

На правах рукописи

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
Географический факультет

Хорошев Александр Владимирович

**ПОЛИМАСШТАБНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ЛАНДШАФТА**

Специальность 25.00.23

"Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов"

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
доктора географических наук

Москва-2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. СОВРЕМЕННАЯ ПРОБЛЕМАТИКА ИССЛЕДОВАНИЙ СТРУКТУРЫ ЛАНДШАФТА	13
1.1. Разнообразие трактовки понятия «ландшафт» и основные тенденции развития науки о ландшафте	13
1.2. Круг проблем современного ландшафтоведения	23
1.3. Структурное направление ландшафтоведения	34
1.4. Подходы к исследованию межкомпонентных связей	42
1.5. Подходы к исследованию иерархической и полимасштабной организации ландшафта	48
Глава 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИХ ПОДГОТОВКИ К АНАЛИЗУ	64
2.1. Описание полигонов исследования	64
2.1.1. Среднетаежный полигон: Архангельская область, бассейн р.Заячья	68
2.1.2. Среднетаежный полигон: Ханты-Мансийский автономный округ, терраса р.Обь	74
2.1.3. Южнотаежный полигон: Костромская область, Кологривский район, бассейн р.Унжа	77
2.1.4. Хвойно-широколиственнолесной полигон: республика Удмуртия, бассейны р. Казанка и р.Вала	80
2.1.5. Хвойно-широколиственнолесной полигон: Калининградская область, Куршская коса	82
2.1.6. Степной полигон: Оренбургская область, Айтуарская степь, бассейн р. Урал	84
2.2. Методы полевых описаний	88
2.3. Подготовка полевых данных и цифровых моделей рельефа к анализу	90
Глава 3. ТЕОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ ПОЛИМАСШТАБНОГО АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ ЛАНДШАФТА	93
3.1. Геосистемная интерпретация полимасштабного подхода к анализу структуры ландшафта	93
3.1.1. Дискуссия об определениях системы и геосистемы	93
3.1.2. Типы систем в диссертационном исследовании	99
3.2. Причины пространственной вариабельности	106
3.3. Выбор операционной территориальной единицы	112

3.3.1. <i>Зависимость оценок межкомпонентных связей от размера операционной территориальной единицы</i>	112
3.3.2. <i>Выбор размеров операционной территориальной единицы для решения задач работы</i>	114
3.4. Проблема снижения размерности данных	115
3.4.1. <i>Обоснование снижения размерности</i>	115
3.4.2. <i>Метод снижения размерности, используемый в работе</i>	119
3.5. Проблемы и способы интерпретации межкомпонентных связей	123
3.5.1. <i>Причины варьирования тесноты связей</i>	123
3.5.2. <i>Используемые методы исследования межкомпонентных внутриуровневых связей</i>	130
3.6. Эффекты межкомпонентных взаимодействий	134
3.6.1. <i>Прямые и опосредованные межкомпонентные связи и их пространственное варьирование</i>	134
3.6.2. <i>Применяемые методы выявления совокупных эффектов воздействия группы свойств и границ геосистем с единым видом зависимости между свойствами</i>	141
3.7. Эффекты взаимодействия геосистем разных масштабных уровней	144
3.7.1. <i>Обоснование понятия «Резонансное пространство межуровневых связей»</i>	144
3.7.2. <i>Методы выявления резонансного пространства межуровневых связей и ареалов проявления видов зависимостей</i>	156
3.8. Проблема разделения вкладов внутриуровневых и межуровневых связей	163
3.8.1. <i>Основные составляющие пространственного варьирования свойств компонентов ландшафта</i>	163
3.8.2. <i>Метод разделения вкладов внутриуровневых и межуровневых связей</i>	167
3.9. Программа синтеза парциальных геосистем	170
3.10. Место полимасштабного анализа структуры ландшафта среди подходов к объективизации выделения геосистем и ее предметные и региональные ограничения	180
Глава 4. ПОЛИМАСШТАБНЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ЛАНДШАФТА	186
4.1. Интерпретация физического смысла осей дифференциации свойств компонентов и ранжирование экологических факторов	186
4.2. Межрегиональный анализ внутриуровневой компонентной структуры	193
4.3. Зависимость внутриуровневых межкомпонентных связей от уровня ландшафтного разнообразия	208
4.4. Межуровневые связи как индикатор полимасштабности ландшафтной организации	216

4.4.1. Подчиненность разных свойств ПТК разномасштабным процессам	219
4.4.2. Подчиненность свойства ПТК процессам, происходящим на нескольких вышестоящих уровнях пространственной организации	231
4.4.3. Различие характера межкомпонентных связей и стоящих за ними процессов во вложенных и вмещающих ПТК	237
4.5. Разделение вкладов внутриуровневых и межуровневых связей в варьирование свойств компонентов	243
4.6. Пространственные рамки действия межкомпонентных связей	254
4.6.1. Выявление ареала действия межуровневых и внутриуровневых связей с использованием ограниченной выборки данных полевых наблюдений	255
4.6.2. Выявление ареала действия межуровневых связей с использованием континуальных данных о свойствах растительного покрова и рельефа	257
4.7. Временные рамки действия межкомпонентных связей	269
4.8. Синтез геосистем на основе иерархии межкомпонентных отношений	282
4.8.1. Двухуровневая дедуктивная картографическая модель парциальных геосистем	282
4.8.2. Многоуровневая индуктивная картографическая модель парциальных геосистем	293
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	326
ВЫВОДЫ	332
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	333
СПИСОК ТЕРМИНОВ	333
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	336

ВВЕДЕНИЕ

Постановка проблемы и ее актуальность.

Иерархическая организация ландшафта стала одним из основных предметов исследования с ранних этапов развития науки о географическом ландшафте (Раменский, 1938; Солнцев, 1948; Troll, 1950, Christian, 1958 и др.). Десятилетия прошли в поисках «единственно правильной» иерархии. Хотя разработанная к 1950-м гг. московской школой система морфологических единиц (Солнцев, 1948, Анненская и др., 1963) оказалась удобной для практики, единства в сообществе ландшафтоведов достигнуть не удалось. Оказалось, что геолого-геоморфологические границы, положенные в основу выделения морфологических единиц, или контролируют не все свойства ландшафта, или контролируют их с разной силой, или на многих территориях выражены настолько нечетко, что ландшафтная карта приобретает оттенок субъективности. К концу XX века ландшафтоведение пришло к осознанию неодинаковости характерных времен компонентов ландшафта (Арманд, Таргульян, 1974; Тишков, 2016) и наличия разнотипных самостоятельных структур, что положило начало концепции полиструктурности (Раман, 1972). Сформировалось понимание, что группы взаимосвязанных свойств ландшафта могут контролироваться одновременно процессами разной природы и разного масштаба. Математическое понятие «корреляционная плеяда» для переменных со статистически достоверными связями стало играть конструктивную роль в ландшафтоведении (Крауклис, Евдокимова, 1975; Коломыц, 1998; Гродзинский, 2014) для распознавания в ландшафтах парциальных «геосистем», «геокомплексов», «структур» (Сочава, 1978; Нееф, 1974, Коломыц, 1998; Solon, 1999). Единый сигнал от внешних факторов может порождать несколько цепочек следствий для разных ландшафтных плеяд в одном и том же пространстве. единый сигнал от внешних факторов может порождать несколько цепочек следствий для разных плеяд в одном и том же пространстве. Стала осознаваться потребность в количественных моделях структуры, позволяющих выявлять скрытые для непосредственного наблюдения формы упорядоченности ландшафтного пространства. Такие формы если и контролируются морфолитогенной основой, то более сложным образом, чем подразумевается в традиционной концепции морфологической структуры.

Опыт крупномасштабных ландшафтных исследований, в том числе стационарных, показал необходимость распознавать не единственную иерархию (по типу «матрешки»), а множество масштабных уровней, специфических для каждого процесса и контролируемой им плеяды свойств. Взаимодействие компонентов ландшафта, порождающее вертикальную структуру – самая давняя, но не теряющая актуальности тема ландшафтоведения. Однако на современном этапе требуется не просто выявлять связи, а соотносить их с тем или иным

масштабным уровнем ландшафтной организации и исследовать варьирование тесноты связей и математического вида зависимости в пространстве. Особенно пристальное внимание исследователей в последние десятилетия привлекают эффекты взаимодействия и суперпозиции разнотипных структур, формируемых разномасштабными процессами переноса вещества, энергии, информации (Turner, Gardner, 2015). Становится актуальной проблема количественного разделения вкладов разномасштабных структур в варьирование свойств ландшафта, формализации выделения целостных геосистем. В частности, поставлен вопрос о разделении вкладов в ландшафтную дифференциацию жесткого морфолитогенного каркаса и процессов саморазвития независимых от него типов структур. Различной жесткостью межкомпонентных связей на разных участках объясняется повышенный интерес к проблемам выделения ядер типичности и переходных зон.

Выработка объективных оснований для картографирования разных типов структур направлена на экологически безопасную адаптацию видов угодий к ландшафтной структуре при территориальном планировании – одной из главных сфер практического приложения географических знаний.

Состояние проблемы.

На рубеже веков проблема иерархии и масштабов считается ключевой методологической проблемой в ландшафтоведении и ландшафтной экологии. Установлено, что для каждого процесса может быть выстроена своя иерархия и для каждого из них свой масштаб может оказаться основным (O'Neill, 1988). 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) выдвигает на первый план проблему трансляции информации между масштабами исследования (Turner et al., 2001; Cushman, McGarigal, 2002), определения характерных пространств ландшафтных процессов, масштабов восприятия человеком процессов.

Среди нерешенных проблем ландшафтоведения и ландшафтной экологии, на решение которых направлена работа, выделяются следующие.

1. Преобладают модели либо отражающие межкомпонентные отношения только на одном иерархическом уровне, либо отражающие иерархическую организацию какого-либо одного компонента или его свойства. Сути ландшафтоведения более соответствует модели иерархической организации как фактора формирования *взаимосвязанных плеяд свойств*.
2. Ошибки ландшафтного картографирования часто обусловлены слабой разработанностью подходов к количественной оценке соотношения вкладов морфолитогенной основы,

самоорганизации компонентов ландшафта и внутрифитоценотических факторов в пространственное варьирование свойств ландшафта.

3. Недостаток количественных методов оценки вклада геосистем высших масштабных уровней в варьирование свойств геосистем низших уровней не позволяет раскрыть механизмы формирования рамочных условий, накладываемых процессами высокого уровня на процессы подчиненных уровней.

4. Существующая практика игнорирования пространственного варьирования видов зависимости и тесноты межкомпонентных связей накладывает ограничения на экстраполяцию информации в целях территориального планирования.

Цель и задачи исследования.

Цель: разработка и апробация эмпирической теории полимасштабной организации ландшафта.

Задачи:

1. Обосновать конструктивность использования концепции ландшафтных плеяд.
2. Определить региональную специфику и общность межкомпонентных связей в ландшафтах; выявить информативные признаки фитоценозов для индикации строения почвенного профиля.
3. Оценить меру зависимости межкомпонентных связей от типологического разнообразия ландшафта; установить пространственные и временные рамки, в которых реализуется каждый тип отношений между свойствами компонентов.
4. Разработать алгоритм выявления масштабных уровней организации разнотипных геосистем для плеяд взаимосвязанных свойств почв и фитоценозов; обосновать репрезентативные размеры единиц полимасштабного ландшафтного картографирования.
5. Получить количественную характеристику вкладов межкомпонентных (внутриуровневых) взаимодействий и морфолитогенной основы геосистем высоких рангов (межуровневых взаимодействий) в пространственное варьирование свойств фитоценозов и почв.
6. Создать картографические модели наиболее вероятных комбинаций свойств компонентов ландшафта на основе информации о межуровневых и межкомпонентных связях.

Предмет исследования – полимасштабная и полиструктурная организация лесных и степных ландшафтов

Объекты исследования – среднетаежные ландшафты Архангельской области и Ханты-Мансийского автономного округа, южнотаежные ландшафты Костромской области, хвойно-

широколиственнолесные ландшафты Калининградской области и республики Удмуртия, низкогорно-степные ландшафты Оренбургской области.

Исходные материалы, личный вклад автора, достоверность результатов.

Полевые материалы собраны в 1994-2016 гг. лично автором или под его руководством сотрудниками МГУ (на ранних этапах – при его участии):

- при выполнении инициативных проектов Российского фонда фундаментальных исследований в качестве руководителя – 01-05-64822, 05-05-64335, 08-05-00441, 11-05-00954, 14-05-00170; в качестве исполнителя – 96-05-65495, 96-05-65730, 99-05-65097, 99-05-65069, 13-05-00821;
- при выполнении проекта PIN-MATRA по проектированию сети особо охраняемых природных территорий Костромской области (2003-2005);
- при выполнении проекта VBI-MATRA «Кологривский модельный лес» (2006-2008);
- при разработке среднесрочного плана управления национального парка «Куршская коса» (2008);
- при выполнении работ по серии договоров о сотрудничестве между географическим факультетом МГУ и государственным заповедником «Оренбургский» (2010-2016).

Автором разработана методология полимасштабного анализа структуры ландшафта, проведены расчеты (кроме отдельно оговоренных случаев) и анализ их результатов, предложена идея разработки специальных модулей программных средств (реализованных Г.М. Алешенко), проведен анализ литературных данных.

Достоверность представленных результатов обеспечивается большим количеством полевых данных (всего 1757 ландшафтных описаний: от 165 до 202 на каждом из 9 полигонов, по 100 – на двух крупномасштабных полигонах), многолетним характером наблюдений (более 20 лет на ключевом среднетаежном полигоне в Архангельской области) и статистической значимостью проведенных расчетов.

Основной методологический подход – полимасштабный анализ вертикальной (компонентной) структуры ландшафта. Его сущность заключается в следующем.

1. Межкомпонентные связи в ландшафте рассматриваются как реализация разномасштабных процессов.
2. Пространственная мозаичность ландшафта рассматривается как реализация его полиструктурной организации.
3. Природные территориальные комплексы рассматриваются как результат комбинированных эффектов взаимодействий пространственных элементов геосистем более высоких рангов.

Работа выполнена на основе методов многомерной статистики в рамках функционально-статического направления моделирования в ландшафтоведении, которое описывает механизм функционирования геосистемы через структуру связей на фиксированный момент ее развития

Методы исследования.

В основу работы положены данные ландшафтных описаний, заложенных в репрезентативных урочищах изученных ландшафтов, на ряде полигонов – по регулярной сетке. Полевые данные обрабатывались посредством статистических методов: многомерное шкалирование, метод главных компонент, мультирегрессионный, дисперсионный, дискриминантный, канонический анализ. Обработка цифровых моделей рельефа и данных многоканальной космической съемки проводилась статистическими методами в программах Fracdim и Arcview 3.2a. Для ряда полигонов проведен химический анализ почв на содержание обменных катионов, гумуса, рН стандартными методами.

Защищаемые положения.

1. Свойства компонентов ландшафта образуют серию взаимонезависимых плеяд, каждая из которых включена в самостоятельную иерархию геосистем за счет приоритетного подчинения одному из факторов пространственной дифференциации. Значения свойств плеяды варьируют в пространстве в зависимости от интенсивности действия фактора, которая контролируется соотношением вкладов межкомпонентных и межуровневых связей.

2. Теснота связей и виды зависимости между свойствами компонентов варьируют в пространстве вследствие разнообразия комбинаций пространственных элементов геосистем одного или нескольких вышестоящих рангов.

3. При смене сукцессионного статуса ландшафтов изменяются состав плеяд взаимосвязанных свойств и значимость внутрифитоценоотических и почвенно-фитоценоотических связей для пространственной вариативности свойств.

4. Наложение эффектов разномасштабных ландшафтных структур порождает геосистемы, разделенные переходными полосами варьирующей ширины и не связанные с геолого-геоморфологическими рубежами. Дискретные и континуальные границы отражаются путем картографирования меры неопределенности классификационной принадлежности.

Научная новизна работы.

1. Разработана процедура выявления межуровневых связей, позволяющая описать зависимость состояния природного комплекса от эффектов, обусловленных взаимодействием пространственных элементов геосистем более высоких масштабных уровней.

2. На основе сравнения вкладов внутриуровневых и межуровневых связей в пространственную дифференциацию лесных и степных ландшафтов установлены информативные признаки и размеры единиц ландшафтного картографирования для каждого масштабного уровня организации.

3. Установлено варьирование состава плеяд взаимосвязанных свойств в зависимости от сукцессионной стадии развития для среднетаежных, южнотаежных и хвойно-широколиственнолесных ландшафтов.

4. Выявлено пространственное варьирование тесноты связей и видов зависимости между компонентами ландшафта; предложен способ идентификации и картографирования мозаичных геосистем-геохор с единым фактором дифференциации.

5. Обоснован способ распознавания дискретных и континуальных ландшафтных границ, формирующихся в результате наложения эффектов разномасштабных структур.

Теоретическая и практическая значимость результатов.

Результаты исследования развивают концепцию полиструктурности ландшафта и обосновывают значимость полимасштабного подхода и при изучении межкомпонентных связей. Методология полимасштабного анализа применима при ландшафтном картографировании. Полученная информация о характерном пространстве межкомпонентных связей и контролирующих их процессов рассматривается как основа для адаптации ландшафтно-планировочных решений к иерархическим уровням организации ландшафта. Мера согласованности рамочных условий, накладываемые вышестоящими геосистемами нескольких рангов на свойства ландшафтной единицы, может рассматриваться как основание для оценки устойчивости типичных и редких природных комплексов для целей ландшафтного планирования. Результаты исследований применены при составлении среднесрочных планов управления для национального парка «Куршская коса», заповедника «Кологривский лес», разработке проектов «Кологривский модельный лес» и сети охраняемых природных территорий Костромской области. Результаты включены в серию отчетов по договорам о сотрудничестве между географическим факультетом МГУ и государственным заповедником «Оренбургский». Результаты исследований и методические разработки используются для курсов лекций «Пространственно-временная организация геосистем», «Ландшафтное планирование», «Актуальное ландшафтоведение», «Лесное ландшафтоведение» для студентов географического факультета МГУ. Работа выполнялась в рамках НИР кафедры физической географии и ландшафтоведения географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова: «Структура, функционирование и эволюция природных и природно-антропогенных геосистем», «Природные и антропогенные факторы устойчивости, функционирования и эволюции

геосистем локального, регионального и глобального уровней», «Функционирование, структура и эволюция ландшафтов», «Пространственно-временная организация природных и природно-антропогенных геосистем».

Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались автором в 1997–2016 гг.

- на 15 международных конференциях в том числе на VII, VIII, IX конгрессах Международной ассоциации ландшафтной экологии (IALE) (в Австралии, Нидерландах, Китае), трех европейских конференциях IALE (в Швеции, Австрии, Великобритании, региональных международных симпозиумах по ландшафтной экологии (в Словакии, Польше, Дании, Германии, Чехии), на региональной конференции Международного географического союза IGU (Москва), на ландшафтно-географических конференциях в Украине, Белоруссии, Армении.

- на 15 конференциях в России, в том числе на X и XI Ландшафтных конференциях в Москве, XI и XIII съездах Русского географического общества (Архангельск, Санкт-Петербург), на VII Степном форуме (Оренбург), на региональных географических конференциях России (Москва, Иркутск, Воронеж, г. Западная Двина, Кострома, Пермь, Тюмень).

Публикации. Результаты исследований изложены в 84 научных публикациях, в т.ч. 31 статья в изданиях, рекомендованных ВАК для представления материалов диссертационных работ, 2 статьи – в зарубежных рецензируемых журналах, индексируемых WoS, в 4 монографиях (из них 2 в соавторстве), а также публикации в прочих журналах, сборниках и материалах конференций.

Структура работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, выводов, списка используемых терминов и сокращений, списка литературы (508 наименований, в том числе 212 на иностранных языках) общим объемом 370 страниц и включает 24 таблицы, 62 рисунка.

Благодарности. Автор выражает благодарность сотрудникам, аспирантам и студентам кафедры физической географии и ландшафтоведения географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Большой вклад в сбор и обработку полевых данных в разных регионах внесли: к.г.н. А.А. Прозоров, К.А. Мерекалова, А.П. Столповский, И.П. Котлов, к.г.н. Ю.Н. Бочкарев, к.г.н. Ю.Н. Бондарь, к.б.н. А.П. Безделова, А.С. Кошечева, О.А. Артемова,

В.М. Матасов, Е.Г. Нагорная, 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 к.г.н. И.А. Авессаломовой и д.г.н. Ю.Г. Пузаченко. Автор в течение долгого времени сотрудничал с безвременно ушедшим из жизни к.т.н. Г.М. Алещенко, работы и консультации которого сделали возможными большинство расчетных процедур, рассматриваемых в книге. 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 д.г.н. К.Н. Дьяконов. Большое содействие в организации и проведении химико-аналитических исследований оказали к.г.н. М.А. Хрусталева, д.б.н. Д.В. Ладонин. Полевые исследования проводились при неизменном содействии к.г.н. Л.Г. Емельяновой, к.б.н. М.Г. Сеницына, к.б.н. А.В. Немчиновой, к.б.н. В.О. Авданина, дирекции и сотрудников государственных заповедников «Кологривский лес», «Оренбургский», национального парка «Куршская коса».

Глава 1

СОВРЕМЕННАЯ ПРОБЛЕМАТИКА ИССЛЕДОВАНИЙ СТРУКТУРЫ ЛАНДШАФТА

1.1. Разнообразие трактовок 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. Сходное понимание ландшафта свойственно нидерландской (Zonneveld, 1995), германской (Bastian, Steinhardt, 2002), словацкой (Ružička, Mišovičova, 2006), польской (Richling, Solon, 2011; Pietrzak, 2011) ландшафтным школам. 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 – ландшафтной экологии. Ландшафтная экология в Центральной Европе одними исследователями стала рассматриваться как дисциплина на пересечении экологии и географии (Žigrai, 2015), другими – 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 четкой 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 в привлечении пространственного измерения и развитием исследований на таких масштабных уровнях пространственной организации, которые сопоставимы с принятием решений в природопользовании, а не только в обычном для классической экологии локальном масштабе (Хорошев и др., 2006; Angelstam et al., 2013). Структура (pattern) понимается, прежде всего, как сочетание взаимодействующих пространственных элементов с их площадью, конфигурацией, ориентацией, соседством, связностью или фрагментированностью (Turner, Gardner, 2015), т.е. близко к русскоязычному понятию «рисунок ландшафта» (Викторов, 1986). Структура трактуется как результат, индикатор (с одной стороны) и условие (с другой стороны) радиальных и латеральных процессов. Эта трактовка оказалась особенно продуктивной 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) (Jongman, Pungetti, 2004).

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», по мнению цитируемого автора, – 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» – А.Х.], в то время как ландшафт – это природно-культурная целостность определенного масштаба (Ndubisi, 2002). Автор работы под названием «Ландшафтный подход для устойчивого развития», объясняя применение термина «ландшафт», 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 (Angelstam et al., 2013).

