп компонентов могут перекрывать по значимости влияние компонентов по отдельности. Оба предыдущих утверждения не являются универсальными: «могут перекрывать», но необязательно перекрывают, бывают и «простые» влияния без участия сложной совокупности «участников». Поэтому каждое свойство заслуживает отдельного анализа на предмет подверженности эмерджентным эффектам. Среди свойств компонентов ландшафта существуют группы полностью независимых от влияния вмещающих геосистем и полностью независимых от локальных межкомпонентных связей. Большинство же свойств ландшафта варьирует в пространстве в результате суперпозиции эффектов действия вмещающих госистем и внутриуровенных межкомпонентных связей.

Согласно представленным в монографии результатам, в первом приближении внутрифитоценотические связи во всех исследованных регионах более сильны, чем почвенно-фитоценотические связи и связи с рельефом вмещающих геосистем. Это, безусловно, объясняется близкими характерными временами ярусов фитоценоза и их большей изменчивостью в ходе сукцессии по сравнению с почвами. Зависимость растительности от рельефа вмещающих геосистем максимальна в морфолитогенных условиях, обеспечивающих близость почвенно-растительного покрова к зональной норме. Однако при более детальном анализе оказывается, что: а) не все ярусы фитоценоза жестко связаны друг с другом; б) некоторые из них имеют более тесные связи с почвами, чем с другими ярусами; в) ярусы фитоценоза могут быть весьма чувствительны к пространственному варьированию рельефа вмещающих геосистем (то есть испытывать эмерджентный эффект взаимодействия индивидуальных ПТК в основном через контроль над грунтовыми водами); г) отдельные ярусы фитоценоза могут быть чувствительны к разным иерархически уровням вмещающих геосистем.

Итак, ярусы фитоценоза и свойства почв могут одновременно принимать участие в полимасштабной системе межкомпонентных отношений. Порядок значимости факторов для одного компонента может меняться в зависимости от масштаба. Из этого следует, что без учета полимасштабности ландшафтной организации нельзя делать выводы о наличии или отсутствии межкомпонентных связей на основании исследования в локальном масштабе. Это продиктовано важнейшим принципом системного исследования: свойства системы можно понять только после исследования рамочных условий, навязываемых ей надсистемой. Изучение полимасштабной организации является составляющей решения проблемы трансляции информации между масштабами, обозначенной как одна из ключевых в науке о ландшафте (O'Neill, 1988; King, 1991; Wu, Jelinski et al., 2000; Turner et al., 2001). Развиваемые в нашей монографии методы позволяют давать количественные оценки вкладов процессов на вышестоящих уровнях организации в измеряемые на локальном уровне характеристики компонентов ландшафта. Кроме того, предоставляется возможность сравнить вид связей в математическом выражении. В дальнейшем такой подход может быть использован для выявления механизмов самоподобия ландшафтных процессов на разных иерархических уровнях.

Упреки в субъективности карт и насовпадении контуров у разных авторов стали едва ли не основными претензиями к ландшафтоведению XX века. Трудно сейчас сказать, возможна ли вообще абсолютно объективная ландшафтная карта, тем более что в природе происходит наложение разных типов ландшафтной организации. Однако строгое ранжирование экологических факторов по вкладу в пространственную дифференциа-

цию компонентов ландшафта, реализованное в нашей работе, создает основу для повышения объективности ландшафтного картографирования при условии наличия массовых полевых данных.

Во-первых, становится известно, какому экологическому градиенту необходимо придавать приоритетное значение в каждом регионе для каждого компонента или отдельных его свойств. Этим обеспечиваются основания для классификации природных комплексов.

Во-вторых, становится известно, какая группа компонентов чувствительна к каждому экологическому градиенту: этим обеспечивается комплексность картографирования.

В-третьих, становится известно, с каким иерархическим уровнем вышестоящей геосистемы следует соотносить варьирование свойств и, соответственно на каком основании проводить границы (по свойствам какой окрестности): этим обеспечивается иерархичность построения карты.

Поскольку абсолютная связанность всех свойств в данном случае не постулируется, мы получаем серию карт парциальных ландшафтных систем, которые могут частично пересекаться друг с другом. В целях управления природопользованием и ландшафтного планирования такие карты дают возможность увидеть ареалы, в пределах которых воздействие на какой-либо фактор (например, уровень грунтовых вод) даст прогнозируемый отклик на строго определенную группу свойств.

В исследованных нами лесных и степных регионах практически для всех свойств почв и фитоценозов ведущими оказались факторы трофности и влажности, что само по себе не содержит ничего нового и неожиданного. Однако мы получили возможность точно определить их приоритетность либо подчиненность по отношению друг к другу для каждого яруса фитоценоза и для каждой группы свойств почв (морфологическое строение профиля, цветовые характеристики, механический состав, химический состав). Так, ось влажности является главной во всех регионах для кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов и строения почвенного профиля. Ось трофности определяет основную часть варьирования видового состава древесного яруса на всех полигонах кроме Обского. Для видового состава кустарничкового яруса и строения почвенного профиля обеспеченность минеральным питанием стоит на втором месте после фактора влажности. Для мохово-лишайникового яруса практически во всех регионах действуют две оси влажности, но в разных масштабах. Одна из осей чувствительна к уровню типов ландшафтов и отделяет болотные геосистемы от зональных лесных геосистем. Вторая ось дифференциации мохово-лишайникового яруса отражает более тонкие различия на уровне видов лесных урочищ с разными гигротопами. Иногда на первое место по значимости для дифференциации наблюдаемого облика лесов может выходить сукцессионный фактор. В среднетаежных регионах с относительно бедным видовым составом древостоя наблюдаемый облик вторичных лесов может существенно маскировать реальную ландшафтную мозаику; индикация лесорастительных условий по фитоценозу затруднена. Но в южной тайге и смешанных лесах с их высоким видовым разнообразием наблюдаемая структура даже вторичного фитоценоза может служить хорошим индикатором почвенно-гидрологических условий.

В целом нет оснований утверждать, что в геосистемах всех уровней от фации до ландшафта существует всеобщие строго детерминированные связи между компонентами. В заповеднике «Кологривский лес» с коренными лесами, изученном как эталон

южнотаежных ландшафтов показано резкое различие, с одной стороны, урочищ с жестко детерминированными межкомпонентными отношениями, с другой — урочищ с высоким разнообразием возможных сочетаний свойств компонентов и поэтому с пониженными возможностями индикации типа местообитания по структуре фитоценоза. В более общем смысле, можно констатировать, что возможности применения методов ландшафтной индикации как одной из главных традиционных задач ландшафтоведения неодинаковы в разных ландшафтных ситуациях; в частности они зависят от стадии развития ландшафта. В то же время существуют устойчивые плеяды свойств, состав которых различается между ландшафтными зонами. Их можно считать реализацией парциальных геосистем, единство которых обусловлено общностью факторов пространственной дифференциации. Наличие такой общности, выраженное статистически достоверными связями, может рассматриваться как индикатор близости характерных времен свойств.

Полученные результаты показали, что связь кустарников с травами и деревьев с травами можно считать наиболее устойчивой плеядой, которая сохраняется в хвойно-широколиственных лесах, южной тайге и средней тайге. Индикация строения почвенного профиля по свойствам ярусов фитоценоза возможна, но наилучшие индикаторы различаются по регионам, что важно учитывать при лесоустроительных работах. В заболоченной средней тайге Западной Сибири наилучшим индикатором может служить моховый ярус, в средней тайге Архангельской области и в южной тайге — травы и кустарнички, в хвойно-широколиственных лесах — деревья и кустарники.

Внутрифитоценотические связи также оказались неравноценными между разными парами ярусов. Независимо от зональной принадлежности, степени континентальности и генезиса ландшафта во всех регионах, наиболее связанным с травостоем компонентом является древостой. Кустарниковый ярус имеет высокую степень общности факторов дифференциации с травостоем, и с высокой вероятностью оба они сопряжены с древесным. Кустарничковый и мохово-лишайниковый ярусы, в отличие от древесного и кустарникового, почти во всех регионах имеют гораздо меньшую общность факторов дифференциации с травостоем. Ландшафты среднетаежной подзоны характеризуются наибольшей, по сравнению с другими территориями, сопряженностью травостоя с другими компонентами. В южной тайге общность факторов дифференциации ярусов фитоценоза и строения почвенного профиля гораздо ниже, чем в средней тайге, а моховый и травяный ярусы практически взаимонезависимы. Целостность моренных среднетаежных и южнотаежных ландшафтов, определяемая взаимодаптированностью компонентов и эмерджентными эффектами их взаимодействия, выше, чем в ландшафтах пластовых равнин зоны хвойно-широколиственных лесов. Пониженная взаимоадаптированность компонентов смешаннолесных ландшафтов создает предпосылки для их пластичности по отношению к внешним воздействиям.

Наше исследование показало, что подчиненность свойств почв и фитоценоза тому или иному «резонансному» уровню вмещающих геосистем (если таковая подчиненность существует) сохраняется в ходе восстановительной сукцессии, что можно рассматривать как одно из инвариантных свойств вертикальной структуры ландшафта. В то же время теснота внутриуровенных почвенно-фитоценотических и внутрифитоценотических связей может меняться в ходе саморазвития, в том числе в ходе восстановительной сукцессии. На ранней стадии видовой состав лесного фитоценоза адаптируется к характеристикам минерального питания и влажности, обусловленным,

прежде всего вариациями строения почвообразующей толщи. Строение почвенного профиля, видимо, на этой стадии в силу инертности еще носит следы почвообразования, предшествовавшего сведению леса. На стадии старовозрастных лесов, напротив, связи с механическим составом ослабевают, но более совершенной становится адаптация к морфологическому строению почвенного профиля, выраженному мощностями горизонтов. На взгляд автора, это следствие саморазвития вертикальной структуры ландшафта, когда уже достаточное время прошло для формирования почвенных горизонтов, соответствующих сложившейся структуре фитоценоза и стирания следов предшествовавшего почвообразования. Если на раннем этапе формирование видового состава кустарникового, кустарничкового и мохового ярусов происходит относительно независимо друг от друга, преимущественно подчиняясь варьированию почвообразующих отложений, то на поздних — путем ослабления зависимости от отложений и возрастания взаимоадаптации и адаптации к параллельно меняющимся свойствам почвенных горизонтов. Одновременно ослабляются связи в парциальной геосистеме, связывающей подчиненные ярусы фитоценоза и свойства почвообразующих отложений.

Формирование адаптивной почвенно-фитоценотической системы протекает по разному в средней тайге и в более южных ландшафтах южной тайги и хвойно-широколиственных лесов. В средней тайге с приближением к стадии старовозрастных лесов взаимоадаптированность почв и фитоценоза возрастает, а зависимость фитоценоза от механического состава почвообразующих отложений ослабевает. В южной тайге и зоне хвойно-широколиственных лесов, напротив, развитие идет по пути уменьшения зависимости фитоценоза от строения почвенного профиля, но по пути адаптации к динамическим свойствам почв, выраженных цветовыми характеристиками. Хвойно-широколиственнолесные фитоценозы на ранних стадиях развиваются сопряженно со свойствами почв, но при приближении к старовозрастной стадии усиливают независимость от внешней среды и внутреннюю прочность структуры.

Значительная часть представленной работы была посвящена поиску подходов к решению вопроса о причинах статистически слабых связей между компонентами ландшафта. Этот вопрос обескураживал несколько поколений ландшафтоведов, а некоторых представителей смежных наук о природе приводил к выводу о, как минимум, слабой обоснованности самих понятий «ландшафт» и «природно-территориальный комплекс». Автор пришел к выводу, что плохая модель связей во многих случаях объясняется перевесом вклада факторов другого масштаба, которые не всегда очевидны при сборе полевого материала на локальном уровне. Снижение качества моделей межуровневых связей на некоторых участках объясняется наложением эффектов влияния вмещающих геосистем иного иерархического уровня.

С точки зрения оценки устойчивости полимасштабный анализ ландшафтной организации позволяет понять, в «дружественном» или «враждебном» окружении находится интересующая нас конкретная ландшафтная единица. Устойчивость тем выше, чем лучше совпадают рамочные условия, накладываемые вышестоящими геосистемами нескольких рангов. Это положение может рассматриваться как теоретическое основание для необходимости раздельного оценивания типичных и редких природных комплексов при ландшафтном планировании. Если доказано расхождение между состояниями, предсказываемыми моделями межуровневых связей и реальным состоянием ПТК, то высока вероятность его неустойчивости во «враждебном» окружении или в условиях «враждебной» тенденции развития вмещающей геосистемы.

Знание функции отражающей тип межкомпонентной связи на конкретном участке предоставляет возможности для применения эргодического подхода при прогнозировании изменений ландшафтов при внешнем воздействии, т.е. для моделирования временных изменений при помощи знания закономерностей современной пространственной структуры. Если известно, что каким-либо образом претерпит изменение ведущий фактор организации территории, то знание функции связи его с компонентами ландшафта позволяет принять за модель будущих изменений состояние того участка территории, где современные значения фактора аналогичны прогнозируемым. Если выделена гомогенная (единая по фактору организации, но разнообразная по вертикальной структуре) парагенетическая система, то обладание функцией связи между фактором и свойствами ландшафта позволяет решать такие вопросы ландшафтного планирования, как пространственная дифференциация видов природопользования, распределения нагрузок.

Подытожим основные особенности полимасштабного анализа ландшафтной организации в сравнении с традиционными методами выделения геосистем (табл. 38).

Подводя итог, автор не может не высказаться о том, как ему видится состояние и перспективы ландшафтоведения.

Содержание ландшафтоведения 1990–2010-х гг. гораздо богаче, чем представляется критикам — представителям смежных наук. Оно далеко ушло по сравнению со всем известными результатами 1960-х гг. Позиция ландшафтоведов в отношении причин дифференциации природы более гибкая, чем привыкли видеть специалисты, хорошо знакомые только с концепцией морфологической структуры ландшафта (Хорошев, 2014). Ландшафтоведение — не наука о линейных границах между урочищами и фациями (как, по недоразумению, ее иногда воспринимают); это наука о межкомпонентных и межгеосистемных связях разного математического вида и тесноты, которые могут формировать и резкие, и постепенные переходы; это наука о системах в природе. Современное ландшафтоведение уже давно не придерживается мнения о жесткой взаимодетерминированности компонентов и признает вероятностный характер связей между ними.

Предмет современного ландшафтоведения — не только и не столько однородные ареалы, но и ареалы проявления связей того или иного вида, то есть мозаичные территории, объединяемые единым фактором дифференциации. В этом вопросе ландшафтоведение находится на ранней стадии, но проблема поставлена, методы разрабатываются, первые результаты есть. Ландшафтоведение не считает своей основной задачей найти линии, где меняется абсолютно всё, но ищет границы зон проявления процессов, которые действуют в разных масштабах и создают независимые структуры. Вопрос дискретности-континуальности ландшафтных единиц — это вопрос о масштабе исследования. Ландшафтоведам никуда не деться от того, что на картах необходимо показывать границы — иначе невозможно заниматься территориальным планированием. В зависимости от масштаба можно показывать резкость или постепенность границ. И те, и другие существуют. Если переход постепенный, то граница будет проводиться в зависимости от целей планирования (разные свойства будут иметь критические значения) и масштаба.

Одно из ключевых направлений развития ландшафтоведения — поиск адекватных пространственных масштабов, в которых описываются процессы, определяющие границы разных компонентов и их свойств. Несогласованность компонентных границ

Таблица. 38.

Отличия методики полимасштабного анализа
от традиционных методик выделения геосистем

Традиционные методики выделения геосистем	Полимасштабный анализ межкомпонентных отношений
Иерархические уровни геосистем заданы априори или путем предварительного выявления иерархии ведущего фактора, чаще всего — рельефа	Иерархические уровни выявляются на основании систем отношений компонентов ландшафта. Этим обеспечивается функциональная целостность выделяемых геосистем.
Выбор элементов для классификации произволен или на основании сопоставления частных типологий компонентов (определенный иерархический уровень рельефа соответствует конкретному уровню классификации растительности или почв)	Выбор элементов определяется на основе предварительного расчета связей с гипотетически ведущим компонентом в данном масштабе. Затем выбираются для классификации только те элементы, которые достоверно отзывчивы на изменения свойств ведущего компонента в данном масштабе.
Количество иерархических уровней одинаково для всех компонентов.	Признается возможность разного количества иерархических уровней организации для компонентов ландшафта. Необходимое количество уровней обосновывается исходя из тесноты отношений с другими компонентами.
Линии перегиба рельефа считаются приоритетными границами целостных ПТК. Границы относительно однозначны в ландшафтах, генезис которых способствует формированию четких геолого-геоморфологических границ.	За границы целостных ПТК принимаются участки перехода к иному состоянию характеристик ведущего компонента, которое знаменует смену значительного количества характеристик ведомых компонентов. Характеристики, которые не меняются при переходе через границу, соотносятся с другим иерархическим уровнем организации ландшафта.
При выделении геосистемы в основном принимаются во внимание ее внутренние свойства.	При выделении геосистемы принимаются во внимание не только ее внутренние свойства, но и характер связи с вышестоящей по рангу геосистемой и отношения с одноранговыми соседними геосистемами.
На всех иерархических уровнях критерием выделения является однородность (монотонность) по ведущему информативному для данного уровня признаку.	Единство типа межкомпонентных отношений может использоваться как критерий выделения геосистем внутренне мозаичных, но связанных единым фактором дифференциации. Такие геосистемы могут быть сопоставлены с определенным иерархическим уровнем организации рельефа, характеристики которого в некоторой окрестности детерминируют варьирование состояний компонентов ландшафта.

вовсе не разрушает основу ландшафтоведения, она объясняется полимасштабностью и полиструктурностью ландшафта. Если на предполагаемой морфологией ландшафта границе меняются не все свойства сразу, то это не означает, что ландшафтной единицы нет. Это означает, что одновременно в одном пространстве наложены друг на друга парциальные геосистемы (каждая из которых состоит из группы свойств), которые подчиняются процессам разного масштаба, у них могут быть резкие или постепенные границы. Эти парциальные геосистемы — полноценный предмет исследования ландшафтоведения. Поэтому магистральная задача, которая сейчас поставлена и постепенно решается и в русскоязычном ландшафтоведении, и в англоязычной ландшафтной экологии (параллельно, независимо друг от друга, одновременно!) — разделение вкладов разномасштабных процессов в формирование пространственной вариабельности. В решение этой проблемы и пытался внести свой вклад автор.

Литература

Абишев М.Н. 1975. Информационно-картографический подход к анализу связей природных явлений (на примере гидротермических показателей растительности и почв равнинного Казахстана) // Вопросы географии. Сб. 98. М.: Мысль. С. 131–146.

Абрамова Т.А. 2002. Трансформации растительного покрова и ландшафтов юга Архангельской области в среднем и позднем голоцене (по палинологическим данным // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 1. С. 70–75.

Авессаломова И.А. 1997. Биогеохимическая специализация растений в среднетаежных ландшафтах юга Архангельской области // Растительный покров Севера в условиях интенсивного природопользования. Архангельск. С.73–77.

Авессаломова И.А., Петрушина М.Н., Хорошев А.В. 2002. Горные ландшафты: структура и динамика. М.: Изд-во Моск. ун-та. 158 с.

Авессаломова И.А. 2003. Внутренняя ландшафтно-геохимическая структура болот и факторы ее формирования (на примере юга Архангельской области) // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 1. С. 59–67.

Авессаломова И.А., Савенко А.В., Хорошев А.В. 2013. Ландшафтно-геохимическая контрастность речных бассейнов как фактор формирования ионного стока // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр № 4. С. 3–10.

Анненская Г.Н., Видина А.А., Жучкова В.К., Коноваленко В.Г., Мамай И.И., Позднеева М.И., Смирнова Е.Д., Солнцев Н.А., Цесельчук Ю.Н. 1963. Морфологическая структура географического ландшафта. М.: Изд-во МГУ. 55 с.

Апарин Б.Ф. 1992. Географические основы рационального использования почв (на двучленных породах). СПб.: Наука. 188 с.

Арманд А.Д. 1988. Самоорганизация и саморегулирование географических систем. М.: Наука. 264 с.

Арманд А.Д., Таргульян В.О. 1972. Принцип дополнительности и характерное время в географии // Системный подход в географии. М. С. 18–23.

Арманд А.Д. 1975. Информационные модели природных комплексов. М.: Наука. 128 с.

Арманд А.Д. 2006. Необратимые изменения ландшафтов // Ландшафтоведение: теория, методы, региональные исследования, практика. Матер. XI Межд. ландшафтн. конф. М.: Геогр. ф-т МГУ. С. 31–33.

Арманд А.Д. 2008. Два в одном. Закон дополнительности. М.: Издательство ЛКИ. 360 с.

Арманд А.Д., Ведюшкин М.А. 1989. Триггерные геосистемы. Препринт. М. 51 с.

Арманд А.Д., Кайданова В.В., Кушнарева Г.В., Добродеев В.Г. 1991. Определение пределов устойчивости геосистем на примере окрестностей Мончегорского металлургического комбината // Изв. АН СССР, сер. геогр. № 1. С. 93–104.

Арманд Д.Л. 1975. Наука о ландшафте. М.: Мысль. 288 с.

Атлас Костромской области. 1975. М.: ГУГК. 32 с.

Атлас Ханты-Мансийского автономного округа. Т. 2. Природа. Экология. 2004. М. - Ханты-Мансийск.

Ахметели А.М., Беручашвили Н.Л. 1990. Составление карт охраны, рационального использования и планирования ландшафтов горных территорий // Изв. Всес. геогр. о-ва. Т. 122. Вып. 4. С. 301–314.

Бабак В.И., Башилов В.И., Гаврюшова Е.А., Вохмянина Е.И., Спирин Л.Н., Касаткин Ф.Г. 1984. Геоморфолого-неотектоническое районирование // Почвенно-геологические условия Нечерноземья. М.: Изд-во Моск. ун-та. С. 41–78.

Безделова А.П. 2008. Распределение неморальных видов во вторичных лесах средней тайги Архангельской области // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 3. С. 73–79.

Беляков А.И. 2004. Ритмы функционирования локальных геосистем среднетаёжного ледникового ландшафта // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 1. С. 53–58.

Беручашвили Н.Л. 1989. Этология ландшафта и картографирование состояний природной среды. Тбилиси: Изд-во Тбилисск. ун-та. 198 с.

Беручашвили Н.Л. 1990. 1989. Геофизика ландшафта. М.: Высшая школа. 287 с.

Беручашвили Н.Л. Исаченко Г.А., Чистяков К.В. Ландшафт как реальность и объект профессионального исследования // Изв. Всес. геогр. о-ва. Т. 121. Вып. 3. С. 215–219.

Битюков Н.А. 2007. Экология горных лесов Причерноморья. Сочи: НИИ горлесэкол. 397с.

Бобра Т.В. 2005. Ландшафтные границы: выявление, анализ, картографирование. Симферополь: Таврия-Плюс. 168 с.

Бобра Т.В. 2009. Новые объекты ландшафтных исследований // Геополитика и экогеодинамика регионов. Т. 5. Вып. 1. С. 20–32.

Бобровский М.В. 2010. Лесные почвы Европейской России: биотические и антропогенные факторы формирования. М.: Т-во науч. изданий КМК. 359 с.

Богучарсков В.Т. 2006. История географии. М.: Академич. Проект. 560 с.

Боков В.А. 1992. Пространственно-временные отношения как фактор формирования свойств геосистем // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 2. С. 10–16.

Боков В.А. 2012. Реальны ли ландшафты? // Уч. зап. Таврич. нац. ун-та им. В.И. Вернадского. Сер. География. Т. 25 (64). № 2. С. 3–8.

Бреслав С.Л. 1971. Четвертичная система // Геология СССР. Т. 4. М.: Недра. С. 489–636.

Бутаков Г.П., Вахрушев В.П., Лебедев В.М. 1977. О тектонической предопределенности рельефа Удмуртии // Вопросы геоморфологии Поволжья. Вып. 1(4). Саратов: Изд-во Саратовск. ун-та. С. 71–76.

Ванчуров В.С. и др. 1971. Отчёт о комплексной геолого-гидрогеологической съёмке масштаба 1:200 000 в междуречье Устьи и Кокшеньги в Аврхангельской и Вологодской областях. Шангальская партия. Л.

Величко А.А., Тимирева С.Н., Кременецкий К.В., МакДональд Г., Смит Л.. 2007. Западно-Сибирская равнина в облике позднеледниковой пустыни // Изв. РАН. Серия геогр. № 4. С.16–27.

Видина А.А. 1962. Методические указания по полевым крупномасштабным ландшафтным исследованиям. М.: МГУ. 120 с.

Викторов А.С. 1998. Математическая морфология ландшафта. М.: ТРАТЕК. 180 с.

Викторов А.С. 1986. Рисунок ландшафта. М.: Мысль. 179 с.

Викторов А.С. 2006. Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука. 252 с.

Виноградов Б.В. 1998. Основы ландшафтной экологии. М.: ГЕОС. 418 с.

Вомперский С.Э. 1968. Биологические основы эффективности лесоосушения. М.: Наука. 312 с.

Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность. 2004. М.: Наука. Т.1, 479 с.; Т.2, 575 с.

Гагаева З.Ш., Пузаченко Ю.Г., Алещенко Г.М. 2003. Классификация форм рельефа горной территории для составления мелкомасштабной ландшафтной карты // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 1. С. 26–35.

Гагарина Э.И. 1994. Литологический фактор почвообразования. Дис. … докт. биол. н. СПб. 661 с.

Гвоздецкий Н.А. 1979. Основные проблемы физической географии. М.: Высшая школа. 222 с.

Географические исследования Сибири. Т.1. Структура и динамика геосистем. 2007. / Отв. ред. Ю.М. Семенов, А.В. Белов. Новосибирск: Гео. 413 с.