6. *Ландшафт как территория, воспринимаемая людьми* как результат взаимодействия природных и/или антропогенных факторов (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 предполагается и проверяется наличие разномасштабных геосистем. Термин «*геосистема*» используется для обозначения группы взаимосвязанных компонентов или территории с единым видом зависимости между компонентами, с единым способом зависимости от геосистемы вышестоящего ранга, что индицирует наличие системобразующего процесса или явления. Рассматриваются геосистемы-геохоры и геосистемы-геомеры в понимании В.Б.Сочавы (1978). Выявление размеров, конфигураций и сущностных характеристик геосистем – одна из ключевых идей работы. Термин «*ПТК (природно-территориальный комплекс)*» употребляется, когда речь идет о пространственных единицах с известными границами и известным положением с 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, 1963, 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: функциональная роль в надсистеме. Быть элементом надсистемы означает принимать участие в целостном взаимодействии всех разнородных элементов надсистемы и тем самым в той или иной мере подчинять свое поведение и организацию тому способу, который царит в надсистеме и стягивает ее части в организованную целостность (В.Н. Солнцев, 1981, с. 26). 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 процессами 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». Такое применение одного из ключевых положений общей теории систем (Садовский, 1972) дает возможность последовательного научного объяснения отношений между системным объектом, «подсистемой» и «надсистемой» (O'Neill, 1988; Николаев, 2006 б). 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 обозначено как основной предмет. Ключевые вопросы ландшафтной экологии сформулированы так: «как процессы формируют пространственную структуру и отражаются в ней» и «как пространственная структура влияет на процессы» (Forman, Godron, 1986; Forman, 2006; Pickett, Cadenasso, 2002; Moss, 1999; Farina, 1998; Turner et al., 2001; Wu, Hobbs, 2002; Хорошев и др., 2006; Kirchhoff et al., 2012). Современная тенденция к описанию и прогнозированию процессов

через пространственные структуры противоположна и дополнительна к традиции отечественного ландшафтоведения изучать процессы в качестве факторов формирования пространственной структуры («факторов 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; Turner, Gardner, 2015). 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 этой 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. В.Н. Солнцев (1981) считает, что каждый из способов взаимодействия геокомпонентов порождает собственную структуру связей, а стало быть, и систему целостную относительно этого способа взаимодействий; в одном и том же пространстве существуют разные способы взаимодействия, порождающие разные свойства одних и тех же геокомпонентных тел и значит разные геосистемы, составленные из этих компонентов (с. 97). По его мнению, необходимо различать геостационарные, геоциркуляционные и биоциркуляционные структуры (В.Н. Солнцев, 1997). Э.Г. Коломыц (1998) выделяет ячеистые, изопотенциальные, секторные и бассейновые структуры. М.Д. Гродзинский (2005, 2014) считает, что в сферу интересов ландшафтоведения входят конфигурации (структуры): генетико-морфологические, позиционно-динамические, парагенетические (Мильков, 1990), бассейновые и биоцентрично-сетевые (аналогичные основному объекту англоязычных ландшафтных экологов). Ряд исследователей считает конструктивным выделение парциальных геокомплексов (Haase, 1964; Сочава, 1978; Solon, 1999) – взаимосвязанных комбинаций свойств компонентов, сосуществующих в одном пространстве. Их структура служит одним из основных предметов данного исследования. 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 (Черкашин, 1985; Михеев, 1990). 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 как полисистему, состоящую из множества непересекающихся моносистем (Черкашин, 2005; 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, 2006 а).

4. Развитие представления о несовпадающих **характерных временах** процессов, влияющих на развитие компонентов ландшафта (Арманд, Таргульян, 1972). В связи с этим представлением накладываются ограничения на принцип всеобщей взаимосвязанности взаимообусловленности свойств компонентов. Взаимодействовать могут только те процессы, у которых близки характерные временные и пространственные масштабы (Delcourt, 1983; Пузаченко, 1986; Shugart, 1984, 1999). 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. 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. Вышестоящий уровень задает константы для системы; нижестоящий обеспечивает движущие силы функционирования (O'Neill, 1988; Пащенко, 1993; Wu, David, 2002; Cushman, McGarigal, 2002; Burnett, Blaschke, 2003; Bailey, 2005; Chang et al., 2006; Боков, 2012).

6. Внедрение **новых концепций** в науку о ландшафте: сложных адаптивных систем, самоорганизованной критичности (self-organized criticality) (Bak, Chen, 1991), иерархической патч-динамики (hierarchical patch dynamic) (Wu, David, 2002; Burnett, Blaschke, 2003).

Наблюдается переход от детерминистских равновесных моделей к представлению об экосистемах как сложных адаптивных системах (complex adaptive systems) (Levin, 1998; Moore et al., 2009; Messier, Puettmann, 2011). Концепции ранних стадий развития ландшафтоведения (Солнцев, 1948, Видина, 1962) были фактически детерминистскими. 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 (Naveh, 2010).

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 неудовлетворенность 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; Ретеюм, 1975; А.Д. Арманд, 1988; Гродзинский, 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 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, его иерархической организации, 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, 2014; Степанов, 2003; Ласточкин, 2011).

8. Развитие 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 стохастическом характере связей между компонентами. Следствием оказалось признание континуальности если не как альтернативы, то как важного дополнения к дискретным представлениям. В этом ландшафтоведение идет вслед за геоботаникой, которая с 1920-х гг. развивалась в атмосфере дискуссии о соотношении дискретности и континуальности (Савельев, 2004). Потоки вещества способны сделать даже исходно дискретные границы расплывчатыми. Некоторые 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; Forman, 2006): 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. 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

рассматриваются в числе 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; Turner, Gardner, 2015). Для нелинейных систем важной задачей считается выявление 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. Обоснование **самоподобия**, 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, Пузаченко и др., 1997; 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 главных компонент, 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 корреляционные связи. Поэтому именно появление возможности применения многомерных методов с помощью компьютерных технологий позволило снизить «размерность» ландшафта (Топчиев, 1988; Пузаченко и др., 2002; Пузаченко, 2004). 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 (Пашенко, 1993; Naveh, 2000, 2001; Петлин, 2005). 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, 2006 б; Марцинкевич, 2007). В частности в материалах последней ландшафтной конференции в Москве термины «эмерджентность» и «синергетика» почти не встречаются, за исключением статьи украинского исследователя

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 украинской (Петлін, 2005; Гродзинський, 2005) ландшафтно-экологической литературе, В рамках нашей работы особенно важны следующие вопросы. Какие свойства ландшафтной единицы обусловлены взаимодействием «равноранговых» с ней ландшафтных единиц, составляющих ее окружение и составляющих вместе с ней единицу более высокого ранга? Какие свойства компонентов возникают при совокупном воздействии нескольких факторов?

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. Из этих представлений следует постановка задачи выявления ареалов действия разномасштабных процессов как особых пространственных единиц для ландшафтного планирования.

15. Признание факта **субъективности**, роли личности исследователя в получаемых результатах, зависимости результатов от формулировки целей (Д.Л. Арманд, 1975; Дроздов, 1986). 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. Круг проблем 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; Pickett, 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 направленным (эволюция) изменениям. Результатом являются развивающиеся пространственные структуры и компонентная 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).

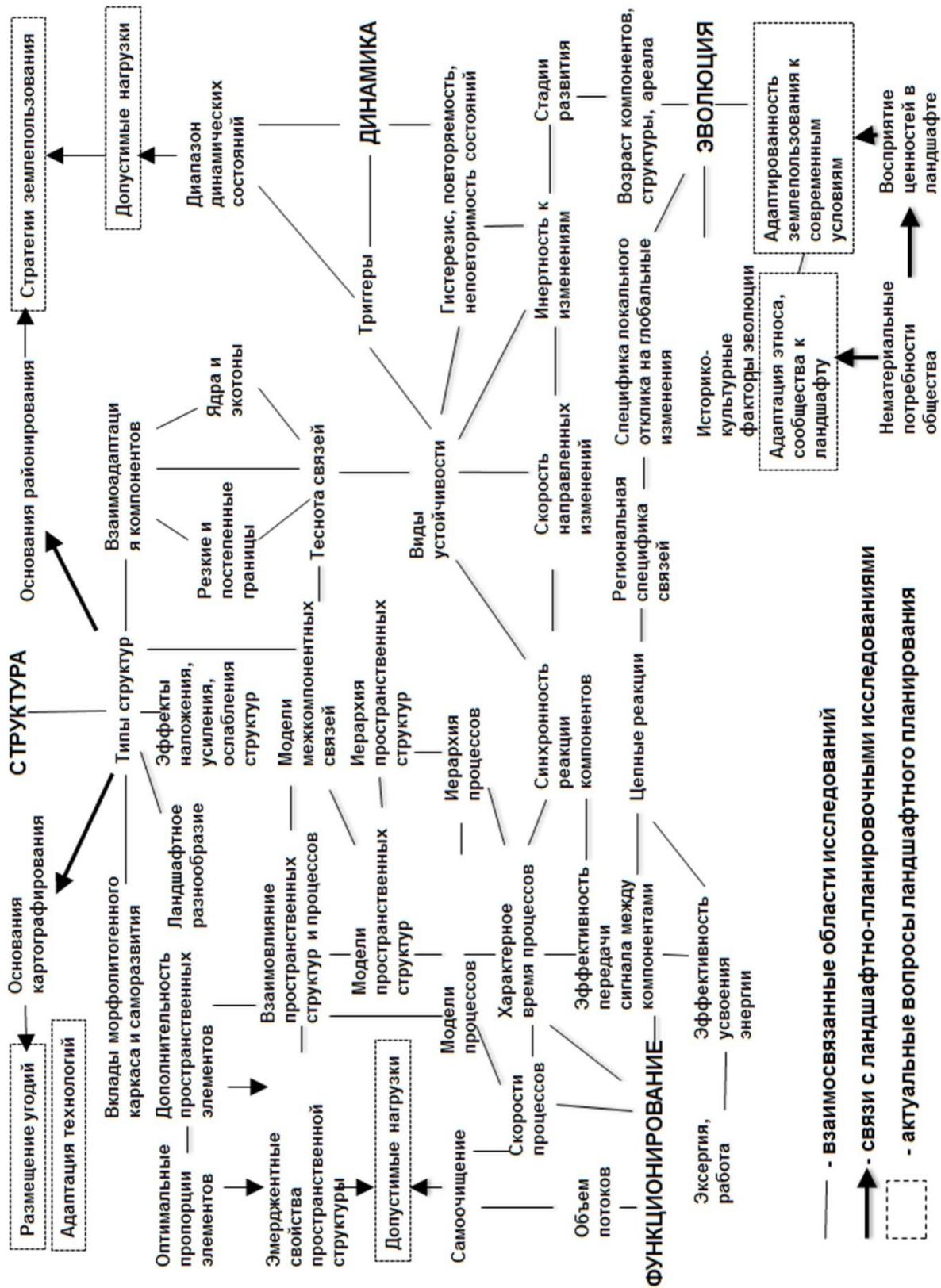


Рис. 1. Проблематика современного ландшафтоведения.

Исследования, концентрирующиеся на *структуре* ландшафта и образующие структурно-статическое направление моделирования (по А.Г. Топчиеву, 1988), в качестве

основного «продукта» производят классификацию типов структур. 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 (Миллер 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. Появление этой идеи в начале 1970-х гг., видимо, отражало общую тенденцию к исследованию полиструктурных систем в естественных науках. Об этом можно судить по рассуждениям Э.Г. Юдина (1978), который с позиций общей теории систем анализирует понятия антропогеоценоза и биогеоценоза, ссылаясь на работы В.П. Алексеева и К.М. Хайлова: «в биогеоценозе мы имеем дело с полиструктурной системой, связи внутри которой принципиально нелинейны: для ее изображения не годятся язык признаков и схема родо-видовых отношений – в дело тут вступают язык элементов и связей и схема функциональных отношений» (с. 229). Б.Г. Юдин (1986), видимо, имел в виду примерно ту же идею, когда рассматривал систему как «взаимодействие монад, т.е. некоторых относительно автономных образований, каждое из которых имеет основания своего бытия в самом себе; каждая монада специфическим только ей присущим образом воспроизводит в себе систему в целом» (с. 42). Н.Ф. Овчинников (1969) отмечал, что одни и те же элементы могут вступать в различные отношения; одним и тем же отношениям можно сопоставить различные элементы (с. 117).

Любой географический комплекс обладает бесконечным множеством «структурных срезов» и может рассматриваться по многим системообразующим отношениям (Топчиев, 1988). Эта идея просматривается в работах А.А. Крауклиса (1969: 1979), Ф.Н. Милькова (1986), Д. Харвея (1974). Геостационарные структуры В.Н. Солнцева (1997) 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. Близкий смысл заложен М.А. Глазовской (1988) в понятиях «каскадная ландшафтно-геохимическая система» и «ландшафтно-геохимическая арена». Биоциркуляционные структуры агрегируют пространство в зависимости от ориентировки по отношению к потокам солнечной энергии.

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. 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; Козловский, 1992; Russel, Jones, 2001; Николаев, 2006 б). Об 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). Выражено мнение, что ландшафтные экотоны и процесс экотонизации геопространства на разных уровнях становятся приоритетными объектами изучения современной физико-географической науки и ландшафтоведения (Бобра, 2009), а в экологии даже есть мнение о необходимости выделения нового раздела – экотональной экологии (Соловьева, 2014). Важное следствие существования ядер типичности и переходных зон (экотонов) – повышенный 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 (Grünwald, Bastian, 2015).

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 поставлен в центр внимания диссертации. 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; Vos et al., 2007; Кошечева, Хорошев, 2008; Grünwald, Bastian, 2015).

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 (Ивашутина, Николаев, 1971; Николаев, 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 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). С начала 1990-х гг. разработан огромный набор метрик, характеризующих пространственную структуру ландшафта. Они сведены в серии широко используемых в ландшафтной экологии программ, таких как SPAN (Turner, 1990), Fragstats (McGarigal, Marks, 1995), RULE и ее поздняя модификация QRULE (Gardner, Urban, 2006), EMAP-L (Cain et al., 1997). Более поздние программы расширили возможности полимасштабного анализа объектов неправильной формы

и встроены в специальные ГИС, как, например, “r.le” – в GRASS (Baker, 2001). Особенно широкое применение в ландшафтной экологии нашла программа *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 исследований 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, контролирующей не только перемещения животных, но микроклимат, потоки абиотического вещества, режим стока и т.п. (Forman, 2006). Исследование пространственной и временной некоммутативности (т.е. изменения характера процессов и свойств геосистем при перестановке их в пространстве и времени) сформулировано как задача выявления *эмерджентных свойств* структуры ландшафта (Боков, 1992; Пашенко, 1993).

Представленный в данном исследовании подход к оценке специфических эффектов, возникающих в результате взаимодействия пространственных элементов ландшафта, нацелен на решение ряда актуальных прикладных задач в рамках ландшафтного планирования, которые, на взгляд автора, относятся к «привилегиям» ландшафтоведения. К их числу относятся 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; Дьяконов, Хорошев, 2011; Хорошев, 2012 б). В.А. Боков обращает внимание на значимость для современного ландшафтоведения исследования принципа неинвариантности относительно изменения масштаба: законы природы несимметричны относительно изменения масштаба (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, восстановлением или созданием аналогичного природного комплекса в другой части ландшафта и бассейна. Тогда появляется шанс на сохранение эмерджентного эффекта,

возникающего как результат взаимодействия элементов пространственной структуры ландшафта.

Исследования, концентрирующиеся на *функционировании* ландшафта и образующие функционально-статическое направление (по А.Г. Топчиеву, 1988) концентрируются, в первую очередь на *эффективности передачи сигнала* от одного компонента ландшафта 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; А.Д. Арманд, 1975а; Абишев, 1975; Дьяконов, 1975, 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; Гродзинский, 2014). Построение таких моделей стоит рассматривать как предварительный этап анализа функционирования ландшафта. Определение характерных времен ландшафтных процессов само по себе представляет один из важнейших вопросов современного ландшафтоведения (Сысуев, 2002) и биогеографии (Тишков, 2016).

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, обуславливающие взаимосвязанное варьирование свойств и возникновение *целостных структур*. Этот вопрос и составляет ядро данного диссертационного 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. 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 экстраполяции 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., 2013 а). 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 вид зависимости между ними. 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). Давно отмечено, что плотность связей может варьировать в пространстве ландшафта (Беручашвили и др., 1989). Решение вопроса о варьировании связей в пространстве позволит определить ареал допустимого применения того или иного прогноза, основанного на оценке связей, что и предлагается в диссертационном исследовании.

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, Borgmann, 1995; Солнцева, 1998; Ryszkowski et al., 1999; Касимов, 2002; Кошелева, 2002; Хомич и др., 2004; Битюков, 2007; Линник, 2008; Авессаломова и др., 2013; Turner, Gardner, 2015; Avessalomova et al., 2016). 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. В западноевропейской и американской школах ландшафтной экологии тенденция глубокого эмпирического исследования функционирования абиотических компонентов ландшафта лишь намечается. Примерами могут быть работы о влиянии пространственной структуры на объемы переноса вещества с внутрисочвенным и поверхностным стоком (Wickham et al., 2003), о пространственно-временной динамике физико-химических свойств ландшафта, которая отражает состояние гидрологических факторов в бассейне (Stottlemyer et al., 1998; Malard et al., 2000). Более глубокие корни изучение вертикальных взаимосвязей, переноса вещества имеет центрально-восточноевропейская ландшафтная экология. Она богата примерами исследований (Opp, 1991; Klimo et al., 1996; Sugier, Czarnecka, 1998; Ryszkowski et al., 1999; Banaszuk et al., 2000; Röder, Syrbe, 2000; Wicik, 2001; Ratas et al., 2003), которые опираются на ландшафтно-геохимические концепции (Глазовская, 1988; Перельман, Касимов, 1999). Важное 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) подробно 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, 2014; 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 диссертационное исследование можно отнести к *функционально-статическому направлению моделирования*, которое, по А.В. Топчиеву (1988), «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* (по А.Г. Топчиеву, 1988) концентрируются на выявлении диапазона естественных колебаний структуры в пределах инварианта и определении механизмов появления направленных изменений. Ключевое место занимает исследование скоростей развития структуры ландшафта (Беручашвили, 1990; Мамай и др., 2013 б; 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* направлены на решение проблемы *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 десятилетия 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), о невозвращении к исходному состоянию после устранения внешнего воздействия (Коновалова, 2012). 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*. Сравнение разновозрастных структур лежит в основе структурно-динамического направления моделирования геосистем (Топчиев, 1988).

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. В англоязычной ландшафтной экологии эта тема стала одной из приоритетных в последние два десятилетия (Reid et al., 2000; European landscapes..., 2009; Grunewald, Scheithauer, 2011; Turner, Gardner, 2015). Приводятся примеры влияния разномасштабных климатических эффектов на динамику лесных экосистем (Shugart et al., 1988; Rupp et al., 2000; Grunewald, Scheithauer, 2011). Эволюционные изменения ландшафта нельзя сводить исключительно к результатам действия природных механизмов. Механизмы действия историко-этнокультурных 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 (Г.А. Исаченко, 1998; Калуцков, 2008; Низовцев, 2013; Дирин, 2014; Трапезникова, 2014). Адаптация хозяйственной деятельности к ландшафту и антропогенная трансформация структуры ландшафта находится в тесной связи не только с материальными возможностями и социально-экономической ситуацией, но и с нематериальными потребностями человека. Растущий интерес к перцепции ландшафта 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, 2014; O'ahel' 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; O'ahel' 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. Структурное направление ландшафтоведения

После краткой характеристики современных приоритетных тем ландшафтоведения представим более детально актуальную для нашей работы проблематику структурного направления или, точнее – функционально-статического направления моделирования в ландшафтоведении (Хорошев, 2016 а). На рис. 2 показаны связи между наиболее малоизученными вопросами структурного направления и положение приоритетных проблем, разрабатываемых в нашем исследовании (выделены шрифтом).

В современной науке ландшафт рассматривается как система, относящаяся к категории сложных. Среди основных их признаков называют разнообразие пространственных структур и процессов, нелинейные взаимодействия компонентов и пространственную 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; Cushman et al., 2012; Turner, Gardner, 2015).

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 напомнить, 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, подобными 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 (Zonneveld, 1989, 1995; Klijn, de Haes, 1994), Канаде (Rowe, 1996), США (Bailey, 2005).

В представлении 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; Gardner et al., 2007). Термин «вертикальная структура», в отличие от русского термина, подразумевает отношения между смежными иерархическими уровнями природных систем (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 (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 сомнению с 1970-х гг. (Ретеюм, 1975). 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. 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 ландшафта, которые не зависят от МЛО и определяются саморазвитием.

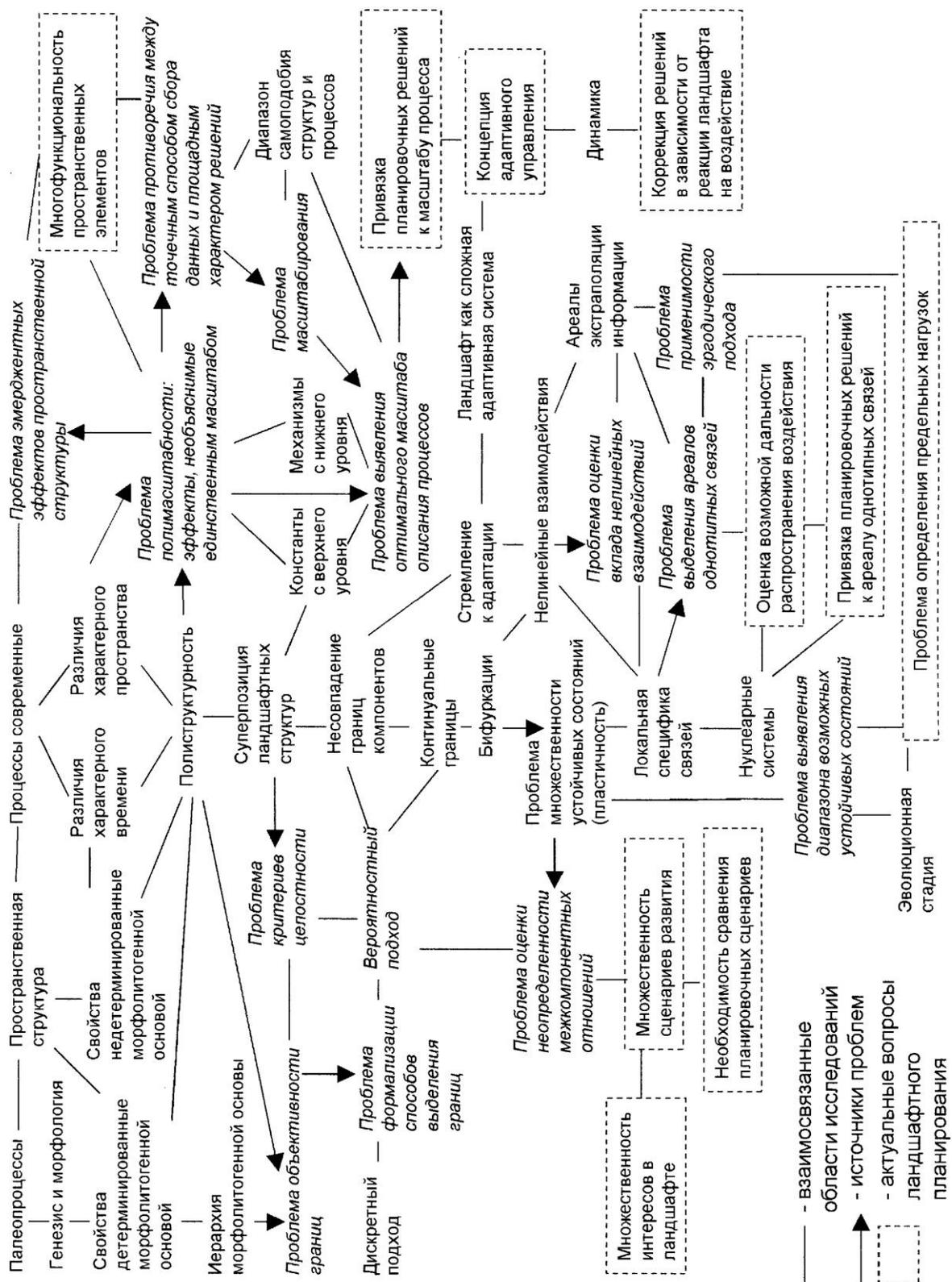


Рис. 2. Проблематика структурного направления ландшафтоведения. Курсивом выделены проблемы, освещаемые в работе.