Геоморфологическое районирование СССР и прилегающих морей. 1980. М.: Высшая школа. 343 с.
Геосистемы контакта тайги и степи: юг Центральной Сибири. 1991. / Отв. ред. А.А. Крауклис. Новосибирск: Наука. 217 с.
Геренчук К.И. 1960. Тектонические закономерности в орографии и речной сети Русской равнины. Львов. 242 с.
Геттнер А. 1930. География, ее история, сущность и методы. Л., М.: Госиздат. 416 с.
Глущенко И.В., Лычак А.И. 2005. Опыт геоинформационного моделирования ландшафтно-геофизических условий в Горном Крыму // Уч. зап. Таврич. нац. ун-та им. В.И. Вернадского. Т. 18 (57). № 1. С. 16–24.
Голованов А.И., Кожанов Е.С., Сухарев Ю.И. 2006. Ландшафтоведении. М.: КолосС. 216 с.
Голубчик М.М., Евдокимов С.П., Максимов Г.Н. 1998. История географии. Смоленск: Изд-во Смоленск. гуманитарн. ун-та. 224 с.
Горбунова И.А., Гаврилова И.П. 2002. Особенности текстурно-подзолистых иллювиально-железистых почв Архангельской учебно-научной станции МГУ // Геохимия ландшафтов и география почв. Смоленск: Ойкумена. С. 242–268.
Гришанков Г.Е. 2001. Введение в физическую географию: предмет и метод. Киев: О-во «Знания». 249 с.
Гришанов Д.Г. 2007. Отчет по НИР: «Выделение особо ценных ботанических объектов и участков на территории НП «Куршская коса». Калининград. Фонды НП «Куршская коса». 25 с.
Гродзинский М.Д. 1987. Устойчивость геосистем: теоретический подход к анализу и методы количественной оценки // Изв. АН СССР. Сер. геогр. № 6. С. 5–15.
Гродзинський М.Д. 1993. Основи ландшафтної екології: Підручник. Київ: Либідь. 224 с.
Гродзинський М.Д. 1995. Стійкисть геосистем до антропогенних навантажень. Київ: Лікей. 233 с.
Гродзиньский М.Д. 2005. Пізнання ландшафту: місце і простір. Київ: Київский університет. Т.1, 431 с.; Т.2, 503 с.
Гросс В.Л., Булатов В.И. 1989. Ландшафтно-картографическое моделирование оптимизации природопользования (опыт предпроектной проработки) // Изв. Всес. геогр. о-ва. Т. 121. Вып. 4. С. 339–345.
Гугалинская Л.А., Алифанов В.М. 1995. Палеогидроморфизм почв Русской равнины - развитие концепции // Почвоведение. № 1. С. 63–72.
Данько Л.В., Черкашин Е.А., Кузьмин С.Б. 2004. Моделирование рельефа при анализе ландшафтной структуры территории // Моделирование географических систем. Иркутск: Изд-во ин-та географии СО РАН. С. 94–97.
Дворников О.А., Карпачевский Л.О., Строганова М.Н., Таргульян В.О., Тонконогов В.Д. 1987. Особенности строения почв и почвенного покрова заказника “Кологривский лес” // Почвоведение. № 9. С. 40–51.
Дедков А.П., Малышева О.Н., Порман С.Р., Рождественский А.Д. 1974. Древние поверхности выравнивания и останцовый рельеф Удмуртии // Развитие склонов и выравнивание рельефа. Казань: Изд-во Казанск. ун-та. С. 64–76.
Долгова Л.С., Гаврилова И.П. 1971. Особенности почв средне- и северотаежной подзон Западной Сибири // А.И. Попов (ред.). Природные условия Западной Сибири. М.: Изд-во Моск. ун-та. Вып. 1. С. 77–90.
Дронин Н.М. 1999. Эволюция ландшафтной концепции в русской и советской физической географии. М.: ГЕОС. 232 с.
Дьяконов К.Н. 1975. Методологические проблемы изучения физико-географической дифференциации // Вопросы географии. Сб. 98. М.: Мысль. С. 28–51.
Дьяконов К.Н. 1984. Физико-географический анализ зон влияния гидротехнических систем (на примерах водохранилищ ГЭС и осушительных мелиорации лесной зоны). Дис. … докт. геогр. н. М.

Дьяконов К.Н. 1991. Геофизика ландшафта. Биоэнергетика, модели, проблемы. М.: МГУ. 96 с.
Дьяконов К.Н. 2002. Взаимодействие структурного, эволюционного и функционального направлений в ландшафтных исследованиях // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 1. С. 13–21.
Дьяконов К.Н. 2008. Базовые концепции и понятия ландшафтоведения // Географические научные школы Московского университета. М.: Городец. С. 348–386.
Дьяконов К.Н., Абрамова Т.А., Авессаломова И.А., Беляков А.И., Пузаченко Ю.Г., Хорошев А.В. 2004. Взаимодействие структурного функционального и эволюционного направлений в ландшафтоведении // К.Н. Дьяконов, Э.П. Романова (ред.). География, общество, окружающая среда. М.: Городец. Т. 2. Функционирование и современное состояние ландшафтов. С. 213–239.
Дьяконов К.Н., Иванов А.Н. 1991. Устойчивость и инерционность геосистемы // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 1. С. 28–34.
Дьяконов К.Н, Пузаченко Ю.Г. 1997. Трансектный метод исследования структуры ландшафта // Структура, функционирование, эволюция природных и антропогенных ландшафтов. Тезисы X ландшафтной конференции. М.-СПб. С. 89–91.
Дьяконов К.Н., Пузаченко Ю.Г. 2000. Факторы эволюции и строение среднетаежного структурно-эрозионно-ледникового ландшафта // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 1. С. 37–44.
Дьяконов К.Н., Хорошев А.В. 2011. Актуальные проблемы и задачи ландшафтного планирования // К.Н. Дьяконов (отв. ред.). Актуальные проблемы ландшафтного планирования: Матер. Всеросс. науч.-практ. конф. М.: Изд-во Моск. ун-та. С. 8–13.
Европейская ландшафтная конвенция. 2000. http://conventions.coe.int/Treaty/rus/Treaties/Html/176.htm
Емельянова Л.Г., Горяинова И.Н., Мяло Е.Г. 1999. Жизнь тайги (экологические экскурсии в Устьянском районе Архангельской области). М.-Архангельск. 164 с.
Емельянова Л.Г., Хорошев А.В., Гаврилова И.П., Мяло Е.Г., Горбунова И.А., Горяинова И.Н., Неронов В.В., Петрасов В.В. 2001. Устьянская учебно-научная станция географического факультета МГУ // Г.И. Рычагов, С.И. Антонов (ред.). Учебно-научные географические станции вузов России. М.: МГУ. С. 257–283.
Еремеева А.П. 2012. Пространственные масштабы проявления факторов дифференциации ландшафтов Буртинской степи (Оренбуржье) // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 4. С. 48–53.
Ерофеев А.А. 2012. Ландшафтно-экологический анализ бассейнов малых рек на основе геоинформационного моделирования (на примере малых рек Томска и его окрестностей). Дис. … канд. геогр. н. Томск. 175 с.
Забелин И.М. 1978. Физическая география в современном естествознании (Вопросы истории и теории). М.: Наука. 336 с.
Зайдельман Ф.Р. 2010. Теория образования светлых кислых элювиальных горизонтов почв и ее прикладные аспекты. М.: КРАСАНД. 248 с.
Залиханов М.Ч., Коломыц Э.Г., Шарая Л.С., Цепкова Н.Л., Сурова Н.А. 2010. Высокогорная геоэкология в моделях. М.: Наука. 487 с.
Западная Сибирь. 1963. / Отв. ред. Г.Д. Рихтер. М.: Изд-во АН СССР. 488 с.
Ивашутина Л.И., Николаев В.А. 1971. Контрастность ландшафтной структуры и некоторые аспекты ее изучения // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 5. С. 70–77.
Инишева Л.И., Лисс О.Л. 2006. Возникновение и скорость развития процесса заболачивания на Западно-Сибирской равнине // Торф в решении проблем энергетики, сельского хозяйства и экологии. Материалы международной конференции 29 мая – 2 июня. Минск. С. 308–311.
Исаченко А.Г. 1953. Основные вопросы физической географии. Л.: Изд-во ЛГУ. 391 с.
Исаченко А.Г. 1961. Физико-географическое картирование. Ч. 3. Л.: Изд-во Ленинградск. ун-та. 268 с.
Исаченко А.Г. 2004. Теория и методология географической науки: М.: Академия. 400 с.
Исаченко А.Г. 2006. Ландшафтоведение на переходе ко второму столетию своей истории // Ландшафтоведение: теория, методы, региональные исследования, практика. Матер. XI Межд. ландшафтн. конф. М.: Геогр. ф-т МГУ. С. 3–8.

Исаченко А.Г., Исаченко Г.А. 1993. Ландшафтно-географические предпосылки экологического нормирования // Изв. Русск. геогр. о-ва. Т. 125. Вып. 1. С. 12–18.
Исаченко Г.А. 1997. Дискретность и континуальность в теории ландшафтоведения // Структура, функционирование, эволюция природных и антропогенных ландшафтов. Тезисы X ландшафтной конференции. М.-СПб. С. 23–25.
Исаченко Г.А. 1998. “Окно в Европу”: история и ландшафты. СПб.: Изд-во СПб. ун-та. 476 с.
Исаченко Г.А. 1999. Методы полевых ландшафтных исследований и ландшафтно-экологическое картографирование (курс лекций). СПб.: Изд-во СПб. ун-та. 111 с.
Истомина Е.А. 2012. Геоинформационное картографирование ландшафтов Тункинской котловины на основе метода факторально-динамической классификации // Геодезия и картография. № 4. С.32–39.
Калуцков В.Н. 2008. Ландшафт в культурной географии**.** М.: Новый хронограф. 320 с.
Касимов Н.С. 2002. Базовые концепции геохимии ландшафтов // Геохимия ландшафтов и географии почв. Смоленск: Ойкумена. С. 23–40.
Квасов Д.Д. 1975. Позднечетвертичная история крупных озер и внутренних морей Восточной Европы. Л.: Наука. 278 с.
Керженцев А.С. 2006. Функциональная экология. М.: Наука. 259 с.
Кирюшин А.В., Пузаченко Ю.Г., Стульцев Ю.К., Ямашкин А.А. 1996. Многомерный факторный анализ содержания микроэлементов в почвах Мордовии // Изв. РАН. Сер. геогр. № 4. С. 24–45.
Классификация и диагностика почв России. 2004. Смоленск: Ойкумена. 342 с.
Кобелева Н.В., Мадасова А.А., Михеев В.С. 1979. Количественный анализ признаков различных природных режимов с целью выявления структуры геосистем // Структура и динамика геосистем. Новосибирск: Наука. С. 14–35.
Ковалев А.П. 2009. Ландшафт сам по себе и для нас. Харьков: Бурун Книга. 928 с.
Кожевников А.В. 1984. История геологического развития территории в неогене и четвертичном периоде // Почвенно-геологические условия Нечерноземья. М. С. 17–40.
Козлов Д.Н., Пузаченко М.Ю., Федяева М.В., Пузаченко Ю.Г. 2008. Отображение пространственного варьирования свойств ландшафтного покрова на основе дистанционной информации и цифровой модели рельефа // Изв. РАН. Сер. геогр. № 4. С. 112–124.
Козлов Д.Н. 2009. Цифровой анализ ландшафта в крупномасштабном картографировании структур почвенного покрова. Дис. … канд. геогр. н. М. 138 с.
Козловский Ф.И. 1991. Современные естественные и антропогенные процессы эволюции почв. М.: Наука. 196 с.
Колбовский Е.Ю. 2006. Ландшафтоведение. М.: Академия. 480 с.
Колбовский Е.Ю. 2008. Ландшафтное планирование. М.: Академия. 336 с.
Колбовский Е.Ю. 2013. Нерешенные вопросы ландшафтоведения и ландшафтное планирование // Изв. РАН. Сер. геогр. № 5. С. 19–29.
Кологривский лес: экологические исследования. 1986. / Отв. ред. В.Е. Соколов. М.: Наука. 125 с.
Коломыц Э.Г. 1984. Информационно-статистический анализ структуры высокогорных экосистем и ее антропогенных изменений // Тр. ВГИ. Вып. 58. М.: Гидрометеоиздат. С. 26–53.
Коломыц Э.Г. 1998. Полиморфизм ландшафтно-зональных систем. Пущино: ОНТИ ПИЦ РАН. 311 с.
Коломыц Э.Г. 2008. Локальные механизмы глобальных изменений природных геосистем. М.: Наука. 427 с.
Коломыц Э.Г., Шарая Л.С. 2012. Влияние глобального потепления на ландшафтную структуру Северного Кавказа // Изв. РАН. Сер. геогр. № 4. С. 45–61.
Коновалова Т.И. 2004. Картографическое моделирование изменчивости геосистем // Моделирование географических систем. Иркутск: Изд-во ин-та географии СО РАН. С. 24–28.
Копыл И.В., Николаев В.А., Сенкевич Н.Г. 1990. Ландшафтно-экологическая экстраполяция лесомелиоративного опыта в прикаспийской полупустыне // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 2. С. 53–61.

Коренные темнохвойные леса южной тайги. 1988. М.: Наука. 220 с.
Кошелева Н.Е. 2002. Моделирование биогеохимических циклов тяжелых металлов в агроландшафтах на основе балансового подхода // Геохимия ландшафтов и географии почв. Смоленск: Ойкумена. С. 389–405.
Кощеева А.С., Хорошев А.В. 2008. Планирование многофункционального лесопользования на ландшафтной основе // Экологическое планирование и управление. № 2(7). С. 51–60.
Краак М.-Я., Ормелинг Ф. 2005. Картография: визуализация геопространственных данных. М.: Научный мир. 325 с.
Крауклис А.А. 1969. Структурно-динамический фациальный анализ южнотаежного ландшафта Нижнего Приангарья // Южная тайга Приангарья. Л.: Наука. С. 32–119.
Крауклис А.А. 1975. Некоторые итоги // Природные режимы и топогеосистемы Приангарской тайги. Новосибирск: Наука. С. 270–278.
Крауклис А.А. 1979. Проблемы экспериментального ландшафтоведения. Новосибирск: Наука. 232 с.
Крауклис А.А. 1997. Геосистемы, их динамика и классификация в современном контексте географии // Классификация геосистем. Матер. к Межд. науч. конф. Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН. С. 12–19.
Крауклис А.А., Евдокимова В.Н. 1975. Опыт количественного описания натурной модели // Природные режимы и топогеосистемы Приангарской тайги. Новосибирск: Наука. С. 246–269.
Кренке А.Н.-мл., Пузаченко М.Ю., Пузаченко Ю.Г. 2011. Уточнение содержания тематических карт на основе данных дистанционного зондирования // Изв. РАН, сер. геогр. № 4. С. 86–96.
Крестовский О.И. 1986. Влияние вырубок и восстановление лесов и водность рек. Л.: Гидрометеоиздат. 118 с.
Круглов І. 2006. Ландшафт як геоекосистема // Вісник Львів. ун-ту. Серія географічна. Вип. 33. С. 186–193.
Крутиков А.Е., Плешачкова В.П., Кухтина А.А. 1987. Отчёт о результатах комплексной гидрогеологической и инженерно-геологической съёмки масштаба 1:50 000 для целей мелиорации в пределах площади листов Р-38-99-А,Б,В,Г; Р-38-100-А,В; Р-38-111-А,Б. Шангальская ГСП. Архангельск.
Куприянова Т.П. 1975. Физико-географическое районирование по принципам однородности территорий // Вопросы географии. Сб. 98. С. 114–130.
Лазуков Г.И. 1971. Этапы плейстоценового осадконакопления в пределах Западно-Сибирской равнины // А.И. Попова (ред.). Природные условия Западной Сибири. Вып. 1. М.: Изд-во Моск. ун-та. С. 6–24.
Ландшафтно-интерпретационное картографирование. 2005. / Отв. ред. А.К.Черкашин. Новосибирск: Наука. 424 с.
Ландшафтоведение: теория, методы, региональные исследования, практика. Материалы XI Международной ландшафтной конференции. 2006. / Отв. ред. К.Н. Дьяконов. М.: Геогр. ф-т МГУ. 788 с.
Ласточкин А.Н. 2011. Общая теория геосистем. СПб.: Лемма. 980 с.
Линник В.Г. 2008. Ландшафтная дифференциация техногенных радионуклидов: геоинформационные системы и модели. Автореф. дис. … докт. геогр. н. М. 40 с.
Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А., Березина Н.А., Инишева Л.И., Курнишкова Т.В., Слука З.А., Толпышева Т.Ю., Шведчикова Н.К. 2001. Болотные геосистемы Западной Сибири и их природоохранное значение. Тула: Гриф и К. 584 с.
Міллер Г.П., Петлін В.М., Мельник А.В. 2002. Ландшафтознавство. Теорія і практика. Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка. 172 с.
Максимов Г.Н 1988. Методологические проблемы физической географии. Якутск: Изд-во ЯГУ. 148 с.
Малаховский Д.Б. 2000. О роли новейшей тектоники в рельефообразовании ледниковых районов северо-запада России // Изв. Русск. геогр. о-ва. Т. 132. Вып. 1. С. 45–52.

Мамай И.И. 1992. Динамика ландшафтов. Методика изучения. М.: МГУ. 167 с.
Мамай И.И. 1997. О неповторимости состояний природных территориальных комплексов // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 1. С. 30–35.
Мамай И.И. 1999. Системный подход в ландшафтоведении: приобретения и потери // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 1. С. 12–17
Мамай И.И. 2005. Динамика и функционирование ландшафтов. М.: Изд-во Моск. ун-та. 138 с.
Мамай И.И. 2008. Отечественное ландшафтоведение: история, современное состояние, направление поиска // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 1. С. 3–12.
Мамай И.И., Мироненко И.В., Роганов С.Б., Матасов В.М., Глухов А.И., Федин А.В., Лапонина Г.В. 2013а. Развитие ландшафтов Мещеры за короткие временные отрезки // Ландшафтный сборник (Развитие идей Н.А.Солнцева в современном ландшафтоведении). М.-Смоленск: Ойкумена. С. 58–87.
Мамай И.И., Мироненко И.В., Роганов С.Б., Матасов В.М., Глухов А.И., Федин А.В. 2013б. Синхронность-асинхронность наступления новых состояний в природных территориальных комплексах Мещеры // Ландшафтный сборник (Развитие идей Н.А.Солнцева в современном ландшафтоведении). М.-Смоленск: Ойкумена. С. 88–113.
Марцинкевич Г.И. 2007. Ландшафтоведение. Минск: БГУ. 206 с.
Мерекалова К.А. 2006. Выделение геосистем с единым типом межкомпонентных отношений // Ландшафтное планирование: общие основания, методология, технология. М.: Геогр. ф-т МГУ. С. 199–203.
Мересте У.И., Нымmик С.Я. 1984. Современная география: вопросы теории. М.: Мысль. 296 с.
Мильков Ф.Н. 1986. Физическая география: учение о ландшафте и географическая зональность. Воронеж: Изд-во ВГУ. 328 с.
Мильков Ф.Н. 1959. Основные проблемы физической географии. Воронеж: Изд-во Воронежск. ун-та. 170 с.
Мильков Ф.Н. 1990. Общее землеведение. М.: Высшая школа. 335 с.
Михеев В.С. 1987. Ландшафтно-географическое обеспечение комплексных проблем Сибири. Новосибирск: Наука. 205 с.
Михеев В.С., Мадасова А.А. 1977. Некоторые итоги структурно-функционального изучения среднетаежных геосистем // Природные режимы средней тайги Западной Сибири. Новосибирск: Наука. С. 258–292.
Мкртчян О. 2008. Принципи автоматизованого ландшафтно-екологічного картування // Уч. зап. Таврич. нац. ун-та им. В.И. Вернадского. Т. 21(60). № 2. С.238–247.
Мяло Е.Г., Горяинова И.Н., Родман Л.С. 1998. Роль неморальных видов в структуре среднетаежных лесов (на примере южной части Архангельской области // Экология таежных лесов. Тез. докл. межд. науч. конф. Сыктывкар. С. 42–43.
Нееф Э. 1974. Теоретические основы ландшафтоведения. М.: Прогресс. 220 с.
Нейштадт М.И. 1977. Возникновение и скорость развития процесса заболачивания. // Научные предпосылки в освоении болот Западной Сибири. М.: Наука. С. 39–48.
Немчинова А.В. 2005. Дифференциация лесных фитохор бассейна р. Понга на примере ландшафтов «Кологривского леса». Дис. … канд. биол. наук. Сыктывкар. 251 с.
Немчинова А.В., Хорошев А.В. 2011. Выделение репрезентативных лесов при лесорастительном зонировании территории Костромской области на ландшафтной основе // Вестн. Костромск. гос. ун-та им. Н.А. Некрасова. Т. 17. № 1. С. 14–19.
Немчинова А.В., Петухов И.Н., Кощеева А.С., Хорошев А.В., Иванова Н.В. 2012. Эколого-ценотическая индикация свойств южнотаежных ландшафтов на примере заповедника «Кологривский лес» // Вестн. Костромск. гос. ун-та им. Н.А. Некрасова. Т. 18. № 4. С. 17–21.
Нечаева Е.Г., Полюшкин Ю.В., Никитина З.И. 1975. Природные взаимосвязи южнотаежных геосистем // Южная тайга Прииртышья (опыт стационарного исследования южнотаежных топогеосистем). Новосибирск: Наука. С. 225–239.

Низовцев В.А. 2013. Становление антропогенного ландшафтогенеза лесных областей европейской территории России // Ландшафтный сборник (Развитие идей Н.А.Солнцева в современном ландшафтоведении). М.-Смоленск: Ойкумена. С. 196–226.

Николаев В.А. 2011. Адаптивное ландшафтное земледелие – важнейшая цель ландшафтного планирования сельскохозяйственных земель // Актуальные проблемы ландшафтного планирования. Матер. Всеросс. науч.-практ. конф. М.: Изд-во Моск. ун-та. С. 69–74.

Николаев В.А. 1979. Проблемы регионального ландшафтоведения. М.: МГУ. 160 с.

Николаев В.А. 1989. Ландшафтное пространство-время (методологические аспекты) // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 2. С.18–25.

Николаев В.А. 1999. Эстетическое восприятие ландшафта // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 6. С. 10–15.

Николаев В.А. 2006а. К теории ландшафтного полигенеза // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 6. С. 3–8.

Николаев В.А. 2006б. Ландшафтоведение. М.: МГУ. 208 с.

Николаев В.А. 2013. Память ландшафта // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 1. С. 17–21.

Орлов В.И. 1968. Ход развития природы лесоболотной зоны Западной Сибири. Л.: Недра. 172 с

Останин В.Е., Атласов Р.Р., Букреев В.А., Левина Н.Б. 1979. Краевые образования и граница валдайского оледенения в бассейне р.Ваги // Геоморфология. № 1. С.72–76.

Пащенко В.М. 1990. К развитию теории ландшафтоведения // География и природные ресурсы. № 2. С. 143–153.

Пащенко В.М. 1993. Теоретические проблемы ландшафтоведения. Киев: Наукова думка. 283 с.

Перельман А.И. 1991. Биологический круговорот атомов - важнейший геохимический параметр природных ландшафтов // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 3. С. 3–8.

Пермяков Ф.И. 1972. Почвы Удмуртии. Повышение их плодородия. Ижевск: Удмуртия. 223 с.

Петлін В.М. 2005. Синергетика ландшафту. Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка. 205 с.

Петрищев. В.П. 2011. Солянокупольный ландшафтогенез: морфоструктурные особенности и последствия техногенной трансформации геосистем. Екатеринбург: УрО РАН. 310 с.

Петрушина М.Н. 2013. Структура и динамика горных ландшафтов Северного Кавказа // Ландшафтный сборник (Развитие идей Н.А.Солнцева в современном ландшафтоведении). М.-Смоленск: Ойкумена. С. 227–248.

Писарева В.В., Лобачев И.Н. 1982. Ярославско-Костромское Поволжье // Московский ледниковый покров Восточной Европы. М.: Наука. С. 82–95.

Письмеров А.В. 1987. Лесной резерват «Кологривский лес» // Природа Костромской области и ее охрана. Ярославль: Верхне-Волжское кн. изд-во. С. 7–11.

Погребняк П.С. 1968. Общее лесоводство. М.: Колос. 440 с.

Подлазов А.В. 2005. Теория самоорганизованной критичности – наука о сложности // Будущее прикладной математики. Лекции для молодых исследователей. М.: Эдиториал УРСС. С.404–426.

Преображенский В.С. 1972. Беседы о современной физической географии. М.: Наука. 165 с.

Природа Удмуртии. 1972. / Под ред. А.И. Соловьева. Ижевск: Удмуртия. 400 с.

Природные режимы и топогеосистемы приангарской тайги. 1975. Новосибирск: Наука, 280 с.

Природные условия Западной Сибири. Вып. 7. 1980. / А.И. Попов (ред.). М.: Изд-во Моск. ун-та. 143 с.

Проект организации государственного природного заповедника «Кологривский лес»: в 2 кн. 2002. М.: ИПЭЭ им. А.Н. Северцова.

Прозоров А.А. 1999. Радиальная контрастность водного pH почв среднетаежных ландшафтов // Геохимия биосферы. II Межд. совещ. (Тез. докл.). Новороссийск. С. 278–280.

Прозоров А.А. 2003. Структура и геохимическая контрастность среднетаёжных ландшафтов юга Архангельской области (на примере бассейна р.Заячья). Автореф. дис. … канд. геогр. н. М. 23 с.

Пузаченко Ю.Г. 1986. Пространственно-временная иерархия геосистем с позиции теории колебаний // Вопросы географии. Т. 127. М.: Мысль. С. 96–111.
Пузаченко Ю.Г. 1998. Методологические основы географического прогноза и охраны среды. М.: Изд-во УРАО. 212 с.
Пузаченко Ю.Г. 2004. Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: Академия. 416 с.
Пузаченко Ю.Г., Мошкин А.В. 1969. Информационно-логический анализ в медико-географических исследованиях // Медицинская география. М. Вып. 3. С. 5–32.
Пузаченко Ю.Г., Скулкин В.С. 1981. Структура растительности лесной зоны СССР. М.: Наука. 275 с.
Пузаченко Ю.Г., Борунов А.К., Кошкарев А.В., Скулкин В.С. 1991. Географические основы предупреждения и ликвидации последствий природно-техногенных катастроф // Изв. РАН, сер. геогр. № 6. С. 40–54.
Пузаченко Ю.Г., Дьяконов К.Н., Иванов А.Н. 1997. Анализ иерархической организации структуры рельефа как основы организации природно-территориального комплекса // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 1. С. 3–9.
Пузаченко Ю.Г., Дьяконов К.Н., Безделова А.П., Хорошев А.В., Виноградова Т.А. 1998. Структура лесной растительности средней тайги (юг Архангельской области) // Экология таежных лесов. Тез. докл. межд. науч. конф. Сыктывкар. С. 54–55.
Пузаченко Ю.Г., Дьяконов К.Н., Алещенко Г.М. 2002. Разнообразие ландшафта и методы его измерения // География и мониторинг биоразнообразия. М.: Экоцентр МГУ. С. 76–177.
Пузаченко Ю.Г., Хорошев А.В., Алещенко Г.М. 2003. Анализ организации ландшафта на основе космического снимка // Исследование Земли из космоса. № 3. С. 63–71.
Пузаченко Ю.Г., Котлов И.П., Сандлерский Р.Б. 2014. Анализ изменений ландшафтного покрова по данным мультиспектральной дистанционной информации в Центрально-Лесном заповеднике // Изв. РАН. Сер. геогр. № 3. С. 5-18.
Раман К.Г. 1972. Пространственная полиструктурность топологических геокомплексов и опыт её выявления в условиях Латвийской ССР. Рига: ЛГУ им. Петра Стучки. 48 с.
Ретеюм А.Ю. 1988. Земные миры. М.: Мысль. 266 с.
Ретеюм А.Ю. 2006. Исследовательские установки ландшафтоведения // Ландшафтоведение: теория, методы, региональные исследования, практика. Матер. XI Межд. ландшафтн. конф. М.: Геогр. ф-т МГУ. С. 46–49.
Ромашкевич А.И., Ильичев Б.А. 1992. “Цветовая” трансформация оксидов железа: брюнификация, рубефикация // Элементарные почвообразовательные процессы. М.: Наука. С. 25–30.
Россия. Полное описание нашего отечества. Том 16. Западная Сибирь. 1907. / Под ред. В.П. Семенова и под общ. руководством П.П. Семенова. СПб. 591 с.
Русаков А.В., Керзум П.П., Матинян Н.Н. 2000. Карбонатные лёссовидные суглинки центра Русской равнины и эволюция почвенного покрова в позднем плейстоцене и голоцене // Почвоведение. № 8. С. 917–926.
Рысин И.И. 1998. О современном тренде овражной эрозии в Удмуртии // Геоморфология. № 3. С. 92–101
Рысин И.И., Петухова Л.Н. 2006. Русловые процессы на реках Удмуртии. Ижевск: Научная книга. 176 с.
Савинов Ю.А. 1971. Четвертичная геология севера Русской равнины. Л.: Изд-во ЛГУ. 192 с.
Сандлерский Р.Б. 2013. Термодинамические характеристики южно-таежных биогеоценозов на основе дистанционной информации (юг Валдайской возвышенности, Центрально-Лесной заповедник). Автореф. дис. … канд. биол н. М. 26 с.
Сандлерский Р.Б., Пузаченко Ю.Г. 2007. Энергетические характеристики геосистем Центрально-лесного заповедника по данным дистанционного зондирования // Тр. Центрально-лесного заповедника. Великие Луки. Вып. 5. С. 429–441.