Автор развивает *статистический подход* к решению проблемы объективности ландшафтных границ (раздел 4.8). Он позволяет на основе анализа межкомпонентных связей рассчитать вероятность принадлежности каждой пространственной единицы к тому или иному классу и показать на карте степень неопределенности классификационной принадлежности (НКП) (Хорошев и др., 2002; 2010). 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 диссертационном исследовании), 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, 1972; O'Neill, 1988; Пашенко, 1993; Wu et al., 2000; Сысуев, 2002). Отсюда вытекает неизбежно представление о полиструктурности ландшафта. В исследовании этого явления автор, следуя за В.М. Пашенко (1993) и 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, возникающих как результат взаимодействия пространственных элементов ландшафта*. В русскоязычном ландшафтоведении увлечение идеологизированной критикой «геттнерианства» привело к тому, что «вместе с водой выплеснули ребенка» (Максимов, 1988; Дронин, 1999; Голубчик и др., 1998; Богучарсков, 2006) и методы пространственного анализа долгое время почти не развивались, хотя приоритетное значение всегда придавалось разработке методов ландшафтного картографирования. Наиболее разработана проблема взаимодействия пространственных единиц в геохимии ландшафта благодаря эффективному применению концепций катены, каскадной ландшафтно-геохимической системы, арены, геохимического

барьера для выявления зон аккумуляции и рассеяния химических элементов, скоростей их миграции (Глазовская, 1964, 1988; Перельман, Касимов, 1999; Касимов, 2002). В англоязычной ландшафтной экологии 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 *трансляции информации из одного масштаба в другой* разработаны пока слабо (Turner, Gardner, 2015). Поиск подходов к решению проблемы трансляции информации между уровнями организации 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 в связи с этим – определение диапазона иерархических уровней, в пределах которого наблюдается самоподобие процессов, связывающих компоненты между собой. Диапазон масштабов, в котором соблюдается степенная зависимость, соответствует диапазону самоподобия явления (Wu et al., 2000). 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 стадий 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) масштабного 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 в случае постепенного перехода границу задает чисто технологическое ограничение. Легко представить, что для пахоты и внесения удобрений важен гранулометрический 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 границу по линии, где мощность плаща достигает именно 30 см. При распашке более мощного песчаного плаща 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 такого рода *критических порогов*, важных для ландшафтного планирования в широких экотонных полосах представляет собой одну из интересных прикладных задач ландшафтоведения (Хорошев, 2014 а).

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. В.М. Пашенко (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 (Пашенко, 1993, с. 55). Малоизученными остаются *свойства ландшафта как сложной адаптивной системы* (Naveh, 2010). 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 концепция 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 взаимоадаптацией 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 сочетаниями событий. Близка по смыслу проблема *бифуркации* – равновероятностного «выбора» геосистемой одного из устойчивых состояний или хаотического состояния после прохождения (во времени) критической «точки» (O'Neill, 1988; Пузаченко, 1998; Naveh, 2000). Принципиальная непрогнозируемость траектории развития до точки бифуркации (Пузаченко, 1998) ставит перед ландшафтоведением проблему выявления *диапазона возможных устойчивых состояний*.

В центре внимания науки о ландшафте сейчас находятся *нелинейные взаимодействия* (Ludwig et al., 1999; Пузаченко, 1998; Naveh, 2000; Wu, Hobbs, 2002; Чупрынин, 2003; Черванев и др., 2004). Разделение вкладов линейных и нелинейных взаимодействий в ландшафтоведении позволила бы находить в пространстве гетерогенного ландшафта *ареалы действия однотипных связей*. В более общем смысле выявление ареала действия связи рассматривается как подход к решению проблемы локальной специфики связей в разных секторах 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 единого вида зависимости 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 мегатрофных 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 предлагаемые способы выявления ареала действия связей рассматриваются в разделе 4.6. 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, 2006 б) 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 при наличии линейных связей можно прогнозировать изменения в ландшафте (например, биопродуктивности) при гипотетических антропогенных нагрузках (например, при осушительных мелиорациях).

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: Мересте, 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. В данном диссертационном исследовании речь идет в основном о связях-отношениях. 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, Vormann, 1995; Битюков, 2007), в геохимии ландшафта – самоочищения почв (Солнцева, 1982; Глазовская, Пиковский, 1985; Снакин и др., 1997). Соотношение между величиной воздействия и реакцией системы может быть самым разным и зависит от структуры системы, что обуславливает 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 обуславливать «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 то время как в отечественной школе физической географии роль рельефа в ландшафтной дифференциации всегда была на первом плане, в англоязычной ландшафтно-экологической литературе роли рельефа до сих пор уделяется недостаточное внимание. Причины видятся в преобладании двухмерного мышления в рамках 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 (Hoechstetter et al., 2008; Bailey 2004; Sebastiá, 2004; Bastian et al., 2015). 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; Drăguț et al., 2010). 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). 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), экспансии древесной растительности в субальпийские луга (Zald et al., 2012). 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 фитоценологических 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. 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. В России, как известно, московская

школа ландшафтоведения 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-фитоценологических, морфолитогенно-фитоценологических и внутрифитоценологических 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 данном диссертационном исследовании, 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 *k*-средних (*fuzzy k-means*) для определения точности попадания в класс предсказанных по рельефу и реально наблюдавшихся классов растительности (Burrough et al., 2001). Мера членства (*membership*) рассчитывается на основе дистанции точки от центра класса. Для отражения на карте резких и постепенных переходов между классами разработан коэффициент, представляющий отношение первой по значимости меры членства в классе 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.

$$H = 1/N \sum_{i=1}^N \sum_{c=1}^K -\mu_{ic} \ln(\mu_{ic}),$$

где μ_{ic} – мера членства (*membeship*) i -го объекта в c -м классе

Задача, решаемая авторами цитируемой работы, – выделение «экологически значимых» классов рельефа, которые находят отклик у растительного покрова. Сходную меру неопределенности классификационной принадлежности (НКП) предложил автор диссертационного исследования (Хорошев и др., 2002). Задача находится в контексте решения проблемы оценки неопределенности ландшафтных границ. С точки зрения динамики и эволюции высокая неопределенность может означать высокую вероятность направленных изменений 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 потребуются разработка междисциплинарного «языка» (Tress et al., 2004). Т.В. Бобра (2005) для выделения переходных зон между ландшафтными комплексами использует информационную меру. Идеологически сходный подход, основанный на картографировании вероятности принадлежности к классу, использован А.Н. Кренке с соавторами (Кренке и др., 2011). Для объяснения варьирования индекса NDVI в тундре Северной Америки рассчитаны частоты и вероятности встречаемости того или иного класса растительности при данном сочетании значений уклона и стока, рассчитанного через площадь водосбора по ЦМР (Ostendorf, Reynolds, 1998). Авторский подход (Хорошев, 2005 б) описан в разделах 3.9, 4.8).

Применение логики нечетких множеств (*fuzzy logic*) является попыткой науки о ландшафте 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 байесовский 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; Langford et al., 2006; Musio et al., 2007, Cullinan et al., 1997; Hooten et al., 2003; Milns et al., 2010; Lechner et al., 2012; Witte et al., 2015).

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). Параллельно поставлен вопрос и о варьировании связей во времени. Распространено мнение, что по мере развития экосистемы связность ее элементов возрастает, специализация по

экологическим нишам сужается (Müller, 2005; Jorgensen et al., 2007). Этому вопросу уделяется внимание в разделе 4.7 данного исследования. Осознание неодинаковой связанности компонентов в пространстве и времени приводит к использованию критерия связи в практических целях. Вертикальные топологические отношения между компонентами положены в основу серии иерархических моделей пространственной организации экосистем, которые используются 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).

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

1. Связи между компонентами ландшафта не являются абсолютно жесткими; для их описания адекватны статистические методы.

2. Связи-отношения установленные статистическими методами, могут быть индикаторами реальных взаимодействий компонентов посредством вещественно-энергетического обмена, который возможен только при условии близости характерных времен и/или характерных пространств.

3. Вид и знак зависимости между компонентами ландшафта может варьировать в пространстве, поэтому необходимо устанавливать в каждом конкретном случае ареал реализации той или иной связи.

4. Для определения природы взаимосоответствий между компонентами ландшафта необходим полимасштабный анализ ландшафтоформирующих процессов.

5. Степень взаимоадаптированности компонентов может зависеть от стадии развития ландшафта.

6. Исследование связей в такой сложной системе как ландшафт 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 диссертации, выделяются:

1) доля пространственного варьирования свойств компонентов, жестко определяемая морфолитоогенной основой;

2) способы выявления рамочных условий, налагаемых на ландшафт системой более высокого иерархического уровня;

3) вклад самоорганизации биотических и биокосных компонентов ландшафта, внутривитоценологических 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). Т. Allen и Т. Startt (1982) заложили основы применения теории иерархии на основе общей теории систем и спровоцировали огромную дискуссию в экологии. Р. Delcourt (1983) впервые графически показал корреляцию между пространственными и временными масштабами на примере палеоэкологических данных по динамике растительного покрова. Р. О'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 (О'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 (О'Neill, 1988).

Выделяются следующие важнейшие следствия полимасштабности ландшафта (Wu 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.

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; Николаев, 2006 б; 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. 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 – привнесом минеральных веществ во время половодья (эффект уровня бассейна), с третьей – перераспределением вещества гравитационными процессами или животными между повышенными и пониженными фациями пойменного урочища. 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; Naila, 2002; Perry, Enright, 2002; Hall et al., 2004; McMahon et al., 2004; King 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; Wu, David, 2000). В первых же публикациях были указаны типичные ошибки трансляции информации между масштабами: макроотношения выводятся из микроотношений, выводы с макромасштаба переносятся на микромасштаб; перенос закономерностей одной популяции на другую внутри уровня (Meentemeyer, 1989). Выделена проблема перехода от точечных данных об интенсивности процесса к континуальному представлению структуры ландшафта (Линник, 2008; Etherington, Perry, 2012).

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 (Haining, 2003). 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. Одним из первых эту проблему поднял В.Н. Солнцев, сформулировавший принцип иерархической полноты геокомпонентного анализа: природное взаимодействие может быть полностью раскрыто только при изучении процессов, характеризующих наборы взаимодействующих компонентов разных и многих уровней масштабной организации земной природы (В.Н. Солнцев, 1981). Для симметричного объяснения геометрии ландшафта необходимо рассмотрение сначала строго одноуровневого (т.е. масштабно сопоставимого) действия и взаимодействия силовых полей, определяющего ландшафтную организацию, а затем

(в соответствии с принципом суперпозиции) многоуровневого (т.е. иерархического) взаимодействия полей (В.Н. Солнцев, 1981, с. 173). 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 зависимости 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 (Wilcox et al., 2003), структуры лесной покрова под воздействием ураганов в зависимости от рельефа и климата (Boutet, Weishampel, 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 *масштабных уровней*, которые позволяют описать динамику системы в целом (Haila, 2002; Chang et al., 2006; Turner, Gardner, 2015). 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 основании наблюдений для уровня локальной экосистемы, применяются модели экосистемных процессов CENTURY и PALS, позволяющие

отобрать значимые переменные для трансляции информации на более высокие уровни локального ландшафта и регионального ландшафта. Локальный ландшафт характеризуется как функция его состава (непространственные переменные) и конфигурации (пространственные переменные). Для каждого процесса выявляются один или несколько основных масштабных уровней. Модель изменений землепользования использует методы Марковских цепей и клеточного автомата. В результате вероятность перехода одного типа землепользования в другой авторы, описывают моделью:

$$P_{change}=F(\text{local rules, domains of influence, ownership}), \text{ где}$$

P_{change} – вероятность перехода, аргументы функции – соответственно, локальные эффекты соседства, область влияния урбанизации, форма собственности как разномасштабные факторы (Wu, David, 2002).

Канадскими исследователями 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 (Нану 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 объекто-специфичного 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 высоком 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 пикселем 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, 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. Плавное снижение вейвлет-дисперсий без скачков по мере увеличения масштаба, не подтвердило *гипотезу 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. 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, Petera, 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 (*nested*) 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. Необходима разработка методов *разделения вкладов разномасштабных процессов* в варьирование исследуемой

характеристики ландшафта (Borcard, Legendre, 1994, 2002; Cushman, McGarigal, 2002; Jin Yao et al., 2006; Dahlin et al., 2014). 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 среднимасштабными 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 регрессионным 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, контролируемые 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, Weishampel, 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. Это 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 (в русскоязычной терминологии – вклада вертикальных межкомпонентных связей) 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 байесовского 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). Определено универсальное критическое значение (*threshold*) 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; Strayer et al., 2003; Wamelink et al., 2003; Waldhardt et al., 2004; Vos et al., 2007; Wickham et al., 2007; Walz, 2011; Angelstam et al., 2013; Bastian et al., 2015). 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; Ludwig, 2007). 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 зависимостей может различаться при разных масштабах.

5) По скачкам дисперсии 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 (Хорошев, 2013), 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, Wu, David, 2002; Lookingbill, Urban, 2004; Коломыц, 2008; Vasques et al., 2012 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; Feranec, Otahel, 2001; Fuhlendorf et al., 2002). По выявленным пространственным структурам разных уровней делаются выводы о природе сформировавших их процессов и связанных с ними свойствами других компонентов. Признание полиструктурности означает, что значимые для свойства ОТЕ процессы во вмещающих геосистемах могут иметь разную природу; поэтому вмещающие геосистемы необязательно вложены друг в друга как части матрешки. По этой причине для обозначения их неодинаковых размеров автор использует термин «масштабный уровень», а не «иерархический уровень».

Масштабный уровень геосистемы понимается как размер пространства, в котором набор и взаиморасположение пространственных элементов контролируют современный процесс или индицируют палеопроцесс, сила которого варьирует в пространстве и задает правило дифференциации значений свойств ландшафтных компонентов. Любое изменение набора и взаиморасположения пространственных элементов приводит к изменению свойств элемента геосистемы, расположенного в ее центре.

Мы предлагаем способы определения масштабных уровней геосистем, задающих для своих пространственных элементов правила варьирования свойств *не одного компонента, а их взаимосвязанных пляд*, что более соответствует традиционным задачам ландшафтоведения. Это позволяет выявить основания для определения информативных критериев ландшафтного картографирования на разных масштабных уровнях организации геосистем.

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

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 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; Turner, Gardner, 2015). В русскоязычном ландшафтоведении хронологический аспект на протяжении нескольких десятилетий оставался на периферии внимания исследователей, за исключением геохимии ландшафта. Автор предлагает модель межкомпонентных отношений именно исходя из *анализа влияния группы соседних геосистем*, в совокупности образующих вмещающую геосистему более высокого ранга со специфическими свойствами, которые не могут возникнуть в каждой геосистеме по отдельности.

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 и выявления характерного пространства реализации межкомпонентных отношений на основе количественной оценки тесноты связей.

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 зависимостей того или иного вида, выявлять локализацию в пространстве ареалов с разными типами отношений между компонентами, учитывать специфику отношений на разных этапах развития геосистемы. В данной работе мы предлагаем *способ идентификации и картографирования целостных мозаичных геосистем с единым фактором дифференциации* на

основе концепции полиструктурности ландшафта. Хотя концепция полиструктурности ландшафта получила довольно широкое признание, примеры картографирования на ее основе единичны (Гродзинский, 2005; Хорошев, 2005 б; В.Н. Солнцев и др., 2006). Автор разделяет мнение М.Д. Гродзинского (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 статистический подход к решению *проблемы объективности ландшафтных границ*. Знание о характерном пространстве ландшафтообразующих процессов рассматривается как основа для адаптации ландшафтно-планировочных решений к иерархическим уровням организации ландшафта.

В таблице 1 перечень актуальных проблем науки о ландшафте сопоставлен с задачами работы и подходами 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
Экстремальная многомерность ландшафта	Без снижения размерности формальными методами возникает проблема субъективности при отборе значимых признаков для классификации и картографирования геосистем.	Обосновать конструктивность использования концепции ландшафтных плеяд (№ 1).	Многомерное шкалирование с выделением латентных переменных, отражающих согласованное варьирование в пространстве групп исходных признаков.	4.1.
Проблема региональной специфики межкомпонентных отношений	Межкомпонентные отношения рассматриваются как пространственно-инвариантные.	Определить региональную специфику и общность межкомпонентных связей в ландшафтах; выявить информативные признаки фитоценозов для индикации строения почвенного профиля (№ 2).	Сравнение статистических моделей связей для ряда регионов, различных по зональной принадлежности и геолого-геоморфологическим условиям.	4.2.

Проблема в науке о ландшафте	Суть проблемы	Задача работы	Подход к решению задачи	Глава
Проблема меняющейся пространственной единицы (МАУР)	Результаты оценок межкомпонентных связей варьируют в зависимости от размера выбранной операционной единицы, количества наблюдений, территориального охвата.	Оценить меру зависимости межкомпонентных связей от типологического разнообразия ландшафта (№ 3).	Сравнение результатов количественной оценки тесноты межкомпонентных связей при варьировании размера операционной территориальной единицы и территориального охвата.	4.3.
Проблема эффектов взаимодействия пространственных элементов ландшафта. Проблема трансляции информации между масштабными уровнями	Большинство разрабатываемых пространственных моделей исходят из допущения, что состояние операционной территориальной единицы не зависит от соседних единиц. Примеры картографирования на основе концепции полиструктурности единичны.	Разработать алгоритм выявления масштабных уровней организации разнотипных геосистем для плеяд взаимосвязанных свойств почв и фитоценозов; обосновать репрезентативные размеры единиц полимасштабного ландшафтного картографирования (№ 4).	Статистическое моделирование зависимости свойств операционной территориальной единицы от характеристик пространственной структуры геосистем более высоких рангов.	4.4.
Проблема разделения вкладов факторов в ландшафтную дифференциацию	Слабо разработаны методы количественной оценки вкладов разномасштабных процессов в пространственную дифференциацию.	Получить количественную характеристику вкладов межкомпонентных (внутриуровневых) взаимодействий и морфолитогенной основы геосистем высоких рангов (межуровневых взаимодействий) в пространственное варьирование свойств фитоценозов и почв (№ 5).	Сравнительная оценка вкладов внутриуровневых межкомпонентных отношений и межуровневых отношений в дисперсию значений свойства.	4.5.

Проблема в науке о ландшафте	Суть проблемы	Задача работы	Подход к решению задачи	Глава
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 пространственные рамки, в которых реализуется каждый тип отношений между компонентами (№ 3).	Индуктивный способ идентификации и картографирования целостных мозаичных геосистем с единым фактором дифференциации.	4.6.
Проблема изменчивости межкомпонентных связей во времени	Возможности ландшафтной индикации и прогноза ограничены из-за слабой изученности вопроса об изменениях тесноты межкомпонентных связей во времени.	Установить временные рамки, в которых реализуется каждый тип отношений между компонентами (№ 3).	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 несопадением результатов ландшафтного картографирования разных исследователей для одной территории.	Создать картографические модели наиболее вероятных комбинаций свойств компонентов ландшафта на основе информации о межуровневых и межкомпонентных связях (№ 6).	Картографирование вероятности существования классов парциальных ландшафтных структур для конкретных местоположений и оценка неопределенности классификационной принадлежности.	4.8

Глава 2

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИХ ПОДГОТОВКИ К АНАЛИЗУ

2.1. 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) (таблица 2, рис. 3, 4).

Таблица 2. Площади полигонов исследования и количество описаний

Полигон исследования	Расположение	Площадь, км ²	Количество описаний		
Среднетаежный	Архангельская область	200	185		
Заячья					
Трансект				184	
Медвежий				10	184
Козловка				2	100
Становская балка	1	100			
Среднетаежный	Ханты-Мансийский округ	12	201		
Южнотаежный	Костромская область	60211	165		
	Кологривский район	270	165		
Хвойно-широколиственно-лесной	Республика Удмуртия	200	171		
Хвойно-широколиственно-лесной	Куршская коса	66	100		
Степной Айтутарский	Оренбургская область	64	202		
ВСЕГО			1757		

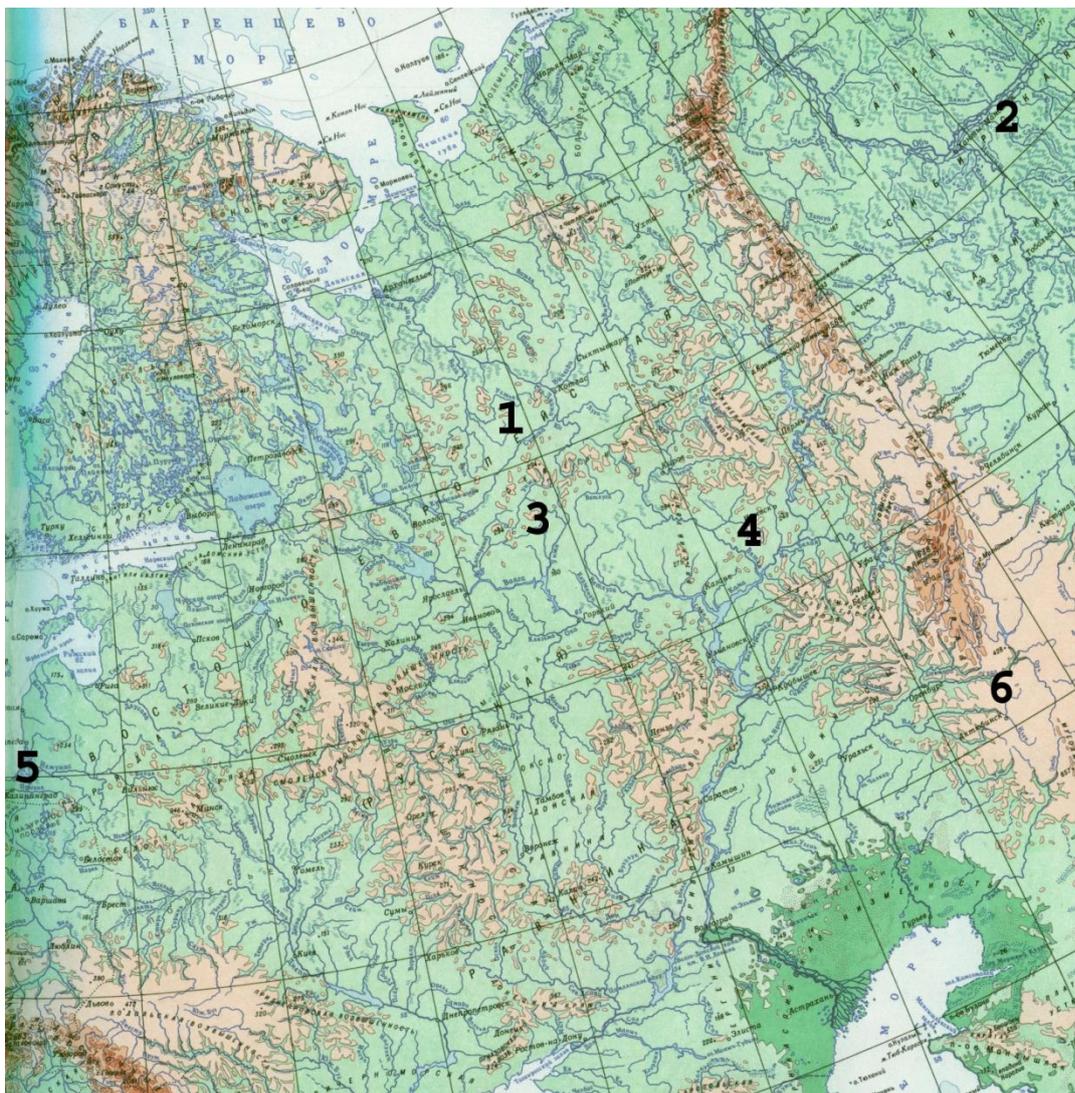


Рис. 3. Расположение полигонов исследования. 1 – среднетаежный ландшафт в Устьянском районе Архангельской области (полигоны «Заячья», «Трансект», «Козловка», «Становская балка», «Медвежий»), 2 – среднетаежный ландшафт в Ханты-Мансийском автономном округе (Обский полигон), 3 – южнотаежные ландшафты в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

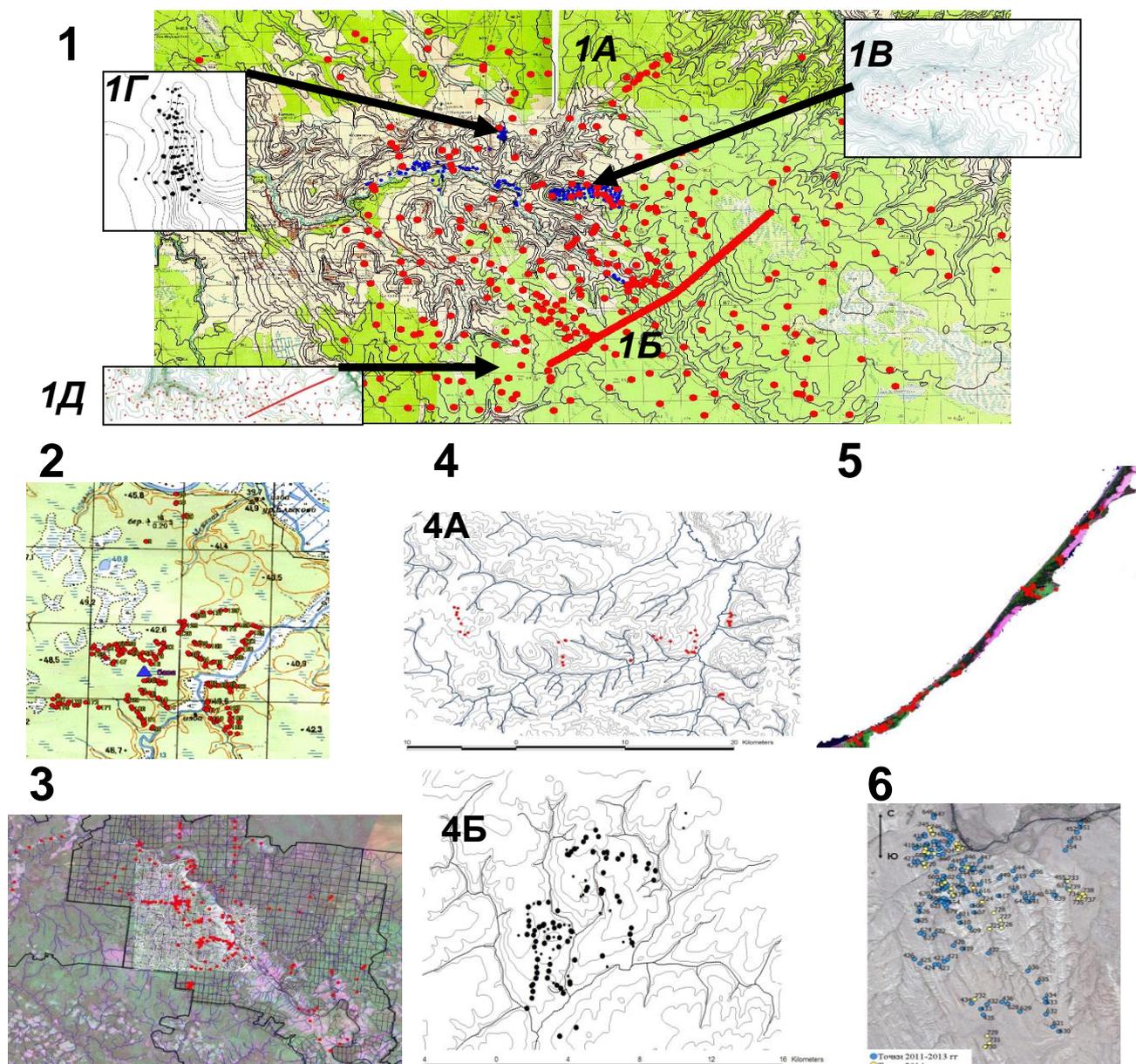


Рис. 4. Карты фактического материала. 1 – среднетаежный ландшафт в Устьянском районе Архангельской области (полигоны «Заячья» (1А), «Трансект» (1Б), «Козловка» (1В), «Становская балка» (1Г), «Медвежий» (1Д), 2 – среднетаежный ландшафт в Ханты-Мансийском автономном округе (Обский полигон), 3 – южнотаежный ландшафт в Кологривском районе Костромской области, 4 – хвойно-широколиственнолесной ландшафт в Кизнерском (4А) и Можгинском (4Б) районах Удмуртии, 5 – хвойно-широколиственнолесной ландшафт в Зеленоградском районе Калининградской области (национальный парк «Куришская коса»), 6 – типичностепной ландшафт в Кувандыкском районе Оренбургской области (заповедник «Оренбургский», участок «Айтуарская степь»).

Общим для трех основных полигонов – в Устьянском районе Архангельской области, Кологривском районе Костромской области, в Кизнерском и Можгинском районах республики

Удмуртия – является наличием глубокорасчлененного рельефа, близость коренных карбонатных пород и выходы их на поверхность в речных долинах, наличие чехла двучленных 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 – лёссовидных (Хорошев, 2005 а, 2007), а на пластовых равнинах Удмуртии – древнеаллювиальных и покровных лёссовидных (Хорошев, 2010). 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 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, 2003). 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 современной эрозии с самоорганизацией гидрографической сети для ландшафтной дифференциации.

Количество полевых описаний составляет в среднем 185 в каждом регионе (таблица 2) и охватывает пропорционально занимаемой площади водораздельные, придолинные, склоновые позиции и днища долин. Для исследования влияния ландшафтного разнообразия на плотность межкомпонентных связей дополнительно 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 (рис. 4, 1А-1Д). 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),

урочищный – полигоном «Медвежий» (9,5 км², 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 км², 100 точек по почти регулярной сетке, из которых 81 точка расположена в пределах двух урочищ, отличающихся только смежными градациями дренированности). Проведено также крупномасштабное исследование на фациальном уровне в балочном урочище (полигон «Становская балка»), обеспеченном 100 описаниями по почти регулярной сетке.

2.1.1. Среднетаежный полигон:

Архангельская область, бассейн р. Заячья

Среднетаежный полигон в Устьянском районе Архангельской области изучается сотрудниками географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова с 1994 г., что позволило составить подробную комплексную физико-географическую характеристику, снабженную серией ландшафтных и тематических карт (Хорошев, 2005а, 2016б; Хорошев и др., 2013а; Khoroshev, Merekalova, 2006; Avessalomova et al., 2016; Авессаломова, 1997, 2003; Пузаченко и др., 1997, 1998; Дьяконов, Пузаченко, 1997, 2000; Мяло и др., 1998; Емельянова и др., 1999, 2001; Прозоров, 2003; Горбунова, Гаврилова, 2002; Абрамова, 2002; Флора и фауна..., 2003; Беляков, 2004; Мерекалова, 2006; Безделова, 2008; Горяинова и др., 2012; Никитина и др., 2016). 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 почвообразующей 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) наличие системы разрывных нарушений разного иерархического ранга, обуславливающих неравномерную дренированность территории;
- 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. 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. Междуречье Устья и Кокшеньги характеризуется малой мощностью (преимущественно 10–20 м) четвертичных отложений, представленных моренными валунными карбонатными суглинками московского времени с чехлом озёрно-ледниковых отложений позднемосковского времени.

Рисунок гидрографической сети, характерный для Устья, с преобладанием линеаментов северо-западного и северо-восточного простираний повторяется для пространств более низкого порядка (Хорошев, 2003). Главные каналы стока в пределах полигона исследования Кокшеньга, Заячья и Соденьга (притоки, соответственно, Кокшеньги и Устья) 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. 5, А, Б).

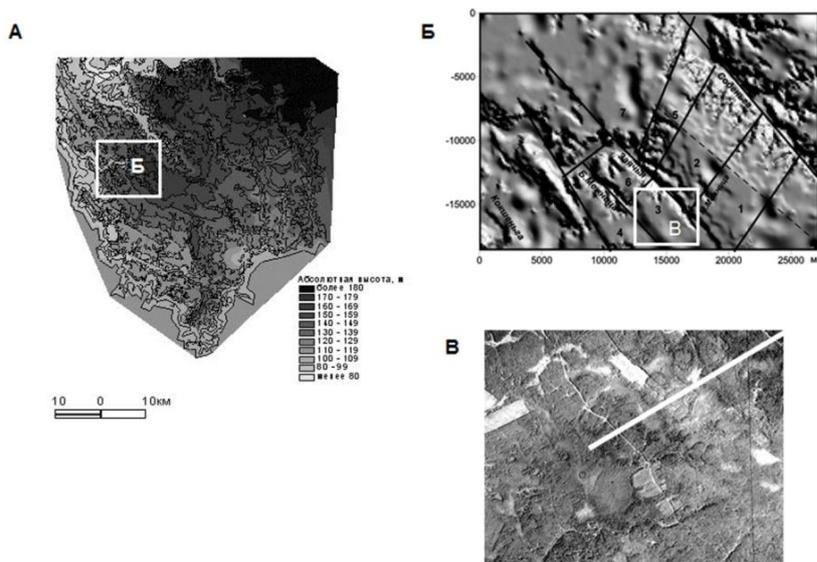


Рис. 5. Положение среднетаежного полигона в Устьянском районе Архангельской области. А – южная часть Устьянского плато, цифровая модель рельефа, масштаб 1 : 200000. Б – полигон «Заячья», цифровая модель рельефа, масштаб 1 : 50000; линиями показаны основные разрывные нарушения, цифрами – номера неотектонических блоков (Хорошев, 2003). В – полигоны «Трансект» (юго-западная часть, белая линия) и «Медвежий», аэрофотоснимок.

В пределах полигона исследования три высотных уровня (на высотах 160–170, 145–150 и 120–125 м) разделены короткими пологими и покатыми склонами, маркирующими полосу разрывных нарушений. В результате создаётся ступенчатый блоковый рельеф (Хорошев, 2003). Перепад высот кровли коренных верхнепермских отложений сухонского яруса составляет около 80 м на широтном отрезке протяжённостью 15 км.

Междуречья Соденьга-Заячья и Заячья-Пукома отличаются 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 её на всех участках согласуется с одним из двух основных направлений разрывных нарушений – северо-западным или северо-восточным.

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 слабоогнутых 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).

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 (до 600 мг/л) и жёсткость (до 8 мг-экв/л) (Хорошев, 2005а; Avessalomova et al., 2016).

Второй этап формирования литогенной основы связан с плейстоценом и в 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.

При отступании московского ледника территория заливалась водами приледниковых подпрудных озёр, что привело к переработке поверхностного слоя морены в мелководных условиях 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; Гагарина, 1994; Тонконогов, 2010). 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. 6). За счёт вымывания 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, обуславливает возникновение верховодки, контактного оглеения, контактного оподзоливания, образования ортштейнового горизонта на кислородном барьере. По выражению В.Д. Тонконогова (2010, с. 163), «двучленные отложения с разной глубиной залегания нижнего компонента являются своего рода «природным мостиком», обеспечивающим непрерывность генетического ряда между альфегумусовыми подзолами и текстурно-дифференцированными почвами». Фоновые почвы определены как подзолистые с вложенным субпрофилем альфегумусового подзола (Горбунова, Гаврилова, 2002) или подзолы литобарьерные глинисто-иллювиированные (Никитина и др., 2016). Уровень верховодки и её химические свойства колеблются по годам и сезонам с тенденцией к подщелачиванию в сухие годы и подкислению – во влажные. 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

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 Устьянско-Кокшеньгского плато (Квасов, 1975). Мнения о положении уровня Сухонского приледникового озера 21–15 тыс. л.н. расходятся от 145 до 150–169 м. 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 (полигон «Медвежий») резко выделяется маломощностью песчано-супесчаного плаща (15–20 см), что может объясняться положением этого уровня в зоне абразии и преимущественного сноса легкого по гранулометрическому 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 чернично-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 борových местообитаний с преобладанием сосновых бруснично-зеленомошных и лишайниковых лесов, высокой встречаемостью можжевельника, вереска, плаунов. \ Территория полигона расположена на границе двух ландшафтов, обособление которых связано с различиями в генезисе, составе отложений, типах рельефа (Хорошев, 2005 а). 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, ивнякам 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 гранулометрического 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.

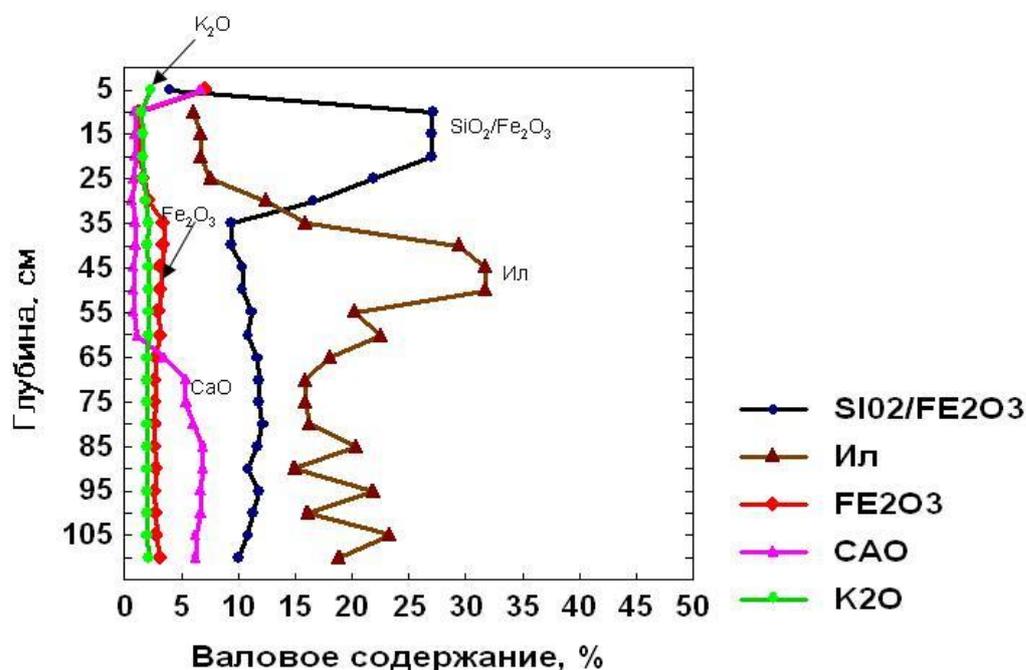


Рис. 6. Распределение илистых частиц и валовой химической состав подзолистой почвы (с остаточными признаками старопашотного горизонта) на озёрно-ледниковых супесях, подстилаемых с глубины 40 см средними моренными суглинками. Плоская водораздельная поверхность структурно-моренно-эрозионной равнины. Среднетаежный полигон «Заячья» в Архангельской области.

Контрастные условия дренированности и минерального питания вследствие разной густоты и конфигурации неотектонических разрывных нарушений способствовали обособлению пяти местностей в пределах Заячирицкого ландшафта (Хорошев, 2005 а). 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 землями и вторичными елово-березово-сосновыми лесами на агродерново-подзолистых почвах по междуречьям и сочетанием агрообразцов и серогумусовых почв по склонам.

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, оксилomezофитными лугами на агродерново-подзолистых почвах и верховыми болотами на торфяниках и торфяно-глеезёмах.

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.

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.

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, агрообраземах и серогумусовых почвах.

2.1.2. Среднетаежный полигон:

Ханты-Мансийский автономный округ, терраса р. Обь

Полигон расположен в среднетаежном ландшафте в пределах левой террасы Оби (озерно-аллювиальной равнины), примыкающей к Малой Салымской протоке на площади 12 км².

Территория расположена на левом берегу реки Оби, в ее среднем течении, на третьей террасе позднеплейстоценового возраста.

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) эоловая и эрозионная переработка рельефа;
- 4) прогрессирующее заболачивание.

Территория 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 бассейном сформировалась озерно-аллювиальная равнина с ландшафтами холодных пустынь. 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 условиях холодного континентального климата из супесей и суглинков сформировался покров лессовидных суглинков элювиального происхождения. В пределах задровых равнин, окаймляющих конечно-моренные гряды тазовской стадии, интенсивно развивались эоловые процессы: дефляция и эоловая аккумуляция (Лазуков, 1971). В южной части равнины, к югу от впадения Иртыша ландшафты холодной пустыни сменялись областью аккумуляции лёссов. 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 степени, легкосуглинистыми отложениями.

Наиболее ранние фазы торфообразования относятся к интервалу 12–11,5 тыс. л.н. (Нейштадт, 1977; Величко и др., 2007). Ширина заболоченных понижений на исследованной автором третьей террасе, как правило, не превышает 100–130 м. Чаще всего они бывают округлой или вытянутой формы. На территории полигона преобладают крупно- и мелкопочковатые болота без четко выраженных гряд и мочажин. Средняя мощность торфа составляет 2–2,5 м. Характерное для современного ландшафта сочетание групп болотных и суходольных урочищ можно рассматривать как следствие дивергенции палеозолового бугристого ландшафта вследствие постепенного заполнения понижений органогенными отложениями.

Почвообразующими породами повсеместно являются озерно-аллювиальные крупнопылеватые средние суглинки с преобладанием фракции крупной пыли без существенных различий гранулометрического состава по территории (Хорошев, 2016б). Почвы района

исследования по действующей классификации почв относятся к типу светлоземов (Классификация и диагностика почв России, 2004; Гонконогов, 2010). Основными факторами, влияющими на своеобразие этих почв, являются избыточное увлажнение территории, суглинистый гранулометрический 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 элювиально-глеевого процесса 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: O – EL – CRM – C. Помимо типичных светлоземов встречаются светлоземы грубогумусированные. Они отличаются только тем, что под подстилкой расположен дерновый горизонт с грубым гумусом. Другими доминирующими типами почв являются торфяники и торфяно-глееземы.

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.

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.*

Доминирующие позиции занимает *местность волнистых поверхностей междуречья с грядовым эоловым мезорельефом, сложенных озерно-аллювиальными отложениями, с нормальным увлажнением, с кедрово-осиновыми бореально-мелкотравными зеленомошными лесами на среднесуглинистых светлоземах на грядах в сочетании с верховыми сосново-кустарничково-осоково-сфагновыми болотами на торфяниках в межгрядовых понижениях.*

По мере удаления от реки возрастает доля межрядовых понижений с заболоченными лесами или болотной растительностью. 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 среднemocных торфяниках в сочетании с рядовыми повышениями, занятыми сосново-осиново-березовыми бореально-мелкотравными лесами на среднесуглинистых светлoземах.*

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 бореально-мелкотравными зеленомошными влажными лесами на среднесуглинистых светлoземах в сочетании с сосново-осоково-сфагновыми болотами по понижениям.*

2.1.3. 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 км². Территория расположена в западной части физико-географической провинции Северные Увалы.

Отличительные черты южнотаёжной 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 (Хорошев, 2007). Залесённость 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 берёзово-осиновые леса с активным возобновлением пихты и ели.

Западный и северный секторы Костромской области находились в зоне ледниковой аккумуляции в среднем плейстоцене (московское оледенение). В ландшафтной структуре относительно слабая выраженность каменных форм приводит к господству плоских и слабонаклонных поверхностей с затрудненным дренажом (Хорошев, 2007).

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

Ландшафт 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). 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 км² 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; Восточноевропейские леса..., 2004; Немчинова, 2005). 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 б). 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. 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 может

варьировать от 20 до 40 см. В подстилающем тяжелом моренном суглинке формируется горизонт BEL мощностью 10–20 см с хорошо выраженными скелетанами осветленного вымытого материала. 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). 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.

Ландшафт 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, что создает сходство со среднетаежным полигоном в Архангельской области. 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. Расположение современных лесосек в придолинных частях междуречий и долинах малых рек Кологривского района провоцирует нарушение питания водотоков, сокращение

жидкого стока, рост твёрдого стока и заиливания малых рек (Кощеева, Хорошев, 2008). Субдоминантное положение моренно-водноледниковые урочища могут занимать в пределах моренных лессово-суглинистых равнин, где приурочены к заболоченным приводораздельным древним ложбинам стока. 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 широколиственных 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.

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

2.1.4. 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 км²) и в Можгинском районе в бассейне р. Вала с притоками Ныша, Сюга (50 км²).

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 моноклиальным падением пластов (Дедков и др., 1974). 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, аргиллиты, 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 песчаные отложения (Пермяков, 1972; Природа Удмуртии, 1972). Для почвообразующих пород междуречий, как и для Архангельского и Костромского полигонов, характерна двучленность: покровные лёссовидные 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 обуславливает 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 вырубki на дерново-подзолистых почвах с лёссовидными 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, ясенник, вороний глаз, сочевичник, осока волосистая, хотя почти всегда присутствует бореальное мелкотравье: кислица, майник. 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.

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). 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, волчегонника, крушины, рябины, бересклета. Почвы оподзолены до глубин 30–60 см с постепенной сменой горизонтов E1 (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.

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. 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 распаханым полям, за счет намыва загрязняющих веществ возрастает обилие видов нитрофильной группы (крапива, чистотел, малина, черемуха). У подножья склонов и в тыловых швах террас распространены елово-черноольховые кустарниковые леса влажнотравные леса на перегнойно-глеевых почвах с господством в травостое нитрофильного разнотравья: таволги, гравилата, колдуницы альпийской, крапивы.

2.1.5. Хвойно-широколиственнолесной полигон:

Калининградская область, Куршская коса

Куршская коса расположена между Балтийским морем и Куршским заливом в пределах зоны 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 переувлажненным черноольшанников на органогенных почвах по понижениям рельефа***. В основе косы лежат несколько островов, сложенных моренными суглинками валдайского времени, которые в течение голоцена были перекрыты мощными песчаными отложениями в результате колебаний

уровня Балтийского моря, выноса вещества с реками и вдольбереговых потоков. 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 переувлажнения песков. В результате эоловых процессов произошло обособление нескольких параллельных друг другу местностей («пальве»), контрасты которых обуславливают ландшафтное и биологическое разнообразие территории. Стабилизация растительностью (прежде всего – за счет искусственного облесения в XVIII-XX веках) 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 обуславливают 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 озера.

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. 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 способствуют сильному наклону многих деревьев, ветровалам и ветроломам. Риск ветровалов значительно усиливается на участках, непосредственно выходящих к морскому побережью и на опушках даже небольших полей 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. Гигантские дюны частично были закреплены древесной растительностью, начиная с конца XVIII века.

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 авандюны характерно сочетание хорошо закрепленных участков с древесной и кустарниковой растительностью, пионерных псаммофитных сообществ и котловин выдувания. 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 хвойно-широколиственных 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.

2.1.6. 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; основные расчеты были проведены А.П. Еремеевой. На участке «Айтуарская степь» в Кувандыкском районе связи изучались на основании континуальных данных космического снимка и цифровой модели рельефа с верификацией по точечным наблюдениям.

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. Особенности 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 текстурно-карбонатных (южных) маломощных сильнокаменистых поверхностно-карбонатных или литоземах, изредка – на солонцах*. 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 текстурно-карбонатных (южных) маломощных сильнокаменистых поверхностно-карбонатных, местами – на солонцах или литоземах*.

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. Для аструктурных склонов в силу

большей напряженности механической и водной миграции вещества свойственна большая петрофитность и меньшая мощность почв по сравнению со структурными.

Реликты эоценового этапа развития территории представлены в южной части Айтуарской степи в виде широкого плоского, местами ступенчатого плато Актобе (Степной..., 1996) , 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 обуславливает практически единственную в пределах Айтуарского участка заповедника возможность развития нормальных коренных зональных разнотравно-типчаково-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, обуславливающих отклонение от зональной нормы, установлено три (Хорошев, Леонова, 2015): 1) гидрологический (в зависимости от степени увлажнения формируется «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 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 прирбовочных 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 черноземах;

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.

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 черноольшанников 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-селитрянополынные с прутняком (*Kochia prostrata*) и кермеком (*Limonium gmelinii*) галофитные сообщества на солонцах.

Буртинская степь расположена в степной зоне на юго-восточной окраине Восточно-Европейской равнины на границе Предуралья 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-Буртя 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 черноземах южных* (Еремеева, 2012).

2.2. Методы полевых описаний

Полевые описания проводились в типичных фациях подурочища или простого урочища при максимально полном охвате урочищ, распространенных на территории каждого полигона исследования. Описанная фация рассматривалась как носитель общих свойств урочища, которые составляют «рамочные условия» для всех составляющих его фаций. Кроме того, описываемая фация считалась 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. На наиболее подробно изученном полигоне «Заячья», а также расположенных внутри него полигонах «Козловка» и «Становская балка» расположение точек близко к регулярному.

При описании рельефа фиксировалось: генетический тип, принадлежность к формам мезорельефа и микрорельефа, характер нанорельефа, уклон в градусах, солярная экспозиция. Описание растительности проводилось в лесных ландшафтах на площадке размером 20x20 м, в

степном – 10x10 м. Почвенный разрез закладывался в центре площадки в межкромовом пространстве. При описании древостоя фиксировались следующие характеристики: формула древостоя для каждого яруса, средняя высота ярусов, средний и максимальный диаметр, сумма площадей сечений в м²/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, гранулометрический 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).

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.

В дальнейших расчетах фитоценоз рассматривался по 5 группам признаков отдельно по ярусам – древесный, кустарниковый, кустарничковый, травяной, мохово-лишайниковый. Почва характеризовалась 3 группами признаков. Цветовые характеристики «оттенок» (Hue), «яркость» (Value) и «цветность» (Chroma) определялись через каждый 5 см до глубины 60 см по шкалам Манселла. Они рассматривались как представитель относительно мобильных свойств. Мощность почвенных генетических горизонтов – как представитель инертных свойств. Гранулометрический состав описывался в почвенном разрезе через каждый 5 см до глубины 60 см и рассматривался как относительно устойчивая характеристика исходной почвообразующей породы, отчасти трансформированной почвенными процессами.