Саушкин Ю.Г. 1976. История и методология географической науки: Курс лекций. М.: Изд-во Моск. ун-та. 421 с.

Светлосанов В.А. 2009. Устойчивость природных систем к природным и антропогенным воздействиям. М. 100 с.

Смирнов В.Э., Ханина Л.Г., Бобровский М.В. 2006. Обоснование системы эколого-ценотических групп видов растений лесной зоны Европейской России на основе экологических шкал, геоботанических описаний и статистического анализа // Бюл. Моск. о-ва испыт. прир. Отд. биол. Т. 111. Вып. 2. С. 36–47.

Смирнова В.М. 1986. Морские трансгрессии конца среднего – начала позднего плейстоцена в бассейне Северной Двины // Изв. АН СССР, сер. геогр. № 1. С. 114–127.

Смирнова О.В. 2011. Теоретические основы единой стратегии охраны природы и природопользования. Курс лекций в НП "Прозрачный мир". М. http://www.transparentworld.ru/ru/education/lect-smirnova/

Снакин В.В., Присяжная А.А., Рухович О.В. 1997. Состав жидкой фазы почв. М.: РЭФИА. 325 с.

Солнцев В.Н. 1977. О трудностях внедрения системного подхода в географию // Вопросы географии. М.: Мысль. № 104. С. 20–36.

Солнцев В.Н. 1981. Структурная организация ландшафтов. М.: Наука. 239 с.

Солнцев В.Н. 1997. Структурное ландшафтоведение: основы концепции // Структура, функционирование, эволюция природных и антропогенных ландшафтов. Тез. X ландшафтн. конф. М.-СПб. С. 11–14.

Солнцев В.Н. 2013. О гравитационной парадигме ландшафтоведения // Ландшафтный сборник (Развитие идей Н.А. Солнцева в современном ландшафтоведении). М.-Смоленск: Ойкумена. С. 155–169.

Солнцев В.Н., Рыжков О.В., Трегубов О.В., Алексеев Б.А., Калуцкова Н.Н, Анцифирова А.А. 2006. Использование GPS и ГИС технологий для изучения природных комплексов особо охраняемых природных территорий (на примере ландшафтной структуры Воронежского Биосферного заповедника). Тула: Гриф и Ко. 216 с.

Солнцев Н.А. 1948. Природный ландшафт и некоторые его общие закономерности // Тр. II Всес. геогр. съезда. М.: Географгиз. Т. 1. С. 258–269.

Солнцев Н.А. 1984. Проблема устойчивости ландшафтов // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 1. С. 14–19.

Солнцева Н.П. 1982. Геохимическая устойчивость природных систем к техногенезу (Принципы и методы изучения. Критерии прогноза) // Добыча полезных ископаемых и геохимия природных экосистем. М. С. 181–217.

Солнцева Н.П. 1998. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. М.: Изд-во Моск. ун-та. 376 с.

Солодянкина С.В., Черкашин А.К. 2004. Естестенная классификация геосистем: предопределенность структуры ландшафтных выделов их классификационной позицией // Моделирование географических систем. Иркутск: Изд-во ин-та географии СО РАН. С. 43–46.

Сочава В.Б. 1978. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск.: Наука. 320 с.

Спиридонов А.И. 1957. Есть ли покровные суглинки в области последнего оледенения Русской равнины? // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 4. С. 211–216.

Степанов И.Н. 2003. Пространство и время в науке о почвах: Недокучаевское почвоведение. М.: Наука. 184 с.

Степной заповедник «Оренбургский»: физико-географическая и экологическая характеристика. 1996. Екатеринбург: УрО РАН. 167 с.

Структура и динамика экосистем южнотаежного Заволжья. 1989. / Отв. ред. Е.Е. Сыроечковский. М. 190 с.

Структура, функционирование, эволюция природных и антропогенных ландшафтов. Тез. X ландшафтн. конф. 1997. М.-СПб.: РГО. 282 с.

Ступишин А.В. 1977. Асимметрия речных долин, ее причинность и геоморфологические

следствия в Среднем Поволжье // Вопросы геоморфологии Поволожья. Вып. 1(4). Саратов: Изд-во Саратовск. ун-та. С. 4–17.
Сысуев В.В. 1986. Моделирование процессов в ландшафтно-геохимических системах. М: Наука. 304 с.
Сысуев В.В. 2002. Структурообразующие геосистемные процессы: характерные масштабы и моделирование // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 1. С. 22–28.
Сысуев В.В. 2003а. Морфометрический анализ геофизической дифференциации ландшафтов // Изв. РАН. Серия геогр. № 4. С. 36–50.
Сысуев В.В. 2003б. Физико-математические основы ландшафтоведения. М.: Геогр. ф-т МГУ. 175 с.
Тимофеев Д.А. 2002. От Дэвиса до наших дней: чему учит история геоморфологии // Геоморфология. № 2. С. 3–9.
Топология степных геосистем. 1970. Л.: Наука. 174 с.
Топчиев А.Г. 1988. Пространственная организация географических комплексов и систем. Киев-Одесса: Выща школа. 187 с.
Трофимов А.М., Чистобаев А.И., Шарыгин М.Д. 1993. Теория организации пространства. Сообщение I. Географическое пространство-время и структура геообразования // Изв. Русск. геогр. о-ва. Т. 125. Вып. 2. С. 10–19.
Углов В.А. 1971. Опыт формализации некоторых действий районирования на основе многомерного статистического анализа. Автореф. дис. … канд. геогр. н. М. 22 с.
Федоров А.Е. 1983. Структурно-геоморфологическая интерпретация линеаментов, выделенных по космическим снимкам на севере Европейской части СССР // Исследование Земли из космоса. № 1. С. 15–23.
Физико-географическое районирование Нечерноземного Центра. 1963. М.: Изд-во Моск. ун-та. 452 с.
Физико-географическое районирование СССР. 1968. М.: Изд-во Моск. ун-та. 676 с.
Флора и фауна средней тайги Архангельской области (междуречье Устьи и Кокшеньги). 2003. / Е.Г. Мяло, А.П. Серёгин, И.Н. Горяинова, Л.Г. Емельянова, Л.Ю. Левик. М.: Геогр. ф-т МГУ. 70 с.
Фролова М.Ю. 1994. Оценка эстетических достоинств природных ландшафтов // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 2. С. 27–33.
Харвей Д. 1974. Научное объяснение в географии. М.: Прогресс. 502 с.
Хильми Г.Ф. 1966. Основы физики биосферы. Л. 300 с.
Хомич В.С., Какарека С.В., Кухарчик Т.И. 2004. Экогеохимия городских ландшафтов Беларуси. Минск: Минсктиппроект. 260 с.
Хорошев А.В. 1995. Оценка устойчивости ландшафтов бассейна р. Баксан // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. №1. С. 81–87.
Хорошев А.В. 1999. Конкуренция олиготрофного и евтрофного заболачивания в таежном ландшафте с блоковой структурой // Болота и заболоченные леса в свете задач устойчивого природопользования. Материалы конференции. М.: ГЕОС. С. 82–85.
Хорошев А.В. 2000. Структура почвенного покрова и землепользование на юге Устьянского района Архангельской области // Тр. XI съезда Русск. геогр. о-ва. Т. 7. Краеведение и краеведы. Матер. науч. конф., посвящ. 105-летию со дня рождения К.П. Гемп. СПб. С. 122–125.
Хорошев А.В. 2001а. Факторы дифференциации микроэлементов в почвах Центрального Кавказа // Изв. РАН. Сер. геогр. № 6. С. 77–82.
Хорошев А.В. 2001б. Цветовые характеристики почв как показатель структуры и эволюции среднетаежного ландшафта // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 1. С. 20–27.
Хорошев А.В. 2002. Межкомпонентные отношения в среднетаежном ландшафте // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 1. С. 62–69.
Хорошев А.В. 2003а. Влияние гидрографической сети на ландшафтную структуру севера Русской равнины // География и природные ресурсы. № 2. С. 56–62.

Хорошев А.В. 2003б. Пространственная структура ландшафта как функция блокового строения территории // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 1. С. 9–15.
Хорошев А.В. 2004. Факторы саморазвития пространственной структуры таёжного ландшафта // География и природные ресурсы. № 4. С. 5–12.
Хорошев А.В 2005а. Ландшафтная структура бассейна р.Заячья (Важско-Северодвинское междуречье, Архангельская область. М. 158 с. Деп. ВИНИТИ 27.09.2005 № 1253-В2005.
Хорошев А.В. 2005б. Геостационарные и геоциркуляционные структуры в среднетаёжном ландшафте // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 3. С. 23–28.
Хорошев А.В. 2007. Ландшафтная структура Костромской области // Изв. Русск. геогр. о-ва. Т. 139. Вып. 5. С. 58–65.
Хорошев А.В. 2009. Ландшафтно-экологические ценности при планировании лесопользования // Лесоведение. № 6. С. 64–72.
Хорошев А.В. 2010. Рельеф как фактор полимасштабной организации межкомпонентных связей в лесных ландшафтах Восточно-Европейской равнины // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 3. С. 35–42.
Хорошев А.В. 2010. Иерархическая организации межкомпонентных связей в лесных ландшафтах Восточно-Европейской равнины // Изв. Русск. геогр. о-ва. Т. 142. Вып. 5. С. 9–16.
Хорошев А.В. 2011. Пространственная дифференциация режимов природопользования в ландшафтах Куршской косы // Актуальные проблемы ландшафтного планирования: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. М.: Изд-во Моск. ун-та. С. 226–230.
Хорошев А.В. 2012а. О способе выделения парциальных геосистем на основе анализа межкомпонентных связей в ландшафте // Изв. Русск. геогр. о-ва. Т. 144. Вып. 2. С. 19–28.
Хорошев А.В. 2012б. Географическая концепция ландшафтного планирования // Изв. РАН. Сер. геогр. № 4. С. 103–112.
Хорошев А.В. 2012в. Полимасштабная организация ландшафтов Среднего Приобья // А.В. Соромотин, А.В. Толстиков (ред.). Окружающая среда и менеджмент природных ресурсов. Тез. докл. III Межд. конф. Тюмень: Изд-во Тюменск. гос. ун-та. С. 245–247.
Хорошев А.В. 2013а. Проблемы изучения полиструктурности ландшафта // И.И. Мамай (ред.). Ландшафтный сборник (Развитие идей Н.А. Солнцева в современном ландшафтоведении). М.-Смоленск: Ойкумена. С. 170–195.
Хорошев А.В. 2013б. Полимасштабность ландшафтной организации как основание для ландшафтно-планировочных решений // Структурно-динамические особенности, современное состояние и проблемы оптимизации ландшафтов: матер. 5-й Межд. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения Ф.Н. Милькова (15–17 мая 2013 г.). Воронеж: Изд-во ВГУ. С. 421–426.
Хорошев А.В. 2014. К дискуссии о неоландшафтоведении: детерминированность, полимасштабность, полиструктурность // Изв. Русск. геогр. о-ва. Т. 146. Вып. 4. С. 58–69.
Хорошев А.В., Алещенко Г.М. 2005. Пространственная дифференциация типов межкомпонентных отношений в ландшафте // Научные чтения, посвящённые 100-летию со дня рождения академика Виктора Борисовича Сочавы: Матер. Межд. конф. (Иркутск, 20–21 июня 2005 г.). Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН. С. 42–46.
Хорошев А.В., Алещенко Г.М. 2007. Характерное пространство межкомпонентных отношений в ландшафте // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 1. С. 22–28.
Хорошев А.В., Алещенко Г.М. 2008. Методы выделения геосистем с единством межкомпонентных отношений // География и природные ресурсы. № 3. С. 120–126
Хорошев А.В., Алещенко Г.М. 2012. Иерархическая организация межкомпонентных связей в ландшафте // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 3. С. 25–32.
Хорошев А.В., Артемова О.А., Матасов В.М., Кощеева А.С. 2008. Иерархические уровни взаимосвязей между рельефом, почвами и растительностью в среднетаежном ландшафте // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 1. С. 66–72.

Хорошев А.В., Еремеева А.П., Мерекалова К.А. 2013. Оценка межкомпонентных связей в степном и таежном ландшафтах с учетом изменяемой пространственной единицы // Изв. Русск. геогр. о-ва. Т. 145. Вып. 3. С. 32–42.

Хорошев А.В., Леонова Г.М., Еремеева (Иванова) А.П. 2014. Почвенно-фитоценотические связи в ландшафте Айтуарской степи // Оренбургский заповедник: значение для сохранения степных экосистем России и перспективы развития: Тр. Гос. прир. запов. «Оренбургский». Вып. 1. Оренбург: ИПК «Газпромпечать ООО «Оренбурггазпромсервис». С. 147–155.

Хорошев А.В., Леонова Г.М. 2015. Структурные изменения в ландшафте Айтуарской степи // Степи Северной Евразии: матер. VII межд. симпоз. Оренбург: ИС УрО РАН, Печатный дом «Димур». С. 894–897.

Хорошев А.В., Мерекалова К.А., Алещенко Г.М. 2010. Полимасштабная организация межкомпонентных отношений в ландшафте // Изв. РАН. Сер. геогр. № 1. С. 26–36.

Хорошев А.В., Немчинова А.В., Кощеева А.С., Иванова Н.В., Петухов И.Н., Терентьева Е.В. 2013. Ландшафтные и сукцессионные факторы соотношения неморальных и бореальных свойств травяного яруса в заповеднике «Кологривский лес» // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 5. С. 11–18.

Хорошев А.В., Немчинова А.В., Авданин В.О. 2013. Ландшафты и экологическая сеть Костромской области. Ландшафтно-географические основы проектирования экологической сети Костромской области. Кострома: Изд-во КГУ им. Н.А. Некрасова. 428 с.