2.3. 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 признаков. Для снижения размерности исходные данные преобразованы методом многомерного шкалирования (отдельно в каждой из вышеперечисленных 8 групп признаков). Это позволило получить латентные переменные - «оси дифференциации», подчиняющиеся нормальному распределению, что позволяет анализировать их стандартными линейными статистическими методами. В результате каждая точка описания характеризуется координатами на некоррелированных «осях» дифференциации компонентов. Оси в дальнейшем трактовались как «свойства», отражающие чувствительность группы признаков к тому или иному экологическому фактору. Алгоритм подробно описывается в разделе 3.3.2.

Цифровые модели рельефа составлены на основе оцифрованных изогипс по топографическим картам масштабов 1 : 200 000, 1 : 50 000, 1 : 10 000 методом триангуляции с последующим переводом в формат грид темы средствами модуля Spatial Analyst ГИС ArcView 3.2a (таблица 3). Размер пиксела (операционной территориальной единицы, ОТЕ) выбирался от 10 до 400 м в зависимости от выдвигаемой гипотезы о масштабных уровнях геосистем. В том же модуле оцифрована гидрографическая сеть (тальвеги постоянных и временных водотоков); полученная векторная тема переведена в формат грид-темы с параметрами, аналогичными грид-темам для 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 (автор – Г.М. Алещенко). В специальном модуле FRACDIM рассчитаны следующие морфометрические характеристики рельефа в скользящем квадрате (со стороной 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 пикселей) с присвоением значения центральному пикселу квадрата:

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

Таблица 3. Параметры цифровых моделей рельефа, использовавшихся в работе.

Полигон	Источник информации о рельефе	Линейный размер квадратных операционных территориальных единицы (ОТЕ), использовавшихся в анализе, м
«Заячья», Архангельская область	Топокарта 1:50000	400
«Трансект», Архангельская область	Топокарта 1:50000	400
«Медвежий», Архангельская область	Топокарта 1:10000	30
«Козловка», Архангельская область	Топокарта 1:10000	10 30
«Становская балка», Архангельская область	Топокарта 1:10000	10 30
Кологривский район, Костромская область	Топокарта 1:200000	400
Костромская область (в целом)	Топокарта 1:50000	400
Удмуртия	Топокарта 1:200000	400
Айтуарская степь, Оренбургская область	SRTM	90
Буртинская степь, Оренбургская область	SRTM	90

Эти показатели использованы как характеристики свойств рельефа геосистемы, вмещающей операционную территориальную единицу (ОТЕ) и описанную в полевых условиях ее типичную фацию. Для ряда задач использовались многоканальные космические снимки Landsat, агрегированные для совпадения размеров с ОТЕ ЦМР.

Классификация пикселей по свойствам рельефа каждой окрестности осуществлялась в модуле кластеризации программы FRACDIM методом к-средних, позволяющим 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 пикселей, 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.

Глава 3

ТЕОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ ПОЛИМАСШТАБНОГО АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ ЛАНДШАФТА

В главе 3 представлен обзор общих подходов автора к полимасштабному анализу структуры ландшафта и соответствующие методы реализации этих подходов. Примеры их реализации содержатся в главе 4.

3.1. Геосистемная интерпретация полимасштабного подхода к анализу структуры ландшафта

3.1.1. Дискуссия об определениях системы и геосистемы

Термин «геосистема» был введен В.Б. Сочавой (1963) фактически как синоним природного комплекса, т.е. набора элементов на земной поверхности, связанных взаимодействиями. В 1970-х – начале 1980-х гг. содержание термина «система» вообще и «геосистема» в частности было предметом оживленной дискуссии как в географии, так и в естественных науках в целом (Сочава, 1963, 1978; Мильков, 1966; Малиновский, 1970; Блюменфельд, 1970; Ретеюм, 1971, 1975, 1977, 1991; Раман, 1972; Садовский, 1974; Д.Л. Арманд, 1975; Дьяконов, 1975; Уемов, 1978; Гвоздецкий, 1979; Преображенский и др., 1977; Блауберг, 1977; Александрова, Преображенский, 1978; Урманцев, 1978; Э.Г. Юдин, 1978; А.Г. Исаченко, 1981; В.Н. Солнцев, 1981; А.Д. Арманд, 1988). Среди основных предметов дискуссий о геосистемах можно назвать следующие:

- В каких отношениях находятся понятия «система» и «комплекс»?
- Какие типы геосистем необходимо различать?
- Является ли абсолютная целостность неотъемлемым свойством геосистем?
- Можно ли считать геосистемой объект, который реагирует на внешнее воздействие не всеми свойствами и не всеми пространственными элементами, а лишь их частью?
- Можно ли считать системообразующим внешний фактор?
- Следует ли считать геосистемами только те объекты, в которых внутренние связи элементов сильнее внешних?
- Следует ли считать геосистемами только объекты, состоящие из контрастных элементов, играющих строго определенные функциональные роли и дополняющих друг друга по выполняемым функциям?
- Стоит ли ограничивать понятие «геосистема» объектами с однонаправленным потоком вещества?

- Следует ли применять это понятие к социально-экономическим объектам и применительно к отношениям природы и общества?

Л.А. Блюменфельд (1970) определил, что «совокупность является системой, если: 1) заданы связи между элементами, 2) каждый элемент внутри системы является неделимым, 3) с миром вне системы система взаимодействует как целое, 4) при эволюции в разные моменты времени между элементами можно провести однозначное соответствие» (с. 37). В.Н. Садовский (1974), обращает внимание на существование трех групп определений системы. В первой группе – через понятия «элемент», «отношение», «связь», «целое», «целостность» – в значении объективных реальностей материального мира со свойством целостности. Вторая группа определений дается как некоторый класс математических моделей – математическая абстракция, которая служит как модель динамического явления – для обозначения абстрактных систем, которые не равны по своему содержанию реальному объекту исследования, образуют своеобразные части, стороны, явления, которые сохраняют какие-либо свойства или отношения целого. Для определения в третьей группе применяются понятия «вход», «выход», «переработка», «информация», «управление»: система – устройство, которое принимает входы и генерирует выходы как конструкция, способная перерабатывать информацию и оптимизировать функционирование системы как целостности. По мнению Г.Е. Гришанкова (2001) указанные типы систем располагаются не одна возле другой, а вертикально, одна после другой (с. 135-136), т.е. не являются взаимно альтернативными.

В связи с названием диссертационного исследования, следует пояснить, что в нем подразумевается под термином «организация». По Г. Кастлеру, системой называется организованное целое, состоящее из взаимосвязанных частей; организация основана именно на существовании между ними взаимных связей (цит. по: Тахтаджян, 1971). По В.Н. Садовскому (1974) организация системы фиксирует не только свойство упорядоченности ее элементов, связей и отношений, но и специфические для каждой системы взаимоотношения между ее частями, подсистемами, уровнями и т.д., а также степень их вклада в общее функционирование системы. Под *структурой системы* обычно понимается *совокупность устойчивых связей между элементами; именно наличие матрицы структуры позволяет рассматривать систему как целое*, свойства которой не сводятся к сумме свойств отдельных элементов (Ланге, 1969; Малиновский, 1970; Садовский, 1974). По мнению А.А. Малиновского (1970, 1980), говоря о системах, необходимо различать понятия «упорядоченность», «организованность», «целостность». Упорядоченность является количественным показателем структуры системы – отклонение распределения элементов от наиболее вероятного для данных условий (Малиновский, 1980). Организованность – показатель отличия свойств и проявлений системы от свойств и проявлений простой суммы ее частей. Организованность представляет собой

частный случай упорядоченности; организованность системы определяется не только числом и прочностью связей, а главным образом их характером, повышающим ее жизнеспособность (Малиновский, 1970). При низком уровне организации система по своим свойствам приближается к сумме частей. Целостность определяется не уровнем организации, а степенью плотности связей внутри системы, превышающей плотность связей между системой и средой (Малиновский, 1980). В данной работе мы исследуем специфику тесноты, или плотности, и вида (в математическом смысле) зависимостей применительно к разным масштабным уровням геосистем, для разных сочетаний ландшафтных условий в пространстве и для разных временных стадий развития геосистем. Факт упорядоченности выявляется, когда мы устанавливаем отклонение от случайного характера варьирования свойств в пространстве, то есть наличие связей между свойствами, сопряженного их варьирования в пространстве.

Остановимся на различиях в трактовке понятия «система» в физической географии, отталкиваясь от трех групп определений, выделенных В.Н. Садовским (1974). Ю.Г. Пузаченко придерживается второй группы определений из вышеперечисленных, ссылаясь на М. Месаровича: системой является отношение над абстрактными множествами (Пузаченко, Скулкин, 1981). По А.И. Уемову (1973), «на любом множестве объектов имеют место какие-то отношения; поэтому определения приведенного типа [М. Месаровича – А.Х.] не дают возможности отличить систему от не-системы и выявить специфику системного подхода» (с. 147). Различные цели делают необходимым рассмотрение различных свойств, а значит, соответственно, делают необходимым и выделение различных формальных систем, описывающих с разных позиций одну и ту же реальную систему. (Пузаченко, Скулкин, 1981, с. 11). По В.Н. Солнцеву, выявление геосистемы – это не выделение специфического набора геокомпонентов, а выявление совокупности связей тех свойств компонентов, которые обязаны конкретному взаимодействию. Каждый из способов взаимодействия порождает собственную структуру связей, а стало быть, и систему целостную относительно этого способа взаимодействий. В одном и том же пространстве существуют разные способы взаимодействия, порождающие разные свойства одних и тех же геокомпонентных тел и, значит, разные геосистемы, составленные из этих компонентов (В.Н. Солнцев, 1981, с. 97). В обобщенном виде это представление сформулировано как принцип множественности описаний любой системы: для получения адекватного знания о системе требуется построение некоторого класса ее описаний, каждое из которых способно охватить лишь определенные аспекты целостности и иерархичности данной системы (Садовский, 1972). Если придерживаться такого подхода, то множество пространственных единиц, в которых часть (не все!) свойств связаны друг с другом по единому правилу, составляют геосистему. Статистически значимая связь свойств рассматривается как следствие либо прямых взаимодействий взаимодействующих элементов

«вертикальной» («дополнительной», «компонентной» системы), либо их одновременной реакции на варьирование третьего свойства (связь с опосредованием, по В.Н.Садовскому (1974), А.И.Уемову (1978), Г.Е. Гришанкову (2001). Поскольку за связью в большинстве случаев стоит процесс вещественно-энергетического обмена, то можно говорить о том, что такой процесс имеет разную мощность на разных участках, что обуславливает пространственное варьирование значений взаимосвязанных свойств при неизменности правила (вида уравнения). Дополнительный аспект систем, важный для нашего исследования, содержится в работах Ю.А. Урманцева, который, помимо единства, образованного определенными сортами элементами, связывающими их в целое отношений, считает необходимым при представлении объекта как системы описать ограничивающие эти отношения условия, что он называет законом композиции (Урманцев, 1978). В дальнейшем мы уделяем большое внимание выявлению ландшафтных условий реализации межкомпонентных отношений в ландшафте и пространственным различиям в математическом виде зависимости.

Природно-территориальные комплексы, традиционные объекты ландшафтоведения, были уверенно интерпретированы ведущими физико-географами и ведущим философом в совместной статье как реальные системы; причем в зависимости от целей исследования на основе этих систем можно построить ряд концептуальных систем, изоморфных определенным свойствам реальных систем (Преображенский и др., 1977). Эта позиция, прежде всего в понимании целостности, разделяется не всеми географами (Ретеюм, 1991) или разделяется применительно лишь к некоторым иерархическим уровням (Арманд, 1988). А.Ю. Ретеюм считает, что все ранее выделявшиеся и выделяемые до сих пор географические комплексы, районы, ландшафты и т.д. представляют собой отдельные аспекты хорионов и сфрагид, их части и ареалы, а не целостные системы (Ретеюм, 1991, с. 57). Его мнение о наличии целостного характера только у хорионов (или, в более ранних работах (Ретеюм, 1971), у систем с однонаправленным потоком переноса вещества) означает признание в географии систем только одного типа – центрированных (точнее – внутренне-центрированных), согласно бинарной классификации А.И. Уеова (1978). Тогда наличие обязательного центра воздействия делает понятие «необходимость» ключевым при определении целостности. Против этого возражал И.В. Блауберг: тогда «в класс целостных систем попадут лишь системы, функционирующие по схеме жесткой детерминации, и из него придется исключить вероятностные системы, в которых упорядоченность, устойчивость системы сочетается с достаточно широкой автономностью элементов» (Блауберг, 1977, с. 10). Вероятностный же характер взаимодействий в объектах, изучаемых ландшафтоведением, сейчас фактически общепризнан (А.Г. Исаченко, 2004).

Д.Л. Арманд (1975) и А.Ю. Ретеюм (1971), видимо, абсолютизируют свойство функциональной целостности, т.е. первую группу определений системы. По Д.Л. Арманду

(1975) геосистемам *приходится* придавать функциональное значение, ограничивая их рассмотрением какого-либо процесса или группы процессов. А.Ю. Ретеюм (1971) различает среди геокомплексов (саморазвивающихся систем, расчлененных на части, не могущих существовать вне их совокупности) физико-географические единицы двух групп: с замкнутой циркуляцией вещества (геолоны) и с односторонним движением системообразующего потока вещества (геосинолы). В ряде работ право называться геосистемой оставляется только за объектами с однонаправленным физическим потоком вещества (Дьяконов, 1975; Ретеюм, 1975). Однако такая точка зрения встречает возражение, так как ни одно из общеизвестных определений не дает оснований считать, что система формируется однонаправленным физическим потоком вещества (Александрова, Преображенский, 1978; А.Г. Исаченко, 2004). Не следует это и из современного англоязычного учебника по физической географии, в котором геосистема – это группа свойств, связанных взаимодействием, которое формирует эмерджентное качество (Christopherson, 2014); понятие геосистемы в этой книге трактуется с позиций третьей группы определений, упоминаемых В.Н. Садовским, – «вход – процесс – выход». Если же рассматривать «геосистемы» А.Ю. Ретеюма как частный случай *функциональных систем* (не обращая внимания на правомерность употребления термина общего значения для частного случая), то в них соблюдаются все требования, предъявляемые к таким системам. В частности, применим и жесткий критерий П.К.Анохина – *взаимосодействие* (а не взаимодействие!), подлинная кооперация компонентов множества для получения конечного *полезного результата* при наличии системообразующего фактора, ограничивающего многочисленные возможные степени свободы взаимодействия данного компонента с другими (Анохин, 1973). Анохин, развивая теорию функциональных систем, полагал, что термин «взаимодействие» в традиционных определениях системы не накладывает ограничений на многочисленные возможные степени свободы взаимодействия данного компонента с другими и потому не должен использоваться в определении системы. Подчеркнем, что речь идет именно о функциональных системах, которые П.К. Анохин исследовал в физиологии. Возвращаясь к «геосистемам» А.Ю. Ретеюма и пользуясь определением П.К. Анохина, можно, вероятно, сказать, что «полезным результатом», к которому стремится такая система, является выравнивание потенциалов физических полей, для абиотических систем с гравитационной природой системообразующих потоков – достижение максимальной энтропии. Обсуждая особенности разных подходов к выделению систем в географии, Э.Г. Коломыц (1998) отмечает существенные ограничения бассейнового (т.е. функционального, потокового) подхода и связывает невозможность рассматривать его в качестве полной замены более традиционного генетического со следующими обстоятельствами: а) абсолютизацией латеральных взаимодействий и недоучетом радиальных составляющих водного баланса, б) сосредоточением

внимания только на современном функционировании коннекционной системы, но не парагенез в целом с эффектами последствия прошлых взаимодействий, в) затуханностью климатического фактора – инсоляционных и циркуляционных потоков и соответствующих радиальных и латеральных вещественно-энергетических связей.

«Камнем преткновения» при выделении систем, особенно таких сложных, как географические (последнее обстоятельство особо отмечал Э.Г. Юдин (1978)), часто оказывается бесконечность количества признаков и взаимодействий. А.И. Уемов (1978) писал даже про «проклятие размерности». В связи с этим некоторый пессимизм выражал А.Ю. Ретеюм (1972): «не только в ландшафтах, но и в любых произвольным образом ограниченных территориях всегда существуют определенные связи, но изучение подобных совокупностей как физических систем, систем в широком смысле слова, ввиду практически бесконечного количества их не представляет интереса» (с. 96). Однако выход из этой ситуации может заключаться не только в предлагаемом этим автором ограничении понятия «геосистема» достаточно специфическим классом центрированных систем – хорионов, но и в строго обоснованном (математически и экологически) снижении размерности. Особо следует подчеркнуть конструктивность методов многомерной статистики для вычленения значимо связанных признаков. Синхронно собранные данные, подвергнутые обработке методами многомерной статистики, позволяют сконструировать небольшое число искусственных переменных, получающих предметную интерпретацию; в дальнейшем поведение объекта и его отдельные состояния рассматриваются в терминах этих многомерных векторов, служащих индикаторами состояния (Хайлов, 1980). В синергетике такие переменные получили наименование «параметров порядка» (Князева, Курдюмов, 2011). Именно такой подход к решению проблемы «проклятия размерности» и выделению геосистем применяется в нашей работе.

Дискуссия 1970-х гг. о системах в географии отражала общий интерес методологов к классификации систем. Например, А.А. Малиновский (1970) выделял две разновидности систем: а) жестко построенные, в которых имеются жесткие функциональные связи элементов, когда изменение одного элемента влечет за собой изменения в остальных частях системы; б) дискретные, корпускулярные, где элементы связаны с собой не прямо, а через посредство их отношений к среде; они являются независимыми единицами, образующими систему благодаря тому, что обладают рядом общих черт (с. 14). Этот автор настаивал на неправомерности слишком жестких ограничений на определение: система – это просто констатация факта существования определенного объединения; тип взаимоотношения без учета того, является ли он высоко или низко организованным. Вообще различие двух подобных типов систем еще с 1970-х гг. стало практически общепринятым как в философии, так и в географии. В.А. Геодакян (1970) видит две ипостаси систем: множественность связанных внешними взаимодействиями

однотипных элементов (*эктосистемы*) и определенное число разнотипных элементов, объединенных внутренними взаимодействиями (*эндосистемы*). В этом контексте целый ряд классификаций разработан и в географии. А.Д. Арманд (А.Д. Арманд, Куприянова, 1976; А.Д. Арманд, 1988) выделяет однородные и дополнительные системы. Б.Б. Родман (1999) различает однородные и коннекционные районы. К.Г. Раман (1972) различает субстанциальные и функциональные структуры.

Требование реакции геосистемы на внешнее воздействие как целого иногда рассматривается как ее важнейший признак. Так, по мнению А.Ю. Ретеюма (1977), у многих природных комплексов отсутствуют признаки функциональной целостности; он приводит пример сохранения стабильности объектов, часть которого попала в сферу влияния гидротехнических сооружений. Однако применительно к системам вообще обязательность (без оговорок) признака целостности ставится под сомнение. А.А. Малиновский (1970), оппонировав Л.А. Блюменфельду в дискуссии (с. 43), сомневается в необходимости включать в определение пункт о реакции системы как целого: можно говорить о системах очень целостных и менее целостных; едва ли можно отделить реакцию как целого от реакции отдельных элементов. Если человек продолжает существовать как система даже при отсутствии некоторых органов (руки, ноги, глаза и др.), то вряд ли есть основания отказывать в «системности» природным объектам на том основании, что они продолжают существовать без какой-то части (например, урочище без искусственно «убранной» из него единичной фации). По Г.Е. Гришанкову (2001), транслировавшего в физическую географию общесистемные представления Э.Г. Юдина (1978), целесообразно разделять «органическое целое» и «неорганическое целое». В органическом целом самостоятельное существование частей становится невозможным, поскольку части в настоящем их качестве есть порождение данного целого, в котором внутренние связи более тесные, чем внешние, как в живом организме. Неорганическое целое допускает изменение функциональных частей, не выходящих за пределы данного структурного уровня; основные свойства частей определяются их внутренней структурой, а не структурой целого; части способны к самостоятельному существованию; части часто активнее целого (Гришанков, 2001, с. 144).

3.1.2. Типы систем в диссертационном исследовании

Автор позиционирует представленную работу как полимасштабное и полиструктурное системное исследование. Поэтому необходимо сформулировать некоторые общие требования к системному исследованию, отраженные в многочисленных публикациях по общей теории систем и геосистем (Садовский, 1974; Уемов, 1978; Юдин, 1978; Малиновский, 1980; Ласточкин, 2011). Для нашей работы наибольшее значение имеют следующие из них.

1) Заданы элементы, объединяемые связями, которые количественно оценены на множестве объектов.

2) Описан вид зависимости между элементами (закон композиции) и оценена ее достоверность.

3) Из множества связей выделены системообразующие и установлен их физический смысл.

4) Выявлено новое свойство системы, возникшее в результате взаимодействия элементов и не свойственное элементам по отдельности.

5) Описаны общие свойства элементов, заданные внешними факторами и/или системой более высокого порядка (рамочные условия).

6) Установлена функциональная роль системы в надсистеме.

7) Оговорены условия, в которых может существовать система.

8) Проведена классификация исследуемых систем.

9) Обозначены границы системы (в данном случае – пространственные) и ее размеры.

10) Установлена устойчивость связей между элементами во времени либо переход системы в иное состояние (с иной структурой) с течением времени.

Мномерность географического пространства В.А. Боковым понимается как суперпозиция разноуровневых пространственных отношений, сохраняющих определенную самостоятельность в пределах многих уровней (Боков, 1990, с. 151). На наш взгляд, это представление может быть интерпретировано как определение полиструктурности ландшафта. В представленной работе рассматриваются пять групп систем.

Первая группа систем – это группа признаков *одного компонента* ландшафта, находящихся в отношениях *конкуренции*. Признаки могут быть представлены в ПТК по одному (идеальное конкурентное преимущество) либо в некотором соотношении (как результат одновременной возможности существования в одном пространстве). Исходные полевые данные представлены многочисленными отдельными количественными признаками компонентов (обилие ели, обилие сосны, мощность подзолистого горизонта, гранулометрический состав почвы на глубине 10 см, выраженный через долю физического ила, и т. п.). Это структурно-линейные свойства, согласно классификации А.И. Уемова (1978): объект может обладать данным свойством в большей или меньшей степени, свойство имеет интенсивность. Однако после процедуры снижения размерности можно перейти к свойствам другого типа: они отражают *соотношение* двух признаков, каждый из которых в оптимальных для себя условиях может вытеснить другой. Например, в фитоценозе может быть представлена либо только ель (при относительно богатом минеральном питании), либо только сосна (при бедном питании), либо обе породы в том или ином соотношении (промежуточные условия). Результат таких «конкурентных» отношений отражается координатами конкретной операционной

территориальной единицы (ОТЕ) на оси экологического фактора. *Каждая ось ниже рассматривается как «свойство», понимаемое как чувствительность группы признаков к экологическому фактору.* Тогда отдельные признаки мы уже рассматриваем как элементы системы, связанные конкурентными отношениями. В случае видов живой природы это конкуренция в буквальном смысле, исход которой определяется как собственными свойствами видов (теневыносливость, светолюбие и др.), так и свойствами других компонентов. А.И. Уемов (1978) такие системы связанных признаков отнес к категории структурно-многомерных. Они не являются непосредственным предметом изучения в нашей работе (и вообще в основном являются предметом исследования отраслевых наук – геоботаники, почвоведения и др.), но их количественная характеристика (положение на оси экологического фактора) используется для дальнейшего анализа межкомпонентных отношений в ландшафте. Подобные *системы внутрикомпонентных взаимодействий* связаны элементарной целостностью (по В.А. Бокову, 1990).

Вторая группа систем, которые уже можно назвать геосистемами, – это системы *межкомпонентных взаимодействий*, относящиеся к типу дополнительных (в терминологии А.Д. Арманда, 1988), т.е. состоящие из обычно не существующих друг без друга контрастных составных частей. В нашем случае как элементы рассматриваются отдельные свойства (в смысле, описанном в предыдущем абзаце) компонентов ландшафта (в понимании русскоязычного ландшафтоведения, т.е. почв, фитоценоза, горных пород и т. д.), которые взаимообусловлены радиальными потоками вещества и энергии. Свойства могут быть связаны разными способами и в разных комбинациях, что отражает множество вещественно-энергетических и информационных потоков между почвами, горными породами, водами, фитоценозом. Кроме того, в системе потоков участвуют животные, но автор не имел возможности получить данные об их вкладе в формирование эмерджентного свойства компонентной системы. Среди эмерджентных свойств компонентной системы – биологическая продуктивность, набор почвенных горизонтов, химический состав почвенных вод. Геосистема этой группы относится к классу интеграционной целостности (по В.А. Бокову, 1990).

Третья группа - это *территориальные системы* сопряженных ПТК, «представителями» которых являются операционные территориальные единицы (ОТЕ). Теоретическое обоснование состоит в том, что способ действия системы высшего порядка зависит от ее структуры, то есть от способа, каким связаны между собой элементы систем первого порядка (Ланге, 1969). Морфология системы может быть унаследована от прошлых (когда-то существовавших) взаимодействий. Она может состоять из элементов, общие свойства которой заданы системой более высокого порядка (например, геологической структурой), т.е. быть эктосистемой (по В.А. Геодакяну, 1970), или внешней системой (по А.И. Уемову, 1978). В качестве элементов

рассматриваются операционные территориальные единицы одинакового размера (определяемые параметрами цифровой модели рельефа), каждая из которых считается носителем свойств ПТК ранга примерно урочища или фации (для разных полигонов, изученных автором). Мы не ставим в работе задачу исследовать меры взаимозависимости таких пространственных элементов друг от друга (это потребовало бы применения методов геостатистики). Однако результат передачи информации (в том числе против направления потоков вещества) от одной ОТЕ к группе соседних и далее по цепочке к другим элементам системы рассматривается как рамочное условие для ОТЕ, расположенной в геометрическом центре этой группы. Поэтому системы пространственных элементов, если они не связаны односторонним потоком вещества, могут быть несколько условно отнесены к категории цепных (по А.И. Уемову), однородных (по А.Д.Арманду), корпускулярных (по А.А. Малиновскому). Если же пространственные элементы связаны односторонним потоком вещества, то их целесообразно рассматривать в рамках концепций каскадной ландшафтно-геохимической системы (по М.А. Глазовской, 1988), дополнительной системы (по А.Д.Арманду, 1988), бассейновой системы (по М.Д. Гродзинскому, 2014 и др.), геосинола (по А.Ю. Ретеюму, 1971). Системы с односторонним потоком вещества не являются предметом исследования в данной работе. Пространственные элементы создают «совместными усилиями» поле некоторого свойства; изменение каждого элемента меняет свойства поля и его потенциал в каждой конкретной ОТЕ. В нашей работе принято, что такое поле порождается процессами, которые определяются комбинацией форм рельефа.

Четвертая группа систем отражает отношения *между системой более высокого ранга и заключенной в ее пределах системой низкого ранга*, т.е. отношения между целым и частью. Здесь мы имеем дело со связями фоновой субординации, когда целое воздействует на части через управляющие механизмы (Боков, 1990; Гришанков, 2001). Обмен информацией между одноранговыми системами (ОТЕ) формирует эмерджентное свойство некоторой относительно крупной геосистемы (например, поле грунтовых вод), которое отражается на значениях свойств элементарной ОТЕ. Иначе говоря, структурные отношения в одной геосистеме воспроизводятся в структуре другой геосистемы, что трактуется как передача информации (Боков, 1990). Проводя физиологическую аналогию, четвертую группу систем можно сопоставить с отношениями между весом тела человека как свойством системы и состоянием, например, его сердечно-сосудистой подсистемы. Целесообразно остановиться на интерпретации целостности геосистем, в которых «дополнительность» (невозможность частей существовать друг без друга) неочевидна, то есть совокупностей ОТЕ, например – урочищ. В какой степени они могут быть отнесены к какому-либо классу геосистемной целостности (в терминологии В.А. Бокова, 1990)?

Даже если предположить отсутствие единообразной реакции во всех частях геосистемы («целостности однотипного реагирования», по В.А. Бокову, 1990), это не исключает механизмов постепенной передачи информации «по цепочке». Представим расчлененную на овраги и гребни местность с единым генезисом и геологическим строением (класс генетической целостности, по В.А. Бокову, 1990, или связь происхождения, по Г.Е. Гришанкову, 2001). Если тем или иным способом уничтожить один из оврагов (например, засыпать), то это приведет к целой серии последствий для разных компонентов, постепенно передающихся между соседними урочищами. Так, произойдет перераспределение поверхностного стока с водораздельного склона: он будет перенаправлен в другие овраги, вызывая изменение их морфологии и границ. Подземный сток, не найдя «привычного» выхода в засыпанный овраг, будет задерживаться выше на водораздельной поверхности или «уйдет» в соседний овраг, изменив его внутреннюю структуру: возрастет поверхностный сток, усилится глубинная эрозия, спровоцировав активизацию склоновых процессов. Поток холодного воздуха будет сильнее задерживаться на локальных водораздельных поверхностях и изменит тепловой режим почвенно-растительного покрова. Прекращение ветрового сноса снега в засыпанный овраг вызовет большее накопление на водоразделе и/или рост скопления в оставшихся оврагах. Наконец, может произойти перераспределение животных: лишившись нор и укрытий, они уйдут в аналогичные соседние овраги той же местности, что может вызвать переуплотнение популяций и «выброс» ее части в следующие пригодные овраги этой местности. Перечисленные свойства (снежный покров, сток, состояние популяций) предстают как эмерджентные свойства, создаваемые именно совокупностью взаимодействующих элементов, а не элементами по отдельности. В этом заключается целостность системы, хотя импульс и будет постепенно ослабевать по мере удаления от источника воздействия (в этом смысле в том же пространстве будет проявляться нуклеарная система). Следует отметить, что однотипные соседние элементы данной местности в большей степени подвержены передаче импульса, чем элементы другой местности. Животные (и переносимые ими органические и минеральные вещества, «взятые» у растительного покрова и почв) уйдут в аналогичные соседние сохранившиеся местообитания; талые воды «предпочтут» уйти в аналогичный соседний овраг, а не «пробивать» себе новую дорогу в другой слаборасчлененной местности и т. д. Следовательно, внутренние связи сильнее связей со средой, что почти всегда входит в определение системы.

Таким образом, изменение или исчезновение одного из элементов «однородной» (по А.Д. Арманду, 1988), или корпускулярной (по А.А. Малиновскому, 1970), системы может вызывать передачу воздействия «по цепочке» другим элементам однородной системы, структура которой претерпит изменения в результате воздействия только на один элемент.

Такие системы отнесены А.И. Уемовым (1978) к классу цепных, а В.А. Боков (1990) относит их к классу интеграционной целостности, которая допускает неодновременное распространение локальных воздействий в разных частях комплекса. Элементы в них не независимы друг от друга; исчезновение одного элемента хоть и не уничтожает систему (т.е. система является, по Уевому, неминимальной), но отражается на свойствах ее других элементов; функция же ее (предоставлять местообитания, быть проводником воды и т.д.) в целом сохраняется. Поэтому строгое противопоставление жестких и корпускулярных структур (Малиновский, 1970) (соответственно, дополнительных и однородных систем, по А.Д. Арманду, 1988) невозможно. А.А. Малиновский (1970) подчеркивал существование (и даже преобладание) разнообразных промежуточных вариантов. Если любая модификация структуры или структурных свойств системы не влечет за собой изменений функциональных свойств системы, то такая адаптация системы к воздействиям считается структурной (ван Гиг, 1981). Из приведенного примера следует, что грань между функциональными и генетическими системами оказывается не такой уж строгой. Давно отмечено, что основой всякой устойчивой системной дифференциации является развитие взаимно-дополнительных связей между ее элементами, а всякая интеграция возникает на основе и в результате дифференциации и является, в сущности, особой ее формой (Тахтаджян, 1971).

Если единство мозаичной территории обусловлено одинаковым воздействием горных пород, то ареал их распространения (по крайней мере, в пределах слоя циркуляции грунтовых вод и температурных колебаний) соответствует ареалу вмещающей геосистемы по отношению к элементам мозаики (фациям). Верхняя часть земной коры с соответствующим расчлененным в той или иной степени рельефом образует трехмерное тело – «вмещающую геосистему», в пределах которого существуют системообразующие потоки (воздуха, грунтовых и поверхностных вод, тепловой энергии и др.), создающие рамочные условия для «вмещаемых» фаций. В связи с этим, неясно, почему А.Ю. Ретеюм (1975) рассматривает горные породы (важнейшее свидетельство генезиса) как внешний фактор, а не как часть геосистемы. Генетически однородная, но внутренне мозаичная геосистема имеет, как было показано в предыдущем абзаце, множество связывающих ее воедино потоков, необязательно – однонаправленных, и поэтому обладает функциональной целостностью. При переходе к другой местности перечисленные потоки могут ослабевать. В этом смысле приграничные потоки (создающие «коннекционные» (Арманд, Куприянова, 1976; Родоман, 1999) районы) необязательно сильнее внутренних латеральных. Приведенные примеры показывают, что мнение А.Ю. Ретеюма о том, что генетически обусловленные единицы обособляются только в силу происхождения, неточно отражает реальность. Единый генезис создает единую трехмерную геосистему, в которой существует множество интегрирующих ее потоков,

ослабевающих вблизи ее границ, но замещаемых при этом другими усиливающимися потоками, которые создают коннекционные районы, парадинамические системы. К.Г. Раман (1972) включал в расширенное понятие геосистемы не только функциональные системы, связанные взаимодействиями, но и системы генетически обусловленных отношений, но не всех случайных отношений, а только тех, которые создались в результате прошлых взаимодействий.

Пятая группа систем представляет собой *территориальные системы соседствующих ПТК*, связанных *единым типом межкомпонентных отношений*. Такая система представляет серию компонентных систем второй группы со свойственной ей суммативной (Боков, 1990) целостностью. Ее можно представить как *геохору*, в которой действует единый процесс (например, движение грунтовых вод, рассеяние семян или поток вещества из пород в почвы), но с разной силой проявления в разных пространственных элементах. Этот случай соответствует понятию «системы объектов-систем» с единым законом композиции (Урманцев, 1990; Артюхов, 2009). Частным случаем может быть каскадная ландшафто-геохимическая система, состоящая из контрастных элементарных ландшафтов, связанных нисходящим потоком вещества. В нашей работе выявление границ таких внутренне мозаичных геохор является одним из ключевых предметов исследования. Для этого необходимо строго выявить набор ландшафтных условий, при которых существует статистически значимая связь. При включении в выборку, для которой строится модель связей, пространственных единиц, не входящих в такую геосистему, качество модели ухудшается. Применение методов геостатистики (не входящих в арсенал методов в данной работе) в таких случаях позволило бы установить высокую автокорреляцию индивидуального свойства в пространстве. С этих позиций, применение методов геостатистики не совсем соответствует задачам данной работы, поскольку мы стремимся к отражению сопряженного варьирования не индивидуальных свойств, а их плеяд, формирующих парциальные структуры. Например, на склоне с постепенно увеличивающейся вниз крутизной уровень грунтовых вод будет постепенно понижаться в том же направлении, а параллельно будет происходить вытеснение гигрофитов мезофитами или мезофитов – ксерофитами. Обратим внимание, что идентификация геохор такого рода важна для прогнозирования изменений во времени. При воздействии на один компонент (или его свойство) другие компоненты будут меняться сходным образом. Геохора, состоящая из компонентных систем, сохраняет целостность (понимаемую как тип связи) во времени. Ее внутренняя мозаичность может рассматриваться как модель разных временных стадий процесса (например, роста уровня грунтовых вод).

На рис. 7 представлены отношения между группами систем (показаны разными цветами и типами линий), которые являются объектами исследования в данной работе с указанием положения их в классификациях систем разных авторов. Для каждой группы рассматриваемых

систем указаны типы целостности и системообразующие связи. Наличие разнотипных геосистем в одном и том же пространстве трактуется как *полиструктурность* ландшафта, а зависимость того или иного индивидуального свойства одновременно от многих процессов, в геосистемах разных размеров – как *полимасштабность*.

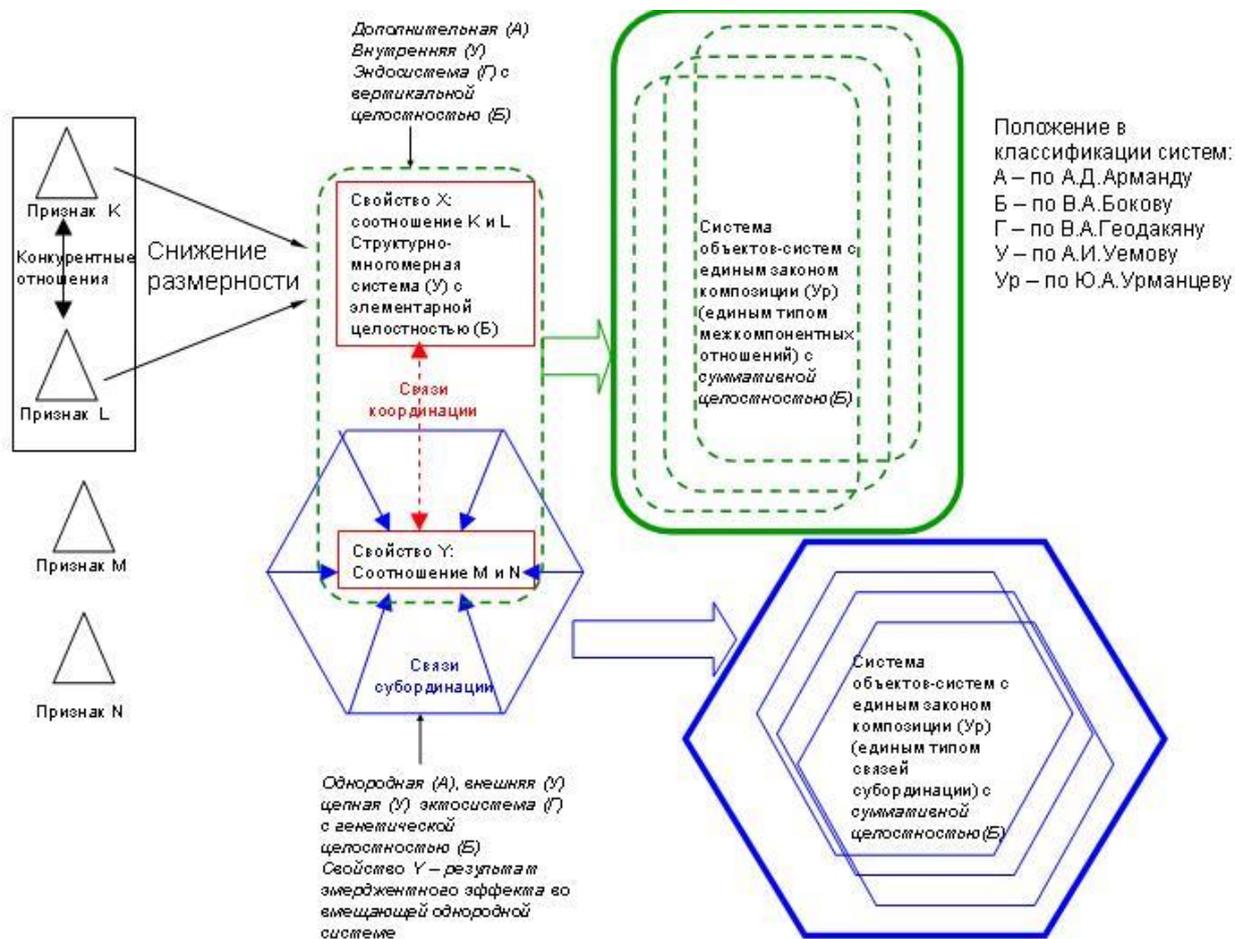


Рис. 7. Группы систем, рассматриваемых в работе

3.2. Причины пространственной variability

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 (непространственных факторов)*. 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 иметь 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 гнездовий птиц и т.п. На фациальном уровне возможно случайное возникновение и исчезновение куртин кустарничков, мхов, трав – «изменения, не закрепленные в пространстве», которые могут не включаться в описание многолетней динамики, по выражению А.А. Тишкова (2016). Иногда куртина первоначально возникает не случайно, а, например, в специфических условиях нанорельефа (ложбина, западина), но впоследствии выходит за границы этой формы вследствие саморазвития. Тогда связь (в статистическом смысле) 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 (обладают низкой инертностью) и прежнее состояние само по себе не восстанавливается. 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 перегушенном сосновом жердняке. Причиной тесной связи ярусов и объединения их в дополнительную (в терминологии А.Д. Арманда, 1988) систему в таком случае является часто биофизическое или биохимическое воздействие (тень, микроклимат, корневые выделения и др.).

Третий вариант причин пространственных различий подразумевает, что *причина кроется в анизотропных свойствах пространства*. Пусть, как и в предыдущем примере, 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 (например, в сыром гигротопе) основной конкурент – ель – растет медленно, а на другом (свежем гигротопе) – 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 – эмерджентный продукт вертикальных двусторонних потоков вещества в геосистеме, состоящей из компонентов

ландшафта. По другому сценарию вырубке в обоих местах предшествовал одинаковый древостой, и разная оподзоленность почвы имеет место по иной причине, которая не объясняется взаимодействиями в геосистеме, объединяющей компоненты. Почвы могут быть разными, потому что одно местоположение 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. Следовательно, почва конкретного ПТК является продуктом эмерджентных взаимодействий в системе другого типа, объединяющей потоками вещества и информации уже не компоненты, а большую группу ПТК. В данном примере это потоки воды вниз по рельефу и потоки информации, которые могут быть направлены и в противоположном направлении. В последнем случае информация о наличии по соседству вогнутой формы рельефа передается вышележащему ПТК; реакцией на этот сигнал является латеральный отток почвенно-грунтовых вод и усиление выщелачивания в почве. 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 геосистемам более высокого порядка, которые «совместными усилиями» своих пространственных элементов диктуют разные допустимые диапазоны свойств индивидуального ПТК. По В.А. Бокову (1990), это частичная интеграция в объемлющие системы: каждая связанная с данным ландшафтным комплексом система ставит определенные ограничения на проявление его свойств. А.Д. Арманд и Т.П. Куприянова (1976) обращали внимание на то, что системой высокого ранга («суперсистемой») компенсируются приход и убыль вещества в системе более низкого ранга, что обеспечивает непрерывное восстановление градиента свойств.

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. В приведенном выше примере он заключается в положении уровня грунтовых вод и, соответственно, степени дренированности, обусловленной набором и количественными соотношениями приводораздельных и склоновых элементов.

В нашей работе ключевое значение придается именно общим свойствам надсистемы, которые задают допустимый диапазон варьирования свойств в индивидуальных ПТК,

обеспеченных полевыми описаниями. Тем самым мы исследуем трансляцию информации с вышестоящего иерархического уровня на нижестоящий. Ниже для этого аспекта применяется термин «*межуровневые взаимодействия*». Для обозначения *внутриуровневых взаимодействий* между разнокачественными природными телами будем применять, во избежание 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). Это объясняется своеобразным ростом «конкурентоспособности» электромагнитных сил по сравнению с гравитационными (В.Н. Солнцев, 2013). *Основной сюжет нашей работы – сравнение вкладов внутриуровневых и межуровневых взаимодействий в формирование пространственных различий.* Источники пространственного варьирования (дисперсии) свойств, которые являются предметом исследования в разделе 4, показаны на рис. 8. Он отражает следующие гипотезы применительно к свойству компонента ландшафта, обозначенному буквой X.

1) Значение свойства X определяются как внутриуровневыми (межкомпонентными) связями со свойствами некоторых других компонентов А, В, С (цифра 1 на рис. 8), так и рамочными условиями, навязанными вмещающими геосистемами (цифра 2 на рис. 8). Значения свойства X может варьировать в пространстве независимо от ряда других свойств (D на рис. 8).

2) Разные свойства компонентов ландшафта (X, А, В, С, D на рис. 8) могут варьировать в пространстве сопряженно друг с другом, так как контролируются рамочными условиями вмещающей геосистемы либо влиянию вмещающих взаимонезависимых геосистем одновременно нескольких масштабных уровней («надсистемы I, II, III, IV», цифра 3 на рис. 8).

3) Часть дисперсии свойства X может определяться случайными процессами, независимыми ни от других компонентов, ни от вмещающих геосистем (цифра 4 на рис. 8).

4) Часть дисперсии свойства X, необъясняемая внутриуровневыми связями, рамочными условиями надсистем или случайными процессами, может быть обусловлена пространственным варьированием на более низком иерархическом уровне, т.е. дисперсией подсистем (цифра 5 на рис. 8).

При реализации задачи разделения вкладов в дисперсию 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). Встает вопрос, как при бесконечном множестве характеристик геосистем отобразить наиболее существенные из них и связать с факторами среды.

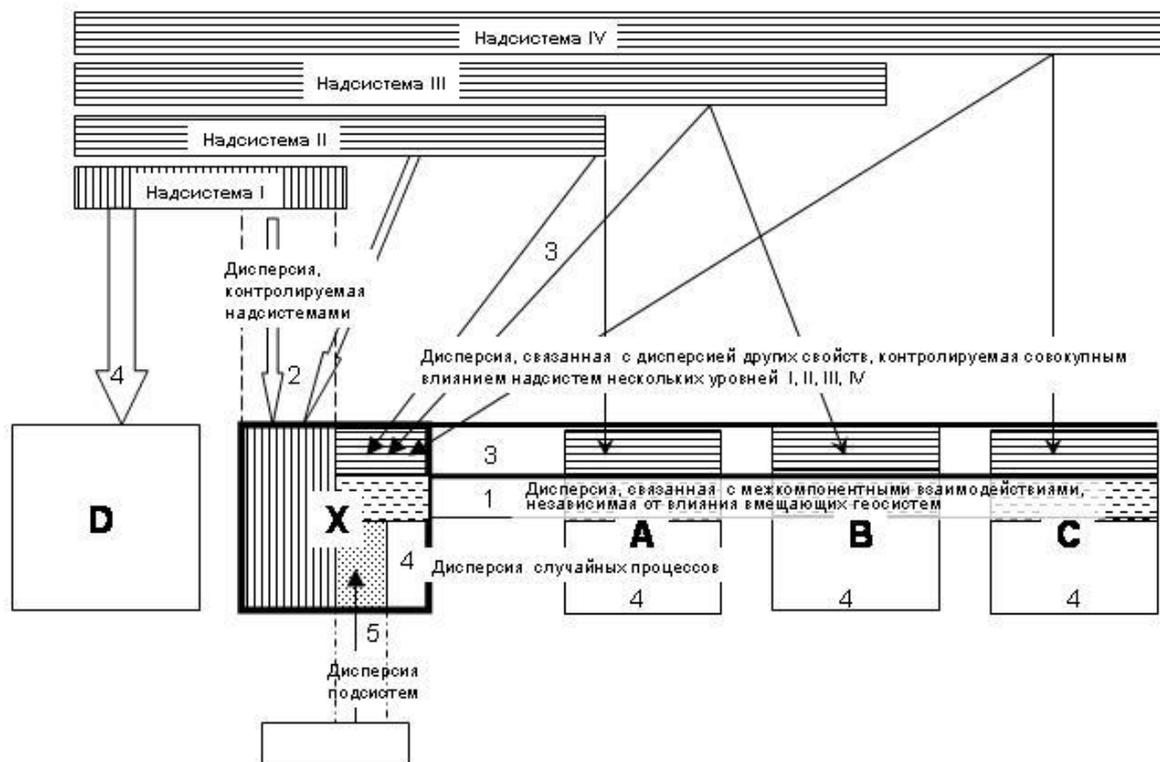


Рис. 8. Схема разделения вкладов в дисперсию свойства X. A, B, C, D – свойства других компонентов ландшафта. I, II, III, IV – вмещающие разнотипные надсистемы разных масштабных уровней, задающие диапазон допустимого варьирования для свойств. 1 – доля дисперсии, независимая от влияния вмещающих геосистем. 2 – доля дисперсии свойства X, обусловленная влиянием вмещающих геосистем одного или нескольких масштабных уровней. 3 – доля дисперсии свойства X, связанная с варьированием других свойств под влиянием вмещающих геосистем одного или нескольких масштабных уровней. 4 – доля дисперсии, обусловленная случайными процессами, независимыми от свойств других компонентов и вмещающих геосистем. 5 – доля дисперсии, обусловленная варьированием в подсистемах.