Хорошев А.В., Прозоров А.А., Котлов И.П., Бочкарев Ю.Н., Столповский А.П. 2002. Изучение развития пространственной структуры ландшафта через понятие неопределенности классификационной принадлежности ПТК // Фундаментальные исследования взаимодействия суши, океана и атмосферы. Матер. Юбилейной Всеросс. науч. конф. М.: МАКС Пресс. С. 197–198.

Хорошев А.В., Прозоров А.А. 2000. Динамика щелочно-кислотных условий в почвах среднетаежных ландшафтов // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. № 1. С.50–55.

Хорошев А.В., Пузаченко Ю.Г., Дьяконов К.Н. 2006. Современное состояние ландшафтной экологии // Изв. РАН. Сер. геогр. № 5. С. 12–21.

Хорошев А.В., Чижова В.П. 2013. Олимпийское строительство в Сочи: уроки для ландшафтного планирования // Экологическое планирование и управление. № 2(15). С. 43–52.

Черванев И.Г., Боков В.А., Тимченко И.Е. 2005. Геосистемные основы управления природной средой. Харьков. 128 с.

Черкашин А.К. 1985. Математические задачи учения о геосистемах и возможные пути их решения // География и природные ресурсы. № 2. С. 34–44.

Черкашин А.К. 2005. Полисистемное моделирование. Новосибирск: Наука. 280 с.

Черкашин А.К. 2007. Полисистемные исследования развития теоретической географии // География и природные ресурсы. № 3. С. 27–37.

Черкашин А.К., Истомина Е.А. 2013. Выделение границ функционально однородных ареалов на космических снимках на основе вычисления определителя Якоби // География и природные ресурсы. № 1. С. 157–165.

Чистяков К.В. 2006. Географический детерминизм и ландшафтный прогноз // Ландшафтоведение: теория, методы, региональные исследования, практика. Матер. XI Межд. ландшафтн. конф. М.: Геогр. ф-т МГУ. С. 25–29.

Чупрынин В.И. 2003. Нелинейности в геосистемах // Изв. РАН. Сер. геогр. № 6. С. 7–14.

Шаплыгина Т.В., Волкова И.И. 2013. Природная и антропогенная трансформация ландашафтов и рельефа Куршской и Вислинской кос // Геоморфология. № 1. С. 95–103.

Швебс Г.И., Шищенко П.Г., Гродзинский М.Д., Ковеза Г.П. 1986. Типы ландшафтных территориальных структур // Физическая география и геоморфология. Вып. 33. С. 11–114.

Южная тайга Прииртышья. 1975. Новосибирск: Наука. 248 с.

Allen T.F.H., Starr T.B. 1982. Hierarchy: Perspective for Ecological Complexity. Chicago: Univ. of Chicago. 216 p.

Antonić O., Pernar N., Jelaska S.D. 2003. Spatial distribution of main forest soil groups in Croatia as a function of basic pedogenetic factors // Ecological Modelling. Vol. 170. P. 363–371.

Antrop M. 2000. Geography and landscape science // BELGEO 2000 1-2-3-4. Special Issue: 29th International Geographical Congress. P. 9–36.

Ares J., Bertiller M., del Valle H. 2001. Functional and structural landscape indicators of intensification, resilience and resistance in agroecosystems in southern Argentina based on remotely sensed data // Landscape Ecology. Vol. 16. No. 3. P. 221–234.

Axelsson R. 2009. Landscape approach for sustainable development. From applied research to transdisciplinary knowledge production. Doctoral thesis No. 2009: 94. Swedish institute of agricultural sciences: Skinnskatterberg. 98 p.

Bailey R.G. 2005. Identifying Ecoregion Boundaries // Environmental Management. Vol.34. Suppl.1. P.14–26.

Bak P., Chen K. 1991. Self-organized criticality // Sci. Am. Vol. 264. P. 46–53.

Banaszuk P., Wysocka A., Matowicka B. 2000. Relationships between development of plant communities and habitats in the landscape of river valley // Landscape ecology. Theory and applications for practical purposes. The problems of landscape ecology. Vol. 6. Warsaw. P. 21–30.

Banfield C.F., Bascomb C.L. 1976. Variability in three areas of the Densworth soil map unit. II Relationship between soil properties using laboratory measurements and field observations // J. Soil Sci. Vol. 27. No. 3.

Bastian O, Steinhardt U. (eds.). 2002 Development and perspectives of landscape ecology. Boston: Kluwer Academic Publisher. 498 p.

Ben Wu X., Archer S.R. 2005. Scale-dependent influence of topography-based hydrologic features on patterns of woody plant encroachment in savanna landscapes // Landscape Ecology. Vol. 20. P. 733–742.

Bender D.J., Tischendorf L., Fahrig L. 2003. Using patch isolation metrics to predict animal movement in binary landscapes // Landscape Ecology. Vol. 18. P. 17–39.

Benning T.L., Seastedt T.R. 1995. Landscape-level interactions between topoedaphic features and nitrogen limitation in tallgrass prairie // Landscape Ecology. Vol. 10. No. 6. P. 337–348.

Bian L., Walsh S.J. 1993. Scale dependencies of vegetation and topography in a mountainous environment of Montana // The Professional Geographer. Vol. 45. No. 1. P. 1–11.

Blaschke T., Biberacher M., Gadocha S., Schardinge I.. 2013. Energy landscapes': Meeting energy demands and human aspirations // Biomass and Bioenergy. Vol. 55. P. 3–16.

Bolstad P.V., Swank W., Vose J. 1998. Predicting Southern Appalachian overstory vegetation with digital terrain data // Landscape Ecology. Vol. 13. P. 271–283.

Borcard D., Legendre P. 2002. All-scale spatial analysis of ecological data by means of principal coordinates of neighbour matrices // Ecological Modelling. Vol. 153. P. 51–68.

Bormann F.H., Likens G.E. 1979. Pattern and Process in a Forested Ecosystem. New York: Springer-Verlag. 253 p.

Boutet J.C., Weishampel F. 2003. Spatial pattern analysis of pre- and post-hurricane forest canopy structure in North Carolina, USA // Landscape Ecology. Vol. 18. P. 553–559.

Braimoh A.K., Vlek P.L.G., Stein A. 2004. Land evaluation for maize based on fuzzy set and interpolation // Environmental Management. Vol. 33. No. 2. P. 226–238.

Brandt J., Tress B., Tress G. (eds.). Multifunctional Landscapes: Interdisciplinary Approaches to Landscape Research and Management. – Conference material for the conference on "multifunctional landscapes", Centre for Landscape Research, Roskilde, October 18–21, 2000. 264 p.

Burnett C., Blaschke T. 2003. A multi-scale segmentation/object relationship modeling methodology for landscape analysis // Ecological modeling. Vol. 168. P. 233–249.

Burrough P.A., Wilson J.P., van Gaans P.F.M., Hansen A.J. 2001. Fuzzy k-means classification of topo-climatic data as an aid to forest mapping in the Greater Yellowstone Area, USA // Landscape Ecology. Vol. 16. No. 6. P. 523–546.

Buyantuyev A., Wu J. 2007. Effects of thematic resolution on landscape pattern analysis // Landscape Ecology. Vol. 22. No. 1. P. 7–13.
Carlile D.W., Skalski J.R., Batker J.E., Thomas J.M., Cullinan V.I. 1989. Determination of ecological scale // Landscape Ecology. Vol. 2. No. 4. P. 203–213.
Chang C.-R., Lee P.-F., Bai M.-L., Lin T.-T. 2006. Identifying the Scale Thresholds for Field-Data Extrapolation via Spatial Analysis of Landscape Gradients // Ecosystems. Vol. 9. P. 200–214.
Couteron P., Barbier N., Gautier D. 2006. Textural ordination based on Fourier spectral decomposition: a method to analyze and compare landscape patterns // Landscape Ecology. Vol. 21. P. 555–567.
Cross A., Perakis S.S. 2011. Complementary Models of Tree Species–Soil Relationships in Old-Growth Temperate Forests // Ecosystem. Vol. 14. P. 248–260.
Cullinan V.I., Simmons M.A., Thomas J.M. 1997. A Bayesian test of hierarchy theory: scaling up variability in plant cover from field to remotely sensed data // Landscape Ecology. Vol 12. P. 273–285.
Cushman S.A., McGarigal K. 2002. Hierarchical, multiscale decomposition of species-environment relationships // Landscape Ecology. Vol. 17. P. 637–646.
de Boer D.H. 1999. Self-organization in fluvial landscapes: sediment dynamics as an emergent property // Proceedings of the 4th International Conference on GeoComputation Mary Washington College Fredericksburg, Virginia, USA 25–28 July 1999 http://www.geocomputation.org/1999/074/gc_074.htm
Decamps H. 2000. How a landscape finds form and comes alive // Brandt J., Tress B., Tress G. (eds.). Multifunctional Landscapes: Interdisciplinary Approaches to Landscape Research and Management. Conference material for the conference on “multifunctional landscapes”, Centre for Landscape Research, Roskilde, October 18–21, 2000. P. 44–49.
Del Barrio G., Alvera B., Puigdefabregas J., Diez C., 1997. Response of high mountain landscape to topographic variables: Central Pirenees // Landscape Ecology. Vol. 12. No. 2. P. 95–115.
Delcourt H.R., Delcourt P.A., Webb T. 1983. Dynamic plant ecology: the spectrum of vegetation change in space and time // Quartenary science review. Vol. 1. P. 153–175.
Delcourt H.R., Delcourt P.A 1988. Quartenary landscape ecology: Relevant scales in space and time // Landscape Ecology. Vol. 2. No. 1. P. 23–44.
Demek J. 1995. Problems of landscape behaviour // Ecology (Bratislava). Vol. 14. Suppl. 1. P. 23–28.
Demek J. 2000. Landscape ecology into the twenty-first century // Ecology (Bratislava). Vol. 19. Suppl. 2. P. 9–17.
Dorner B., Lertzman K., Fall J. 2002. Landscape pattern in topographically complex landscapes: issues and techniques for analysis // Landscape Ecology. Vol. 17. P. 729–743.
Dungan J.L., Perry J.N., Dale M.R.T., Legendre P., Citron-Pousty S., Fortin M.-J., Jakomulska A., Miriti M., Rosenberg M.S. 2002. A balanced view of scale in spatial statistical analysis // Ecography. Vol. 25. P. 626–640.
Dzeroski S., Drumm D. 2003. Using regression trees to identify the habitat preference of the sea cucumber (*Holothuria leucospilota*) on Rarotonga, Cook Islands // Ecological Modelling. Vol. 170. P. 219–226.
Ernault A., Bureau B., Poudevigne I. 2003. Patterns of organisation in changing landscapes: implications for the management of biodiversity // Landscape Ecology. Vol. 18. P. 239–251.
European Landscapes in Transformation: Challenges for Landscape Ecology and Management. European IALE Conference 2009. 2009. Salzburg, Bratislava. 608 p.
Farina A. 1998. Principles and methods in landscape ecology. London, UK: Chapman & Hall. 235 p.
Fletcher R.J., Jr. 2006. Emergent Properties of Conspecific Attraction in Fragmented Landscapes // American Naturalist. Vol. 168. No. 2. P. 207–218.
Forman R.T.T. 2006. Land Mosaics. Cambridge University Press. 632 p.
Forman R.T.T., Godron M. 1986. Landscape ecology. New York: John Wiley & Sons. 437 pp.
Fortin M.J., Olson R.J., Ferson S., Iverson I., Hunsaker C., Edwards G., Levine D., Butera K., Klemas V. 2000. Issues related to the detection of boundaries // Landscape Ecology. Vol. 15. P. 453–466.

Fritz H., Saïd S., Renauld P.-C., Mutake S., Coid C., Monicat F. 2003. The effects of agricultural fields and human settlements on the use of rivers by wildlife in the mid-Zambezi valley, Zimbabwe // Landscape Ecology. Vol. 18. No. 3. P. 293–302.

Fuhlendorf S.D., Woodward A.J.W., Leslie D.M., Jr., Shackford J.S. 2002. Multi-scale effects of habitat loss and fragmentation on lesser prairie-chicken populations of the US Southern Great Plains // Landscape Ecology. Vol. 17. P. 617–628.

Gardner R.H., Milne B., Turner M., O'Neill R.V. 1987. Neutral models for the analysis of broad-scale landscape pattern // Landscape Ecology. Vol. 1. P. 19–28.

Gardner R.H., Urban D.L. 2006. Neutral models for testing landscape hypotheses // Landscape Ecology. Vol. 22. P. 15–29.

Gergel S.E. 2005. Spatial and non-spatial factors: When do they affect landscape indicators of watershed loading? // Landscape Ecology. Vol. 20. P.177–189.

Gosz J.R., Sharpe P.J.H. 1989. Broad-scale concepts for interactions of climate, topography, and biota at biome transitions // Landscape Ecology. Vol. 3. No. 3/4. P. 229–243.

Granő J.G. 1923. Maastik ja Umbrus // Loodus. No. 6. P. 321–323.

Guo Z., Gan Y., Li Y. 2003. Spatial pattern of ecosystem function and ecosystem conservation // Environmental management. Vol. 32. No. 6. P. 682–692.

Gustafson E.J., Zollner P.A., Sturtevant B.R., He H.S., Mladenoff D.J. 2004. Influence of forest management alternatives and land type on susceptibility to fire in northern Wisconsin, USA // Landscape Ecology. Vol. 19. P. 327–341.

Haase G. 1964. Landschaftsokologische Detailuntersuchung und naturraumliche Gliederung // Pet. Geogr. Mitt. P. 1–2.

Haila Y. 2002. Scaling environmental issues: problems and paradoxes // Landscape and Urban Planning. Vol 61. No. 2. P. 59–69.

Hall O., Hay G.J., Bouchard A., Marceau D.J. 2004. Detecting dominant landscape objects through multiple scales: An integration of object-specific methods and watershed segmentation // Landscape Ecology. Vol. 19. No. 1. P. 59–76.