3.3. Выбор операционной территориальной единицы

3.3.1. Зависимость оценок межкомпонентных связей от размера операционной территориальной единицы

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 со 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 (Ивашугина, 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 (Д.Л. Арманд, 1975), разделить территорию на одинаковые по размеру пространственные единицы (клетки, пиксели), 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.

Термин «*операционная территориальная единица (ОТЕ)*» 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). Размер ОТЕ может быть установлен разный в зависимости от типа процессов, гипотетически ответственных за ландшафтную дифференциацию. Выбор размера ОТЕ отражает гипотезу исследователя о размере однородного участка при разных уровнях абстракции и отражает его полевой опыт распознавания средних размеров однородных ландшафтных единиц на изучаемой территории (Carlile et al., 1989; Dungan et al., 2002; Burnett, Blaschke, 2003; Wu, 2004). 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, или осредненные по внутренним элементам. Например, в таежной зоне на песчаной террасе сосновый древостой (свойство компонента «фитоценоз») может быть развит повсеместно вне зависимости от наличия микропонижения и микроповышений.

Традиционные «точки комплексного ландшафтного описания», как правило, соответствуют геосистеме ранга фации, а точнее – ее репрезентативной части. Для того чтобы установить степень подчиненности ландшафтной единицы, описываемой в полевых условиях, 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 эконем. При этом должно быть определено, для какой морфологической единицы ландшафта он репрезентативен. Данные, характеризующие более крупные геосистемы, в основном являются результатом обработки результатов маршрутных исследований, картографических или дистанционных материалов. Способ категоризации такой информации определяет выбор мельчайшей единицы, которая может быть соотнесена с тем или иным рангом морфологической единицы ландшафта.

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 ее отрезка). Таким перебором способов описания уклона высказываются три разные гипотезы о факторах, влияющих на обилие вида в конкретном месте. В первом случае это гипотеза 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.

Сопоставление тесноты межкомпонентных связей, рассчитанных при разном размере ОТЕ, позволяет сделать заключение о значимости того или иного иерархического уровня 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. Пиксели 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 содержания гумуса. Зато крупные пиксели (низкое разрешение), игнорируя информацию о различиях элементов мезорельефа, отразят контрасты склона долины по расчленению, отражающие разное геологическое строение. 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.

3.3.2. Выбор размеров операционной территориальной единицы для решения задач работы

Размер операционной территориальной единицы выбирался в зависимости от проверяемой гипотезы о масштабном уровне взаимодействия компонентов ландшафта. Каждая фацция, свойства которой были описаны в полевых условиях, рассматривалась как носитель общих свойств ОТЕ. Последняя определена как пиксел цифровой модели рельефа. Для некоторых задач исходные пиксели космических снимков с разрешением 30 м агрегировались до размера пиксела ЦМР, причем агрегированному пикселу присваивалось осредненное по исходным пикселям значение оптической плотности соответствующего канала. 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 (таблица 3). 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 фацеального, 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.

3.4. Проблема снижения размерности данных

3.4.1. Обоснование снижения размерности

Трудоемкость исследования компонентной структуры ландшафта и процессов, ответственных за ее варьирование в пространстве, обусловлена неизбежной многомерностью 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 и интеграции. 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, разработанных в математической статистике, но давно и успешно применяемые в географии, ландшафтоведении, ландшафтной экологии (Харвей, 1974; Крауклис, Евдокимова, 1975; Топчиев, 1988; Krnač, Krnačova, 1994; Cain et al., 1997; Borcard, Legendre, 2002; Пузаченко, 2004; King et al., 2004; Couteron et al., 2006; Cross, Perakis, 2011). В нашей работе используются *многомерное шкалирование и метод главных компонент*.

Результатом снижения размерности исходного массива данных является ограниченное количество новых независимых друг от друга «латентных» переменных. В нашей работе для их обозначения мы пользуемся традиционными для математической статистики терминами «фактор» и «ось». Ниже термин «*фактор*» используется, когда речь идет о собственно экологических факторах – причинах пространственных различий. Термин «*ось*» применяется, когда рассматривается совокупность количественных показателей силы проявления экологического фактора в местах полевых наблюдений. Конкретное значение показателя, т.е.

координаты описанного ПТК на оси, отражает определенное соотношение конкурирующих свойств, чувствительных к этому фактору, в конкретном месте наблюдения. Каждая из взаимно некоррелированных (ортогональных) осей интегрирует большой ряд исходных коррелированных 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; Савельев, 2004; Кирюшин и др., 1996; Хорошев, 2001). «Факторы, видоизменяющие 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, с. 280). 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.

Например, если интегральная переменная интерпретирована как ось влажности, то самые большие значения в степном ландшафте будут присвоены тем территориальным единицам, где присутствуют исключительно растения-мезофиты в максимально возможном обилии, а самые малые значения – где присутствуют только ксерофиты (рис. 9). Координаты ОТЕ на оси экологического фактора в этом случае фактически отражают результат конкурентных отношений нескольких групп элементов вертикальной структуры (видов трав) с противоположной реакцией на этот фактор. Можно говорить, что характеризуется специфический эффект – результат взаимодействия элементов заданной исследователем системы первой группы (см. раздел 3.1): преобладание одних элементов (например, видов-мезофитов) над другими элементами (видами-ксерофитами). В приведенном примере исход конкурентных отношений определяется влагообеспеченностью местообитания. Однако получена информация не о количестве влаги, а о *реакции* компонента ландшафта на этот фактор, то есть уже о межкомпонентных отношениях (в данном случае между видами и фитоценозом). Методы снижения размерности позволяют определить степень чувствительности каждого исходно измеренного свойства к соответствующему экологическому градиенту (Пузаченко, 2004). Факторная нагрузка отражает степень корреляции исходной переменной с интегральной переменной-осью. Свойства, безразличные к влажности, будут характеризоваться факторными нагрузками близкими к нулю. Свойства с высокой чувствительностью будут характеризоваться большими по модулю нагрузками. 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 (торфонакопление «выигрывает конкуренцию» с элювиально-глеевым процессом), а при усилении промывного активизируется элювиально-глеевый процесс. Как правило, наиболее значимые (первые по порядковым номерам) 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 координатами на нескольких осях. Каждая ось характеризует какой-либо из взаимонезависимых 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 торфности отражает наследие процессов седиментации разных эпох, в результате которых один сектор ландшафта сложен водноледниковыми песками, другой моренными суглинками, а третий – коренными дочетвертичными породами, отпрепарированными современной эрозией. Совокупность значений факторных нагрузок позволяет отразить подчиненность каждого свойства (например, обилия ели) нескольким ландшафтоформирующим процессам (например, торфонакоплению и трансформации света под пологом леса). Также можно установить, 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 еще и 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 присутствуют другие со сходным поведением и более устойчивые к межгодовым колебаниям. 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).

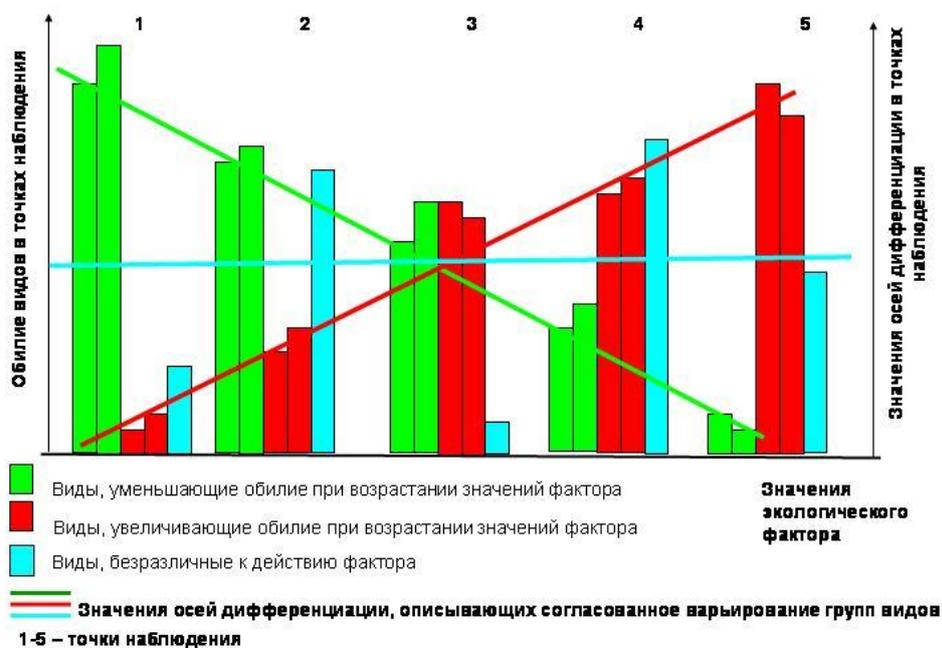


Рис. 9. Интерпретация значений оси дифференциации свойств компонентов ландшафта.

Итак, 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 можем описать ареалы, в пределах которых «работает» в той или иной степени процесс (поток), а также уверенно утверждать, что этот процесс влияет на компоненты ландшафта и отражается в значениях точно известной группы свойств.

Таким образом, отталкиваясь от значений измеренных свойств ландшафта, мы выявляем совокупность основных процессов, которые имеют системообразующее значение, то есть отражаются в свойствах компонентов и могут служить причиной их пространственной дифференциации и латеральной связи между пространственными единицами и тем самым формировать разные типы ландшафтных структур. 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.

Следующее достоинство методов снижения размерности – возможность ранжировать факторы дифференциации. Следовательно, эта группа методов адекватна такой важнейшей задаче ландшафтоведения вообще и данной работы в частности, как *ранжирование 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; Савельев, 2004; Хорошев, 2001). 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, т.е. от положения в геостационарной структуре. Но в случае выхода грунтовых вод на поверхность (участие в геоциркуляционной структуре) 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.

3.4.2. Метод снижения размерности, используемый в работе

В данной работе необходимо выявить пространственную дифференциацию отдельных свойств компонентов, подчиняющихся взаимонезависимым процессам, и на этой основе установить границы парциальных геосистем. Для этого значения осей дифференциации

рассчитаны по 8-ми группам свойств компонентов (почв, фитоценоза, почвообразующих отложений) (таблица 4).

Наиболее часто применяемый для снижения размерности метод главных компонент обычно дает искаженные результаты при сильном отклонении от нормальности, что почти всегда характерно для измеренных в поле характеристик почв и растительного покрова. По этой причине для снижения размерности исходных полевых данных нами применен метод неметрического многомерного шкалирования. Процедуры неметрического многомерного шкалирования стремятся построить такую геометрическую конфигурацию точек в пространстве заданной размерности, чтобы ранговый порядок попарных расстояний между ними, по возможности, минимально отличался от того порядка, который задан исходной матрицей попарных сравнений (Айвазян, Мхитарян, 2001). Нами расчет осуществлялся на основе таблиц непараметрических корреляций между исходными переменными.

Таблица 4. Группы показателей, объединяемые при снижении размерности массива данных для расчета значений осей дифференциации

Группы показателей		Количество исходных полевых характеристик в описываемой фации (на разных полигонах исследования)
<i>Обилие видов фитоценоза по ярусам</i>		
1	Травяной ярус	50 видов
2	Древесный ярус	10-37 видов
3	Кустарниковый ярус	10-15 видов
4	Кустарничковый ярус	7-10 видов
5	Мохово-лишайниковый ярус	3-4 видов
<i>Характеристики почв и почвообразующих отложений</i>		
6	Мощности почвенных горизонтов	10-15 измерений
7	Цветовые характеристики почвенных горизонтов (через 5 см) по Манселлу	36 измерений
8	Гранулометрический состав почв (через 5 см)	12 измерений

Опишем алгоритм решения задачи средствами программы Statistica 7.0 (рис. 10).

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:

$$\text{Phi} = \sum [d_{ij} - f(\delta_{ij})]^2,$$

где d_{ij} - воспроизведенные расстояния в пространстве заданной размерности, а δ_{ij} - исходное расстояние, $f(\delta_{ij})$ функция неметрического монотонного преобразования исходных данных (расстояний). 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, которые 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. 9). 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:

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

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).

Как правило, даже полученные таким способом латентные переменные-оси, в отличие от исходных данных, подчиняются нормальному распределению. Это позволяет на последующих этапах исследования применять широкий набор стандартных статистических методов.

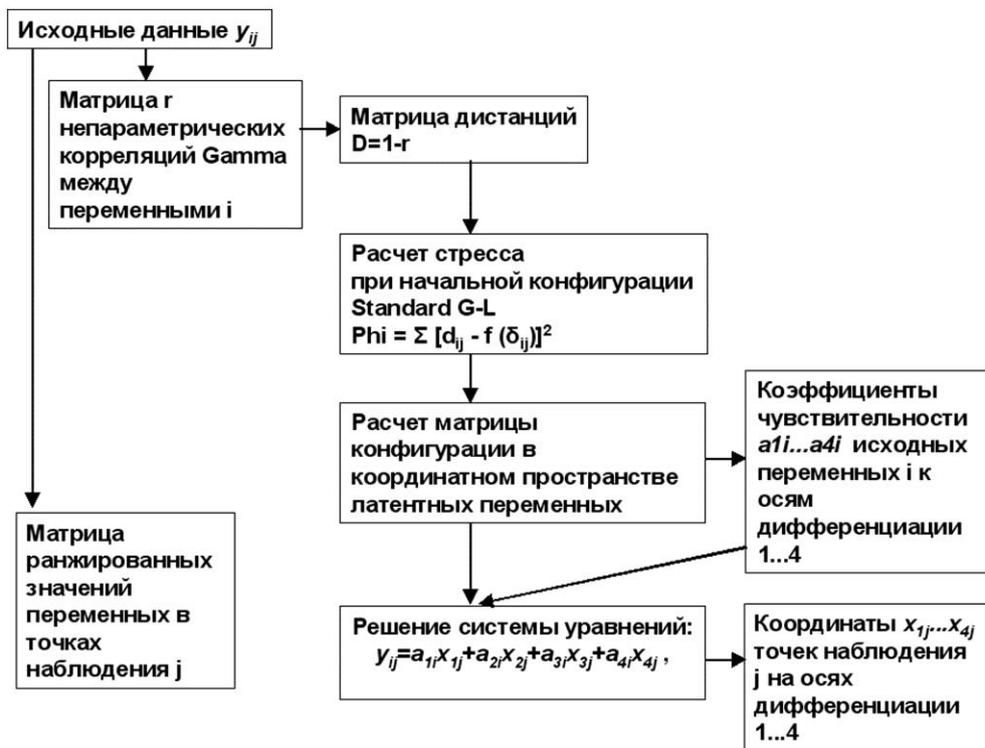


Рис. 10. Алгоритм расчета координат точек наблюдения на осях дифференциации компонентов (латентных переменных)

Для реализации задачи синтеза целостных ландшафтных структур, мы производим снижение размерности во второй итерации. Для этого свойства почв и фитоценозов, выраженные осями многомерного шкалирования, объединяются в один массив данных с морфометрическими свойствами рельефа. После этого применяется метод главных компонент. Результатом являются значения так называемых «суперфакторов» (см. раздел 3.8), отражающих согласованное варьирование свойств разных компонентов ОТЕ и свойств рельефа вмещающих геосистем, т.е. существование ландшафтных плейд.

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

3.5. Проблемы и способы интерпретации межкомпонентных связей

3.5.1. Причины варьирования тесноты связей

Выделяются четыре представления о взаимообусловленности компонентов ландшафта (Хорошев, Алещенко, 2007).

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; Müller, 2005).

Второе представление реализовано в классическом российском ландшафтоведении, особенно в концепции морфологической структуры ландшафта (Видина, 1962). По этой детерминистской концепции, некоторые компоненты жестко 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 масштабного уровня, на котором действует иной ведущий фактор дифференциации.

Третье представление реализует идею, что компоненты ландшафта связаны друг с другом не жестко (Козловский, 1970; А.Г. Исаченко, 2004). 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 масштабном уровне внутренняя дифференциация зависит от состояния какого-либо фактора (например, горной породы), но каждая комбинация 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. Вместо одной карты ландшафтных единиц требуется серия карт, отражающих степень уверенности исследователя в отнесении каждого участка территории к тому или иному классу.

Четвертое представление исходит из концепции полиструктурности и основано на допущении, что на каждом масштабном 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 масштабном уровне действуют разные виды связей между одними и теми же компонентами и за ними стоят разные процессы.

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, притом, 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

методами снижения размерности. Выявление опосредованной связи удобно тем, что позволяет делать суждения о трудноизмеримых свойствах. В приведенном примере мощность береговой линии и обилие черной ольхи в ландшафте измеряются легче и достовернее, чем уровень грунтовых вод. Простое знание экологических факторов произрастания ольхи и накопления береговой наводит на заключение о варьировании уровня грунтовых вод.

Имея статистически достоверную модель связей между характеристиками компонентов ландшафта, можно высказывать гипотезы о наличии и сущности современного или существовавшего в прошлом процесса, через который изменение состояния 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 одновременно в пространстве, но не обеспечены динамическим рядом наблюдений. Возникает целый ряд проблем (Хорошев, Алещенко, 2012).

1) Высокие показатели тесноты 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) Невозможность перебора всех возможных пар (сочетаний) свойств компонентов требует предварительной классификации свойств по характерным временам и пространствам их проявления. Наличие связи между свойствами позволяет выдвигать гипотезу о близких характерных временах процессов, порождающих их дифференциацию (которая, разумеется, не во всех случаях подтверждается).

4) 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 варибельности) на некотором иерархическом уровне организации территории.

5) 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 масштабных 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 масштабного уровня (например, типа почвообразующей породы) характерно относительно слабое варьирование свойств других компонентов. Иначе говоря, надо доказать, что на данном масштабном 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.

б) 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 для характеристики операционной единицы не только ее собственных свойств, но и свойств некоторой ее окрестности.

7) Каждая геосистема вложена в более крупную и состоит из более мелких геосистем. Поэтому возникает необходимость распознать, какие ее свойства меняются при пересечении границы соседней геосистемы того же ранга, то есть варьируют в некотором диапазоне на данном масштабном уровне, а какие – безразличны к внутриранговым различиям и заданы состоянием вышестоящей геосистемы. Иными словами, необходимо определить константы,

действующие на каждом масштабном 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). Ландшафтоведа часто обескураживает проблема «слабых» связей. Если не говорить о наиболее очевидном случае действительного отсутствия взаимодействия, то могут встречаться следующие варианты объяснения кажущихся «слабых» связей, которые обсуждаются в нижеследующих главах диссертации.

1) По мере эволюции геосистемы теснота межкомпонентных связей и математический вид зависимости меняются. Поэтому необходимо поставить вопрос о сравнении плотности внутрифитоценологических и почвенно-фитоценологических внутриуровневых 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 (Levin, 1998; Moore et al., 2009; Messier, Puettmann, 2011), то есть о стремлении компонентов системы к максимальной взаимоадаптации и возникновении эмерджентных свойств и самоорганизации в ходе эволюции, а также представление о перманентной адаптации компонентов экосистемы (Керженцев, 2006). 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 разделе 4.7 проведено сравнение тесноты связей для разных сукцессионных стадий развития лесного фитоценоза.

2) Неодинаковые характерные времена развития компонентов ландшафта обуславливают наличие «памяти» ландшафта, иначе говоря, несоответствий между изменившимися, в том числе по естественным причинам, свойствами одного компонента и сохраняющимися свойствами другого компонента (Арманд Д.Л., 1975; Геннадиев, 1990; 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 ландшафт террасы Оби, который сформировался в результате естественного послепожарного развития в течение 150 лет (раздел 2.1.2).

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.

5) Неадекватность математической модели, которая по гипотезе описывает межкомпонентную связь, может завышать или занижать показатель связи. Особенно распространены случаи, когда линейные показатели связи незначимы в то время как существует параболическая связь, а также когда редкие «выбросы» с экстремальными значениями завышают или занижают плотность связи.

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, когда 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 тесноты 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 обуславливать вариабельность состава ярусов фитоценоза, не находящую отклика в свойствах почв. Разные способы обработки почв при земледелии могут обуславливать 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.

Одна из важнейших характеристик масштаба, помимо размера ОТЕ – пространственный охват (extent) – характеризует пространство, в котором согласно гипотезе проявляется тот или иной тип внутриуровневой межкомпонентной связи. Важен, собственно говоря, не сам по себе размер пространства, на котором проверяется гипотеза, а уровень его ландшафтного разнообразия. Последний не может не быть связан с генезисом территории и, соответственно с набором палео- и современных процессов. 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; Turner, Gardner, 2015). Представляет большой интерес проблема сохранения типа отношений между компонентами ландшафта при разных уровнях ландшафтного разнообразия. Гипотезу о разнообразии можно проверять, включая в выборку для анализа 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 масштабный уровень ландшафтной организации, для которого действительна закономерность. Весьма обычна ситуация, когда связь хорошо проявляется в пределах ландшафта одного рода (например, дренированных моренных холмистых равнин), но

«растворяется» при объединении в выборку ландшафтов разных родов (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 зависимость может иметь разный вид и знак, что при объединении данных в одну выборку приводит к взаимокompенсации 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 снижения, поскольку во влажных понижениях сосна проигрывает 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. Таким образом, кажущееся «растворение» связи при увеличении территориального охвата может быть основанием для выдвижения гипотезы о существовании зависимости иного вида.

3.5.2. Используемые методы исследования межкомпонентных внутриуровневых связей

Исследование межкомпонентных внутриуровневых связей проводилось в трех вариантах: а) для пар свойств, б) для отношений индивидуального свойства с группой свойств, в) для отношений двух групп свойств.

Для пар индивидуальных свойств компонентов, выраженных через значения осей дифференциации, рассчитывались ***непараметрические корреляции (коэффициент Спирмена)***. Выбор непараметрических коэффициентов обусловлен их нечувствительностью к возможным нелинейным видам зависимости и отклонениям от нормального распределения (хотя распределение значений большинства осей, рассчитанных методом многомерного шкалирования, все-таки не отличается от нормального на основании критерия хи-квадрат).

$$R_{ij}=1-((6\sum(r_i-r_j)^2)/n^2-n),$$

где r – ранг переменной i (j), n – число наблюдений (Пузаченко, 2004).

Для исследования связей между индивидуальным свойством и группой свойств применялись ***регрессионные методы***, позволяющие оценить не только тесноту связи, но и вид зависимости.

Под видом зависимости в математико-статистической интерпретации мы подразумеваем:

- а) набор независимых переменных (например, уровень грунтовых вод), которые влияют на состояние зависимой переменной (например, обилие сосны в древостое);
- б) относительные вклады независимых переменных в состояние зависимой;
- в) степень детерминации состояния зависимой переменной совокупностью независимых переменных (доля объясненной дисперсии).

Средства статистического анализа позволяют строить и сравнивать модели внутриуровневых 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, например – при параболическом типе зависимости, когда в одном диапазоне значений предиктора связь положительная, а в другом – отрицательная (Пузаченко, 2004). Поэтому необходим метод, позволяющий описать нелинейную составляющую связей. В качестве такового нами выбран *метод «регрессии поверхности отклика»* (*Response surface regression*), являющийся разновидностью общих линейных моделей (*General linear model*). Вместо обычной модели линейной множественной регрессии

$$Y = b_0 + \sum b_n X_n \pm \varepsilon$$

применяется модель 2-й степени вида

$$Y = b_0 + \sum b_n X_n + \sum b_k X_n^2 + \sum b_z X_n X_m \pm \varepsilon$$

где Y – координата на оси дифференциации того или иного компонента ландшафта (т.е. на экологическом градиенте), $X_{n(m)}$ – координаты свойств другого компонента на значимой для него оси дифференциации, $b_{n(k,l)}$ – регрессионные коэффициенты, ε – стандартная ошибка расчета (мера случайного варьирования).

Такая модель содержит все эффекты из планов полиномиальной регрессии вплоть до 2 степени, а также 2-факторные взаимодействия предикторов. Модель регрессии квадратичной поверхности отклика позволяет выявить:

- долю объясненной дисперсии (по коэффициенту детерминации r^2);
- неаддитивные эффекты совместного действия двух факторов (по значимости коэффициентов при членах типа $b_l X_n X_m$);

- диапазоны значений свойств предиктора, при которых реакция зависимого свойства противоположна (по значимости коэффициентов при членах типа $b_k X_n^2$ и по точечным графикам);
- критические пороги резкого изменения свойств при достижении некоторого состояния предиктора.