Hay G.J., Marceau D.J., Dube P., Bouchard A. 2001. A multiscale framework for landscape analysis: Object-specific analysis and upscaling // Landscape Ecology. Vol. 16. P. 471–490.

Hay G.J., Dube P., Bouchard A., Marceau D.J. 2002. A scale-space primer for exploring and quantifying complex landscapes // Ecological Modelling. Vol. 153. P. 27–49.

Hlasny T. 2006. Probabilistic approaches to ecological modeling // Ecology (Bratislava). Vol. 25. Suppl. 1. P. 66–75.

Hoechstetter S., Walz U., Dang L.H., Thinh N.X. 2008. Effects of topography and surface roughness in analyses of landscape structure – A proposal to modify the existing set of landscape metrics // Landscape Online. Vol. 3. P. 1–14. DOI:10.3097/LO.200803.

Holling C.S. 1973. Resilience and stability of ecological systems // IIASA. Research report Austria. R-R-73-3. 23 p.

Holling C.S. (ed.). 1978. Adaptive environmental assessment and management. London: John Wiley & Sons.

Holling C.S. 2004. From complex regions to complex worlds // Ecology and Society. Vol. 9. No. 1. http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss1/art11/

Hooten M.B., Larsen D.R., Wikle C.K. 2003. Predicting the spatial distribution of ground flora on large domains using a hierarchical Bayesian model // Landscape Ecology. Vol. 18. P. 487–502.

Huba M. 1998. Productivity – stability – sustainability // Ecology (Bratislava). Vol 17. Suppl. 1. P.34–42.

Hugget R. 2007. A history of the systems approach in geomorphology // Geomorphologie: Relief, Processus, Environment. No. 2. P. 145–158.

Jaeger J.A.G. 2000. Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation // Landscape Ecology. Vol. 15. P. 115–130.

Jager H.I., King A.W. 2004. Spatial uncertainty and ecological models // Ecosystems. Vol. 7. P. 841–847.

Jin Yao, Peters D., Havstad K., Gibbens R., Herrick J. 2006. Multiscale factors and long-term responses of Chihuahuan desert grasses to drought // Landscape Ecology. Vol. 21. No. 8. P. 1217–1231.
Jorgensen S.V., Svirezhev Yu.M. 2004. Towards a Thermodynamical Theory for Ecological Systems. Oxford UK: Elsevier Ltd. The Boulevard. 369 p.
Jørgensen S.E., Bastianoni S., Müller F., Patten B.C., Fath B.D., Marques J.C., Nielsen S.N., Tiezzi E., Ulanowicz R.E. 2007. A New Ecology. Systems Perspective. Amsterdam: Elsevier. 275 p.
Kachanoski R.G. 1988. Processes in soil-from Pedon to landscape // T. Rosswall, R.G. Woodmansee, P.G. Risser (eds.). SCOPE. Vol. 35. Scales and Global Change. John Wiley & Sons. P. 153–177.
Kennedy R.S.H., Spies T.A., Gregory M.J. 2008. Relationships of dead wood patterns with biophysical characteristics and ownership according to scale in Coastal Oregon, USA // Landscape Ecology. Vol. 23. P. 55–68.
Khan F.A., Fenton T.E. 1996. Secondary iron and manganese distributions and aquic conditions in a mollisol catena of Central Iowa // Soil Sci. Soc. of America J. Vol. 60. No. 2.
Khoroshev A.V. 2000. Origin of intralandscape spatial variability at the local level // Landscape ecology: Theory and applications for practical purposes. The Problems of landscape ecology. Vol. 6. Warsaw. P. 141–148.
Khoroshev A.V. 2001. Linear interrelationship between landscape geocomponents // Publicationes Instituti Geographici Universitatis Tartuensis. Vol. 92. Development of European Landscapes. Conference Proceedings. Vol. I. Tartu. P. 59–63.
Khoroshev A. 2004. Driving forces of evolution of landscape spatial pattern // Visnyk Lviv Univ. Ser. Geogr. No 31. P. 215–222.
Khoroshev A. 2010. Multilevel analysis of landscape structure for land use decisions // M. Barančoková, J. Krajčí, J. Kollár, I. Belčáková (eds.). Landscape ecology – methods, applications and interdisciplinary approach. Institute of Landscape Ecology, Slovak Academy of Sciences, Bratislava. P. 99–112.
Khoroshev A., Brusilovskaya E.O. 2010. Determination of appropriate space scale for land use decisions based on multilevel modeling of landscape processes // Landscape structures. Functions and management: response to global ecological change. International conference in Landscape ecology. Book of abstracts. Brno. P. 114.
Khoroshev A., Koshcheeva A. 2009. Landscape ecological approach to hierarchical spatial planning // Terra Spectra Planning Studies. Vol. 1. No. 2. P. 3–11.
Khoroshev A.V., Merekalova K.A. 2006. Uncertainty of relations between landscape components – a tool for modelling evolution of spatial pattern // Ekológia (Bratislava). Vol. 25. Suppl. 1. P. 122–130.
Khoroshev A.V., Merekalova K.A., Aleshchenko G.M. 2007. Multiscale organization of intercomponent relations in landscape // K.N. Dyakonov, N.S. Kasimov, A.V. Khoroshev, A.V. Kushlin (eds.). Landscape Analysis for Sustainable Development. Theory and Applications of Landscape Science in Russia. Moscow: Alex Publishers. P. 93–103.
King A.W. 1999. Hierarchy theory and the landscape…level? Or: words do matter // J.A. Wiens, M.R. Moss (eds.). Issues in Landscape Ecology. Snowmass Village, Colorado, USA. P. 6–9.
King R.S., Richardson C.J., Urban D.L., Romanowicz E.A. 2004. Spatial dependency of vegetation – environmental linkages in an anthropogenically influenced wetland ecosystem // Ecosystems. Vol. 7. P. 75–97.
Klijn F., de Haes H.A.U. 1994. A hierarchical approach to ecosystems and its applications for ecological land classification // Landscape Ecology. Vol. 9. No. 2. P. 89–104.
Klimo E., Kulhavy J., Vavříček D. 1996. Changes in the quality of precipitation water passing through Norway spruce forest ecosystem in the agricultural-forest landscape of the Drahanska vysočina Uplands // Ecology (Bratislava). Vol. 18. No. 3. P. 295–306.
Krcho J. 1973. Morphometric analysis of relief on the basis of geometric aspect of field theory. Acta geographica UC, Geographico-physica, 1, SPN, Bratislava. 233 p.
Krnač Š., Krnačova Z. 1994. Study of ecosystems by factor analysis method. I. Exploratory approach // Ecology (Bratislava). Vol. 13. No. 4. P. 349–360.

Larsen J.K., Madsen J. 2000. Effects of wind turbines and other physical elements on field utilization by pink-footed geese (Anser brachyrhynchus): A landscape perspective // Landscape Ecology. Vol. 15. No. 8. P. 755–764.
Legendre P. 1993. Spatial autocorrelation: trouble or a new paradigm // Ecology. Vol. 74. P. 1659–1673.
Leser H. 1997. Landschaftsökologie. UTB-Taschenbuch. Stuttgart: Ulmer-Verlag. 644 S.
Likens G.E., Bormann F.H. 1995. Biogeochemistry of a forested ecosystem. New York: Springer-Verlag. 159 p.
Litaor M.I., Seastedt T.R., Walker D.A. 2002. Spatial analysis of selected soil attributes across an alpine topographic/snow gradient // Landscape Ecology. Vol. 17. P. 71–85.
Lobo A., Moloney K., Chic O., Chiariello N. 1998. Analysis of fine-scale spatial pattern of a grassland from remotely-sensed imagery and field collected data // Landscape Ecology. Vol. 13. P. 111–131.
Lookingbill T., Urban D. 2004. An empirical approach towards improved spatial estimates of soil moisture for vegetation analysis // Landscape Ecology. Vol. 19. No. 4. P. 417–433.
Ludwig J.A., Tongway D.J., Eager R.W., Williams R.J., Cook G.D. 1999. Fine-scale vegetation patches decline in size and cover with increasing rainfall in Australian savannas // Landscape Ecology. Vol. 14. P. 557–566.
MacArthur R., Wilson E.O. 1967. The Theory of Island Biogeography. Princeton: Princeton Univ. Press. 203 p.
Makhdoum M.F. 2008. Landscape ecology or environmental studies (Land Ecology) (European versus Anglo-Saxon schools of thought) // J. Int. Environmental Application & Science. Vol. 3. No. 3. P. 147–160.
Malard F., Tockner K., Ward J.V. 2000. Physico-chemical heterogeneity in a glacial landscape // Landscape Ecology. Vol. 15. No. 8. P. 679–695.
Marceau D.J. 1999. The scale issue in social and natural sciences // Canadian Journal of Remote Sensing. Vol. 25. No. 4. P. 347–356.
May R.M. 1972. Will a large complex system be stable? // Nature (London). Vol. 238. P. 413–414.
McGarigal K., Marks B.J. 1995. Fragstats: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. U. S. Forest Service General Technical Report PNW:351. Portland, OR, USA.
McIntyre N.E., Wiens J. 2000. A novel use of the lacunarity index to discern landscape function // Landscape Ecology. Vol. 15. No. 4. P. 313–321.
McKeague J.A., Day J.H. 1966. Dithionite- and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils // Can. J. Soil Sci. Vol. 46. No. 1.
McMahon G., Wiken E.B., Gauthier D.A. 2004. Toward a scientifically rigorous basis for developing mapped ecological regions // Environmental Management. Vol. 34. Suppl. 1. P. 111–124.
Meentemeyer V. 1989. Geographical perspectives of space, time, scale // Landscape Ecology. Vol. 3. No. 3/4. P. 163–173.
Meisel J., Turner M.G. 1998. Scale detection in real and artificial landscapes using semivariance analysis // Landscape Ecology. Vol. 13. P. 347–362.
Mikloš L. 1996. Landscape-ecological theory and methodology: a goal oriented application of the traditional scientific theory and methodology to a branch of a new quality // Ecology (Bratislava). Vol. 15. No. 4. P. 377–385.
Milns I., Beale C.M., Smith V.A. 2010. Revealing ecological networks using Bayesian network inference algorithms // Ecology. Vol. 91. No. 7. P.1892–1899.
Minar J. 1993. The position of geomorphology in the landscape research // Acta Facultatis Rerum Naturalium Universitatis Comenianae. Geographica. Nr. 32. P.35–49.
Minar J., Evans I.S. 2008. Elementary forms for land surface segmentation: the theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping // Geomorphology. Vol. 95. Issue 3–4. P. 236–259.
Molenaar M., Cheng T. 2002. Fuzzy spatial objects and their dynamics // The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 32. Part 4. ISPRS Commission IV – GIS Between Visions and Applications. P. 389–393.
Moore S.A., Wallington T.J., Hobbs R.J., Ehrlich P.R., Holling C.S., Levin S., Lindenmayer D., Pahl-Wostl C., Possingham H., Turner M.G., Westoby M. 2009. Diversity in Current Ecological

Thinking: Implications for Environmental Management // Environmental Management. Vol. 43. P. 17–27.
Moss M.R. 1999. Fostering academic and institutional activities in landscape ecology // J.A. Wiens, M.R. Moss (eds.). Issues in Landscape Ecology. International Association for Landscape Ecology. Snowmass Village. P. 138–144.
Muller F. 2005. Indicating ecosystem and landscape organization // Ecological Indicators. Vol. 5. P. 280–294.
Musio M., von Wilpert K., Augustin N.H. 2007. Crown condition as a function of soil, site and tree characteristics // Eur. J. Forest Res. Vol. 126. P. 91–100.
Myster R.W., Thomlinson J.R., Larsen M.C. 1997: Predicting landslide vegetation in patches on landscape gradients in Puerto Rico // Landscape Ecology. Vol. 12. P. 299–307.
Naveh Z. 2000. Introduction to the theoretical foundations of multifunctional landscapes and their application in transdisciplinary landscape ecology // J. Brandt, B. Tress, G. Tress (eds.). Multifunctional Landscapes: Interdisciplinary Approaches to Landscape Research and Management. Centre for Landscape Research, Roskilde. P. 27–43.
Naveh Z. 2001. Ten major premises for a holistic conception of multifunctional landscape // Landscape and Urban Planning Vol. 57. P. 269–284.
Naveh Z. 2010. Ecosystem and landscapes – a critical comparative appraisal // Journal of Landscape Ecology. Vol. 3. No. 1. P. 64–81.
Ndubisi F. 2002. Ecological Planning: A Historical and Comparative Synthesis. John Hopkins University, Baltimore. 384 p.
Obeysekera J., Rutchey K. 1997. Selection of scale for Everglades landscape models // Landscape Ecology. Vol. 12. No. 1. P. 7–18.
Oline D., Grant M.C. 2002. Scaling patterns of biomass and soil properties: an empirical analysis // Landscape Ecology. Vol.17. P. 13–26.
O'Neill R.V., De Angelis D.L., Waids J.B., Allen T.F.H. 1986. A hierarchical concept of ecosystem. Princeton University Press, Prinston, New Jersey. 262 p.
O'Neill R.V. 1988. Hierarchy theory and global change // T. Rosswall, R.G. Woodmansee, P.G. Risser (eds.). SCOPE 35. Scales and Global Change: Spatial and Temporal Variability in Biospheric and Geospheric Processes. Wiley, U.K. P. 29–45.
O'Neill R.V., Johnson A.R., King A.W. 1989. A hierarchical framework for the analysis of scale // Landscape Ecology. Vol. 3. No. 3–4. P. 193–205.
Opdam P., Verboom J., Pouwels R. 2003. Landscape cohesion: an index for the conservation potential of landscapes for biodiversity // Landscape Ecology. Vol. 18. P. 113–126.
Openshaw S. 1977. A geographical solution to scale and aggregation problem in region building, partitioning and spatial modelling // Institute of British Geographers, Transactions, New Series. Vol. 2. P. 459–472.
Opp C. 1991. Actual problems of loadability and load in agro-ecosystems // Ecology (CSFR). Vol. 10. No. 4. P. 373–388.
Ostendorf B., Reynolds J.F. 1998. A model of arctic tundra vegetation derived from topographic gradients // Landscape Ecology. Vol. 13. P. 187–201.
Oťaheľ J., Drdoš J., Štefunková D. 2007. Landscape perception assessment (visual quality, emotional quality, landscape identity, habitat quality // Landscape Ecology in Slovakia. Development, Current State, and Perspectives. P. 116–123.
Papadimitriou F. 2010. Geo-mathematical modelling of spatial-ecological complex systems: an evaluation // Geography, Environment, Sustainability. Vol. 3. No. 1. P. 67–80.
Papadimitriou F., Mairota P. 1996. Spatial scale-dependent policy planning for land mnagement in Southern Europe // Environmental Monitoring and Assessment. Vol. 39. P. 47–57.
Perry G.L.W., Enright N.J. 2002. Spatial modelling of landscape composition and pattern in a maquis-forest complex, Mont Do, New Caledonia // Ecological Modelling. Vol. 152. P. 279–302.

Peters D.P.C., Jin Yao, Huenneke L.F., Gibbens R.P., Havstad K.M., Herrick J.E., Rango A., Schlesinger W. 2007. A framework and methods for simplifying complex landscapes to reuce uncertainty in predictions // J. Wu, K.B. Jones, O.I. Loucks (eds.). Scale and uncertainty in landscape ecology. Springer. P. 131–146.

Peterson G., Allen C.R., Holling C.S. 1998. Ecological resilience, biodiversity, and scale // Ecosystems. Vol. 1. P. 6–18.

Phillips J.D. 1999. Divergence, convergence and self-organization in landscapes // Ann. Assoc. Am. Geographers. Vol. 89. No. 3. P. 466–488.

Phillips J.D. 2002. Global and local factors in earth surface systems // Ecological Modelling. Vol. 149. No. 3. P. 257–272.

Phillips J.D. 2006. Deterministic chaos and historical geomorphology: a review and look forward // Geomorphology. Vol. 76. P. 109–121.

Pickett S.T.A., Cadenasso M.L. 2002. The ecosystem as a multidimensional concept: meaning, model, and metaphor // Ecosystems. Vol. 5. P. 1–10.

Reid R.S., Kruska R.L., Muthui N., Taye A., Wotton S., Wilson C.J., Mulatu W. 2000. Land-use and land-cover dynamics in response to changes in climatic, biological and socio-political forces: the case of southwestern Ethiopia // Landscape Ecology. Vol. 15. No. 4. P. 339–355.

Robinson V.B. 2002. A perspective on geographic information systems and fuzzy sets // Proceedings of North American Fuzzy Information Processing Society Proceedings, IEEE, New Orleans, LA. P. 1–6.

Röder M., Syrbe R.-U. 2000. Relationship between land use change, soil degradation and landscape functions // Landscape ecology. Theory and applications for practical purposes. The problems of landscape ecology. Vol. 6. Warsaw. P. 235–246.

Rowe J.S. 1996. Land classification and ecosystem classification // Environmental Monitoring and Assessment. Vol. 39. P. 11–20.

Rupp T.S., Starfield A.M., Chapin F.S. 2000. A frame-based spatially explicit model of subarctic vegetation response to climatic change: comparison with a point model // Landscape Ecology. Vol. 15. No. 4. P. 383–400.

Russell W.H., Jones C. 2001. The effects of timber harvesting on the structure and composition of adjacent old-growth coast redwood forest, California, USA // Landscape Ecology Vol. 16. P. 731–741.

Ružička M. 2000. Krajinnoekologicke planovanie – LANDEP I (Systemovy pristup v krajinnej ekologii). Nitra. 119 p.

Ryszkowski L., Bartoszewicz A., Kedziora A. 1999. Management of matter fluxes by biogeochemical barriers at the agricultural landscape level // Landscape Ecology. Vol.14. P. 479–492.

Salthe S.N. 2002. An exercise in the natural philosophy of ecology // Ecological Modelling. Vol. 158. P.167–179.

Saunders D.A., Briggs S.V. 2002. Nature grows in straight lines – or does she? What are the consequences of the mismatch between human-imposed linear boundaries and ecosystem boundaries? An Australian example // Landscape and Urban Planning. Vol. 61. P. 71–82.

Sebastiá M.-T. 2004. Role of topography and soils in grassland structuring at the landscape and community scales // Basic and Applied Ecology. Vol. 5. P. 331–346.

Seoane J., Bustamante J., Dıaz-Delgado R. 2004. Competing roles for landscape, vegetation, topography and climate in predictive models of bird distribution // Ecological Modelling. Vol. 171. P. 209–222.

Shugart H.H. 1984. A Theory of Forest Dynamics: The Ecological Implications of Forest Succession Models. New York: Springer-Verlag. 278 p.

Shugart H.H., Michaels P.J., Smith T.M., Weinstein D.A., Rastetter E.B. 1988. Simulation Models of Forest Succession // T. Rosswall, R.G. Woodmansee, P.G. Risser (eds.). SCOPE 35. Scales and Global Change: Spatial and Temporal Variability in Biospheric and Geospheric Processes. Wiley, U.K. 376 p.

Shugart H.H. 1999. Equilibrium versus non-equilibrium landscapes // J.A. Wiens, M.R. Moss (eds.). Issues in Landscape Ecology. Snowmass Village. Colorado, USA. P. 18–21.
Smith M.-L., Carpenter C. 1996. Application of the USDA Forest Service national hierarchical framework of ecological units at the sub-regional level: the New England – New York example // Environmental Monitoring and Assessment. Vol. 39. P. 187–198.
Snacken F., Antrop M. 1983. Structure and dynamics of landscape systems // J. Drdoš (ed.). Landscape Synthesis. Geoecological Foundations of the Complex Landscape Management. Veda, Bratislava. P. 10–30.
Solon J. 1999. Integrating ecological and geographical (biophysical) principles in studies of landscape systems // J.A. Wiens, M.R. Moss (eds.). Issues in Landscape Ecology. 5th IALE-World Congress, Snowmass, CO, USA. P. 22–27.
Strayer D.L., Beighley R.E., Thompson L.C., Brooks S., Nilsson C., Pinay G., Naiman R.J. 2003. Effects of land cover on stream ecosystems: roles of empirical models and scaling issues // Ecosystems. Vol. 6. P. 407–423.
Stremke S., van den Dobbelsteen A., Koh J. 2011. Exergy landscapes: exploration of second-law thinking towards sustainable landscape design // Int. J. Exergy. Vol. 8. No. 2.
Sugier P., Czarnecka B. 1998. Changes of geocomponents in the landscape of Polesie Lubelskie under the influence of antropopression // Landscape ecology transformation in Europe. Practical and theoretical aspects. The problems of landscape ecology. Vol. 3. Warsaw. P. 236–245.
Sweeney B.A., Cook J.E. 2001. A landscape-level assessment of understory diversity in upland forests of North-Central Wiskonsin, USA // Landscape Ecology. Vol. 16. P. 55–69.
Taylor P. 1969. The location variable in taxonomy // Geographical Analysis. Vol. 1. No. 2. P. 181–195.
Tischendorf L. 2001. Can landscape indices predict ecological processes consistently? // Landscape Ecology. Vol. 16. No. 3. P. 235–254.
Tischendorf L., Fahrig L. 2000. How should we measure landscape connectivity? // Landscape Ecology. Vol. 15. No. 7. P. 633–641.
Tran L.T., O'Neill R.V., Smith E.R. 2006. A generalized distance measure for integrating multiple environmental assessment indicators // Landscape Ecology. Vol. 21. P. 469–476.
Tress G., Tress B., Fry G. 2004. Clarifying integrative research concepts in landscape ecology // Landscape Ecology. Vol. 20. P. 479–493.
Turnbull L., Wainwright J., Brazier R.E., Bol R. 2010. Biotic and Abiotic Changes in Ecosystem Structure over a Shrub-Encroachment Gradient in the Southwestern USA // Ecosystems. Vol. 13. No. 8. P. 1239–1255.
Turner M., O'Neill R.V., Gardner R., Milne B.T. 1989. Effects of changing spatial scale on the analysis of landscape pattern // Landscape Ecology. Vol. 1. No. 3/4. P. 153-162.
Turner M., Romme W.H., Gardner R.H., O`Neill R.V., Kratz T.K. 1993. A revised concept of landscape equilibrium: Disturbance and stability on scales landscape // Landscape Ecology. Vol. 8. No. 3. P. 213–227.
Turner M., Gardner R.H., O`Neill R.V. 2001. Landscape Ecology in Theory and Practice: Pattern and Process. Springer Verlag. 352 p.
Ulery A.L., Graham R.C. 1993. Forest fire effects on soil color and texture // Soil Sci. Soc. of America J. Vol. 57. No. 1. P. 135–140.
Urban D.L., O'Neill R.V., Shugart H.H., Jr. 1987. Landscape ecology. A hierarchical perspective can help scientisis understand spatial patterns // Bioscience. Vol. 37. No. 2. P. 119–127.
van Eetvelde V., Antrop M. 2007. Landscape character beyond landscape typologies. Methodological issues in trans-regional integration in Belgium // Landscape assessment from theory to practice: application in planning and design. 18th International ECLAS Conference. Belgrade. P. 229–239.
van Horssen P.W., Schot P.P., Barendregt A.A 1999. GIS-based plant prediction model for wetland ecosystems // Landscape Ecology. Vol. 14. P. 253–265.
Vasconcelos De M.J.P., Zeigle B.P., Graham L.A. 1993. Modeling multiscale spatial ecological processes under the discrete-event systems paradigm // Landscape Ecology. Vol. 8. No. 4. P. 273–286.

von Haaren C, Galler C, Ott S. 2008. Landscape planning. The basis of sustainable landscape development. Leipzig, Bonn: Federal Agency for Nature Conservation. 51 p.
Waldhardt R., Simmering D., Otte A. 2004. Estimation and prediction of plant species richness in a mosaic landscape // Landscape Ecology. Vol. 19. P. 211–226.
Waldrop M.M. 1992. Complexity: The emerging science at the edge of order and chaos. New York: Touchstone. 384 p.
Wamelink G.W.W., ter Braak C.J.F, van Dobben H.F. 2003. Changes in large-scale patterns of plant biodiversity predicted from environmental economic scenarios // Landscape Ecology. Vol. 18. P. 513–527.
Weaver K., Perera A.H. 2004. Modelling land cover transitions: A solution to the problem of spatial dependence in data // Landscape Ecology. Vol. 19. P. 273–289.
Weishampel J.F., Knox R.G., Levine E.R. 1999. Soil saturation effects on forest dynamics: scaling across a southern boreal/northern hardwood landscape // Landscape Ecology. Vol. 14. P. 121–135.
Wicik B. 2001. The hydrogeochemical problems in the Campinos national park // A. Richling, M. Osowiec (eds.). Landscape ecological methods for strongly transformed areas. Warsaw. P. 55–61.
Wickham J.D., Wade T.G., Riitters K.H., O'Neill R.V., Smith J.H., Smith E.R., Jones K.B., Neale A.C. 2003. Upstream-to-downstream changes in nutrient export risk // Landscape Ecology. Vol. 18. P. 195–208.
Wickham J.D., Riitters K.H., Wade T.G., Coulston J.W. 2007. Temporal change in forest fragmentation at multiple scales // Landscape Ecology. Vol. 22. P. 481–489.
Wiens J.A., Milne B.T. 1989. Scaling of 'landscapes' in landscape ecology, or, landscape ecology from a beetle's perspective // Landscape Ecology. Vol. 3. No. 2. P. 87–96.
Wilcox B.P., Breshears D.D., Allen C.D. 2003. Ecohydrology of a resource-conserving semiarid woodland: effects of scale and disturbance // Ecological Monographs. Vol. 73. No. 2. P. 223–239.
Wu J. 1999. Hierarchy and scaling: extrapolating information along a scaling ladder // Can. J. of Remote Sensing. Vol. 25. No. 4. P. 367–380.
Wu J. 2004. Effects of changing scale on landscape pattern analysis: scaling relations // Landscape Ecology. Vol. 19. P. 125–138.
Wu J., David J.L. 2002. A spatially explicit hierarchical approach to modelling complex ecological systems: theory and applications // Ecological modelling. Vol. 153. P. 7–26.
Wu J., Gao W., Tueller P.T. 1997. Effects of changing spatial scale on the results of statistical analysis with landscape data: A case study // Geographic Information Sciences. No 3. P. 30–41.
Wu J., Jelinski D.E., Luck M., Tueller P.T. 2000. Multiscale analysis of landscape heterogeneity: scale variance and pattern metrics // Geographic Information Sciences. Vol. 6. P. 6–19.
Wu J., Hobbs R. 2002. Key issues and research priorities in landscape ecology: An idiosyncratic synthesis // Landscape Ecology. Vol. 17. No. 4. P. 355–365.
Wu J., Loucks O.L. 1995. From balance-of-nature to hierarchical patch dynamics: A paradigm shift in ecology // Quarter Review of Biology. Vol. 70. P. 439–466.
Wu J., Qi Y. 2000. Dealing with scale in landscape analysis: An overview // Geographic Information Sciences. Vol. 6. No. 1. P. 1–5.
Zhu A.X., Hudson B., Burt J., Lubich K., Simonson D. 2001. Soil mapping using GIS expert knowledge and fuzzy logic // Soil Science Society of America Journal. Vol. 65. No. 5. P. 1463–1472.
Zonneveld I.S. 1989. The land unit – A fundamental concept in landscape ecology, and its applications // Landscape ecology. Vol. 3. No 2. P. 67–86.
Zurlini G., Riitters K.H., Zaccarelli N., Petrosillo I. 2007. Patterns of disturbance at multiple scales in real and simulated landscapes // Landscape Ecology. Vol. 22. P. 705–721.