Для ландшафтного исследования мультирегрессионные уравнения имеют ряд очевидных преимуществ. Во-первых, по знаку и модулю регрессионных коэффициентов 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, по коэффициенту детерминации R^2 можно рассчитать меру зависимости переменной Y от совокупного воздействия ряда факторов как долю объясненной дисперсии Y . В-третьих, на основании регрессионных коэффициентов возможна классификация территории по видам зависимости между свойствами. Это позволяет объективно определить значимые 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.

Коэффициенты детерминации (КД) определялись для каждой из четырех осей, характеризующих связь группы признаков (древостой, травостой, мощности почвенных горизонтов и т.д.), с совокупным действием четырех осей дифференциации каждой из остальных групп признаков. Затем осуществлялось осреднение полученных коэффициентов детерминации с целью охарактеризовать среднюю чувствительность группы признаков (по всей совокупности его свойств) к другой группе признаков. Наконец, сравнивались осредненные коэффициенты детерминации, характеризующие связи данной группы признаков со всеми остальными группами признаков (упрощенно говоря, одного компонента с другими компонентами). Определялся максимальный осредненный коэффициент детерминации среди связей данной группы признаков 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*. На схеме отражалась стрелками приоритетная межкомпонентная связь для каждой группы признаков (при близких значениях осредненного коэффициента детерминации возможны несколько приоритетных связей), делая пометку о принадлежности к региону, в котором зафиксирован данный факт. Выделялись двусторонними стрелками связи, которые для *каждой* из двух групп признаков являются *приоритетными*. Следовательно, 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 (опосредованной связью) 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.

Для определения меры сопряженности двух групп свойств, характеризующих два компонента ландшафта использованы *канонические корреляции*. Выясняется, насколько велика общность экологических факторов, управляющих свойствами двух компонентов. Это наиболее общий и наиболее грубый показатель межкомпонентных связей, но он позволяет ранжировать компоненты по степени влияния на какой-либо другой компонент и ранжировать территории исследования по степени взаимосопряженности компонентов. Сущность метода канонической корреляции состоит в установлении связей между множеством переменных Y и другим множеством переменных X , измеренных на одних и тех же объектах; эти соотношения определяются с помощью линейных комбинаций переменных X и Y , которые дают наивысшую корреляцию между этими двумя множествами (Дэвис, 1990). В нашей работе для расчета канонических корреляций использовались блоки переменных, представленные осями дифференциации для каждого из 8-ми групп признаков, перечисленных в таблице 3: древесного, травяного, кустарникового, кустарничкового, мохово-лишайникового ярусов фитоценоза, мощности почвенных горизонтов, цветовых характеристик почв и гранулометрического состава отложений.

3.6. Эффекты межкомпонентных взаимодействий

3.6.1. Прямые и опосредованные межкомпонентные связи и их пространственное варьирование

Идеологии ландшафтоведения соответствует не столько исследование попарных связей между свойствами компонентов, сколько - эмерджентных эффектов взаимодействия взаимонезависимых парциальных геосистем, что создает условия для синтеза целостных ландшафтных единиц. Следует напомнить, что свойство компонента (например, обилие видов травостоя) не все информационные сигналы от других компонентов (например, от почвы) воспринимает напрямую. Часть этих сигналов воспринимается опосредованно через «передаточное звено» (например, через древостой, который воспринимает прямой сигнал от почвы) (рис. 11). 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.

При невозможности эксперимента в природе (например, по искусственному внесению вещества в почву и наблюдению дальнейшей реакции фитоценоза) существование радиальных (вертикальных) связей между компонентами доказываются по статистическому анализу достаточно большой выборки ОТЕ. Но даже при гипотетической возможности непосредственного измерения потока вещества, например между почвой и фитоценозом, судить о возможности причинно-следственной связи между запасом вещества в почве и состоянием фитоценоза можно только на основании сравнения серии ОТЕ. Как отмечал Н.Ф. Овчинников (1969), для выявления структуры необходимо обнаружить тождество конкретных отношений в различных объектах; структура выявляется лишь как что-то общее в различных объектах; не отношения сами по себе, а именно тождественность отношений образует структуру.

Приведем пример логики модели, которая отражает зависимость свойств травостоя, чувствительных к градиенту влажности, от всей совокупности свойств древостоя. Древостой рассматривается как единое целое по отношению к отдельным видам травостоя. Безусловно, часть варьирования свойств древесного и травяного ярусов определяется влажностью почв (факторы A_1 и A_2 , соответственно, на рис. 11). 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 $A_2=f(A_1)$ два этих вида трав будут иметь противоположные факторные нагрузки по оси влажности, а две названные фации – характеризоваться противоположными высокими по модулю факторные значениями. Среди факторов дифференциации видового состава древостоя наверняка окажется один,

ответственный за варьирование в зависимости от влажности (A_1), и он будет коррелировать с осью влажности травостоя A_2 . Например, 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 $A_2=f(A_1)$, если учитывать только фактор влажности. Причиной может быть варьирование гранулометрического 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 древостоя (в том числе ось трофности B), 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 $A_2=f(A_1, B)$. 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 B на рис. 11). 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 на обилие группы травянистых видов, чувствительных в основном 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 (B), контролирующим видовой состав древостоя; модель приобретает вид $A_2=f(A_1, B, V)$.

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;

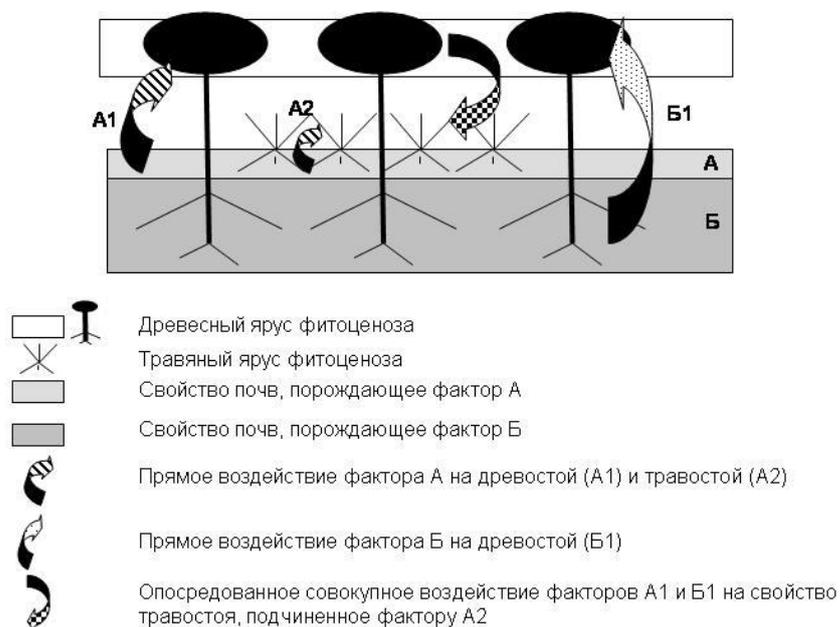


Рис. 11. Прямое и опосредованное воздействие факторов на свойства компонентов ландшафта.

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 внутриуровневых связей и в наилучшей степени служит «центральной 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 или лишь на этом фоне второстепенное значение имеет влияние других компонентов.

Итак, установлен факт наличия межкомпонентной связи и найдено уравнение, описывающее эту связь. Доказанная достоверная связь между свойствами компонентов может служить индикатором наличия единого правила внутренней дифференциации вертикальной

структуры, действующего для некоторой территории, размеры и конфигурацию которой предстоит выяснить. Здесь уместна аналогия со следующим комментарием В.В. Артюхова (2009) к понятию «система объектов-систем», введенному Ю.А. Урманцевым (1978). Гомологический ряд предельных углеводов вида CH_4 , C_2H_6 , $\text{C}_3\text{H}_8, \dots, \text{C}_n\text{C}_{2n+2}$ является системой объектов одного и того же рода – все они построены из одних и тех же первичных элементов С и Н в соответствии с одним и тем же отношением химического сродства и согласно одному и тому же закону композиции ($\text{C}_n\text{C}_{2n+2}$), ограничивающему (конкретизирующему) эти отношения. Основанием для выделения объектов-систем в системе объектов данного рода служит их принадлежность к классу углеводов. Если же изменить хотя бы закон композиции, например на C_nC_{2n} , то мы получим уже другой класс – неперелые углеводороды (Артюхов, 2009). Легко представить, что для некоторой территории может быть найдено некоторое уравнение вида $y=a+bx\pm\varepsilon$, отражающее закономерное сопряженное изменение, например, гумусированности и биопродуктивности. Тогда в качестве объекта-системы выступает ПТК с присущей ему комбинацией гумусированности и биопродуктивности. Системой объектов-систем будет группа ПТК с единым законом композиции, при котором оба показателя меняются в пространстве пропорционально (в соответствии с коэффициентом при члене b), с поправкой на некоторый вклад случайных факторов ε . Закон композиции выступает как эмерджентное свойство.

Встает задача определения границ такой «системы объектов-систем». В географии пространственная целостность объекта, по В.Н. Солнцеву (1981), устанавливается на основании, по крайней мере, четырех критериев: 1) общих размеров, зафиксированных в характере внешних границ; 2) внутренней структуры, отраженной в геометрической упорядоченности внутреннего пространства; 3) внешней структуры, запечатленной в структуре непосредственных связей с ближней контактной средой существования; 4) структурного положения в окружающем мире, выраженного в структуре опосредованных связей с дальней дистанционной средой существования (с. 193).

Само разнообразие свойств каждого компонента при достоверной связи между ними доказывает наличие внутренней дифференциации геосистемы, то есть наличие подсистем. Известно, что для существования геосистем более низкого уровня в пределах данной геосистемы они должны иметь более значительные пространственные различия между собой по сравнению с фоновыми градиентами (Боков, 1990). Обнаружение единого правила межкомпонентной связи доказывает единство внутренне мозаичной 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. Единообразный тип связей интерпретируется как единство системообразующего процесса, разные количественные уровни проявления которого создают мозаичность пространственных единиц. Одновременная включенность ландшафтных комплексов в разные системы комплексов более крупного ранга осуществляется благодаря потокам вещества и энергии, имеющим разные пространственно-временные масштабы функционирования (Боков, 1990). Поэтому, разумеется, системообразующих процессов множество, и они действуют в разных масштабах. Наблюдаемое значение каждого свойства рассматривается как результат наложения результатов действия разномасштабных процессов, схематически изображенного на рис. 12. Следующая задача исследователя – определить границы ареала проявления каждого процесса, условия его проявления и установить свойства ландшафта, контролируемые каждым из процессов.



Рис. 12. Схема наложения действия разномасштабных факторов дифференциации и формирования результирующих значений признаков компонентов ландшафта. Каждый фактор варьирует в пространстве со своей частотой на некотором участке ландшафта. Измеренное в поле значение признака является интегральным показателем, отражающим комбинированный эффект разномасштабных факторов.

В свое время в ландшафтоведении и биогеографии предлагался термин «характерное пространство» геосистемы (Пашенко, 1990, 1993; Тишков, 2016). В связи с поставленной задачей в нашей работе предлагается понятие *характерное пространство «внутриуровневых» межкомпонентных связей*, близкое англоязычному понятию «*characteristic space scale*», которое расширяет существующие представления о характерном пространстве. Оно определяется:

- а) размером операционной территориальной единицы,
- б) размером мозаичной территории (геохоры), в пределах которой значения группы свойств сопряженно варьируют в пространстве под действием единого фактора, что описывается единым уравнением (в системной терминологии – единым законом композиции).

Рост качества статистической модели при исключении части данных из выборки свидетельствует о возрастании однородности оставшихся данных в том смысле, что существует единое правило, объясняющее внутренние различия («закон композиции», в терминологии теории систем Ю.А. Урманцева). Следовательно, существует геосистема с единым системообразующим процессом. Снижение качества модели свидетельствует о том, что среди оставшихся данных нет строгого взаимосоответствия компонентов.

Возьмем для примера модель почвенно-фитоценологических связей в некоторой паре свойств (рис. 13), измеренных в 6-ти индивидуальных ПТК (уровень 0), например, глубины оподзоливания и проективного покрытия мхов. Низкое качество первоначальной модели для высокого иерархического уровня 2 (рис. 13, А) свидетельствует об отсутствии единого правила, которое связывает два свойства в шести геосистемах уровня 0. Из этого следует, что парциальная геосистема, объединяющая эти два свойства, на уровне 2 фактически не существует, так как нет единого процесса, обуславливающего 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. 13). Если же качество модели для уровня 2 было изначально высоким (рис. 13, 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) строгого взаимосоответствия компонентов нет. Применительно к ландшафтным объектам, а конкретнее – к модели почвенно-фитоценологических 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.

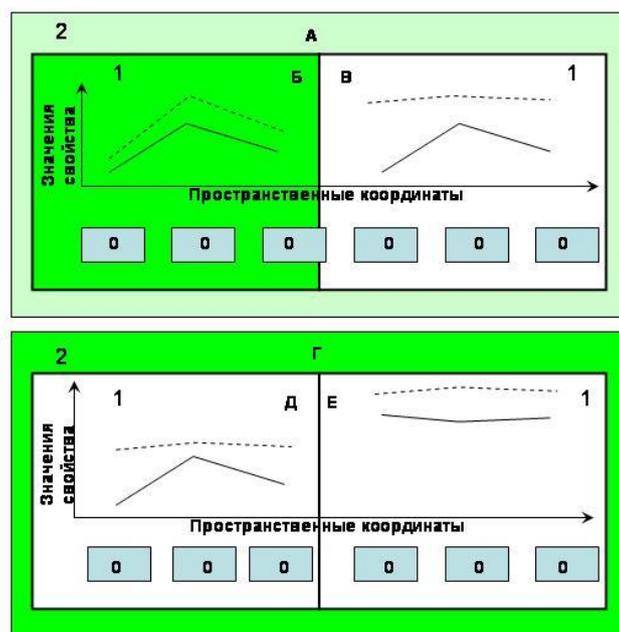


Рис. 13. Влияние уровня ландшафтного разнообразия, охваченного выборкой, на результат оценки тесноты межкомпонентных связей. Сплошная и пунктирная линии – два свойства компонентов ландшафта, варьирующие между геосистемами уровня 0 в пространстве геосистемы уровня 1. На верхнем рисунке – связь слабая для уровня 2 (модель А, голубой фон); сильная – в одной из геосистем уровня 1, (модель Б, зеленый фон); отсутствует в другой геосистеме уровня 1 (модель В, 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 (зеленый фон).

Группу ПТК, которые объединяются в мозаичную геосистему с единым видом зависимости, мы интерпретируем как «парагенетическую геохору» (рис. 14). Такая система 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 системы однородные в буквальном смысле (одного рода, т.е. с общим эффектом сопряжения) упоминается в работах А.Ю. Ретеюма (2006), М.Д. Гродзинского (2014). Интегрирующую роль в геосистеме с единым типом межкомпонентных отношений и математическим видом зависимости играет радиальный поток вещества, связывающий почвообразующие отложения, грунтовые воды, почвы и фитоценоз. Однако мощность этого потока различается в пространстве; результатом являются

различия вертикальной структуры в пространстве. Границы разнотипных парагенетических геохор (с разными видами зависимости) могут совпадать или не совпадать в пространстве. Парагенетические геохоры одного типа могут не покрывать все пространство ландшафта. Таковы некоторые формы проявления полиструктурности ландшафта, анализируемые в данном исследовании.

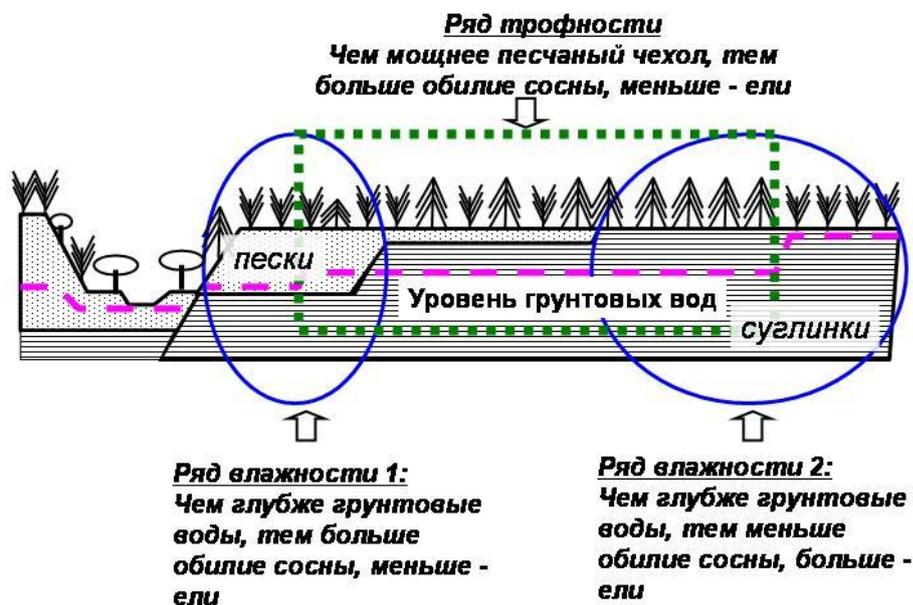


Рис. 14. Полиструктурность ландшафта и парагенетические геохоры. Соотношение обилия ели и сосны в древостое контролируется двумя факторами: влажности и трофности. Границы разнотипных парагенетических геохор показаны разными геометрическими фигурами с цветным окаймлением. Границы однотипных геохор, но с разными видами зависимости, показаны овалами с синим окаймлением.

3.6.2. Применяемые методы выявления совокупных эффектов воздействия группы свойств и границ геосистем с единым видом зависимости между свойствами

Сравнение качества (коэффициентов детерминации и уровня значимости) регрессионных уравнений межкомпонентных связей первой и второй степени проводилось для оценки дополнительного вклада в объяснение дисперсии Y составляющих типа $b_1X_nX_m$ (неаддитивная составляющая) и типа $b_kX_n^2$ (параболическая составляющая). Визуализация таких эффектов проводилась средствами построения трехмерных контурных графиков (*3D contour plot*)

Варьирование состава выборки применено для определения иерархического уровня геосистем, на котором проявляется межкомпонентная связь, и для описания диапазона ландшафтных условий, при которых она реализуется. Сформулируем вопрос следующим

образом: при каких условиях свойства одного компонента зависят от свойств другого, а при каких – не зависят (то есть доминирует вклад иных, более сильных, факторов). Во-первых, можно увеличить или уменьшить территориальный охват, исходя из гипотезы связи между размером территории и ландшафтным разнообразием. После этого производится перерасчет модели и оценка приращения или падения ее качества по коэффициенту детерминации R^2 . Во-вторых, можно сравнивать качество моделей, построенных для разных типологических категорий ПТК. Этот путь применялся в исследованиях Института географии СО РАН в 1970-х гг. (Крауклис, Евдокимова, 1975).

Варьирование состава выборки позволяет найти тот иерархический уровень и ту группу ландшафтных условий, при которых связи наиболее тесны, т.е. когда в уравнении $Y = b_0 + \sum b_n X_n + \sum b_k X_n^2 + \sum b_z X_n X_m \pm \varepsilon$ коэффициент детерминации R^2 максимален (стремится к 1), регрессионные коэффициенты b значимы, а ошибка p минимальна и не превышает 5%. Можно менять содержание выборки, что отражает изменение анализируемого уровня ландшафтного разнообразия, и сравнивать качество полученных моделей. Высокая теснота связей интерпретировалась как показатель взаимоадаптированности компонентов геосистем в пределах геосистемы некоторого более высокого ранга. Мозаичность последней обусловлена существованием того или иного градиента, контролирующего сопряженное изменение свойств. Этот метод позволяет выявить типологическую принадлежность геосистемы, в которой существует единый внутренний фактор дифференциации и, соответственно, ее ареал.

В работе сравнение качества моделей межкомпонентных связей, полученных для разных уровней ландшафтного разнообразия, представлено в разделе 4.3. Варьирование состава выборки использовано также в разделе 4.7 для сравнения тесноты связей на разных сукцессионных стадиях.

Анализ «остатков» (residuals) регрессионных уравнений использован для выявления группы геосистем, которая в наилучшей степени с минимальными отклонениями подчиняется выявленной зависимости. Разумеется, это имеет смысл только при общем высоком качестве модели. Предметом анализа является разность между значениями свойства, наблюдаемыми в природе и предсказанными регрессионной моделью.

Получив уравнение связи исследуемого свойства с группой других свойств, мы получаем возможность отделить 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 интервале между нижним и верхним квартилями. Территории, в пределах которых разности между наблюдаемыми и предсказанными значениями близки к 0, интерпретируются

как обладающие хорошей взаимной адаптацией компонентов по какому-либо экологическому градиенту. Они считались принадлежащими единой парагенетической геохоре, в которой выдерживается правило подчинения исследуемого свойства процессу или явлению. Территории с большими остатками интерпретируются как не обладающие взаимoadaptацией данных свойств.

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 выбивается из общего ряда и имеет гипертрофированное обилие какого-либо вида или, наоборот, обилие существенно меньшее, чем ожидается по гипотезе. Для решения этой задачи в основном применялся дисперсионный анализ, где группирующая дискретная переменная – типы ландшафтных условий (почвообразующие породы, мезоформы рельефа и т.п.), а зависимая (континуальная) переменная – значения остатков уравнения. Критериями значимости ландшафтных условий служили значение F -критерия и соответствующий уровень значимости p -level. Группы ландшафтных условий, при которых остатки близки к нулю или сильно отклоняются от нуля, определялись визуально по графику *Box plot*. При этом использовались тесты для значимости попарных различий двух групп: *LSD* (при близком количестве наблюдений в группах) либо *Newman-Keuls* (при различающемся количестве наблюдений в группах). Для ряда задач использовалось построение точечных графиков (*Scatterplot*), показывающих в каком диапазоне значений некоторой континуальной переменной (например, уровня грунтовых вод) остатки уравнения наиболее часто близки к нулю.

Итак, моделирование внутриуровневых межкомпонентных связей позволяет оценить соотношение внутрифитоценологических и почвенно-фитоценологических связей, а также комбинированные 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.

3.7 Эффекты взаимодействия геосистем разных масштабных уровней

3.7.1. Обоснование понятия «резонансное пространство межуровневых связей»

Ключевым сюжетом диссертационного исследования является возникновение в ПТК специфического свойства в результате взаимодействия большой группы соседствующих ПТК, образующих вмещающую геосистему. В качестве основного критерия рассматривалось наличие единого вида зависимости между свойством каждой ОТЕ (как носителя свойств ПТК) и некоторой характеристикой разнообразия вмещающей геосистемы. Отношения ОТЕ и вмещающей геосистемы характеризуют систему четвертой группы (см. раздел 3.1) со связями субординации. Объединение подобных систем в серию с единым видом зависимости образует систему пятой группы – геохору (см. раздел 3.1). Внутреннее варьирование внутри такой геосистемы связано либо с ослабевающим в том или ином направлении воздействием потока вещества (например, потока грунтовых вод) на почвенно-растительный покров, либо с разной мощностью характерного для геосистемы вертикального потока вещества (например, элементов минерального питания из почв к фитоценозу и обратно).

Приведем несколько хронологических характеристик ландшафта, которые могут определять мощность и направленность радиальных и латеральных потоков вещества (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 и тем слабее их влияние на почвенно-растительный покров»).

б) 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 и тем меньше их вклад в перенос вещества (семян, частиц почвы и т.п.)»).

в) Соотношение лесных и безлесных элементов геосистемы определяет эмерджентное свойство «степень зарегулированности поверхностного стока» («чем ближе соотношение к 1:1, тем равномернее сток, тем реже происходит отложение наилка на высокой пойме и тем реже происходит обрушение крутых склонов террас»).

г) Соотношение заболоченных и дренированных элементов геосистемы определяет эмерджентное свойство «водный баланс» («чем меньше болот, тем меньше расход влаги на испарение и больше – на сток и тем активнее латеральный перенос ионов и наносов»).

д) 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 может быть иллюстрирован количественной характеристикой пространственной структуры геосистемы, которая учитывает взаимовлияние элементов, положение элемента в географическом контексте, вклад элементов в функционирование целостной геосистемы.

Представленная работа ограничивается анализом *лишь одной из перечисленных возможных характеристик пространственной структуры вмещающей геосистемы – мозаичности рельефа* – как свойства геосистемы, налагающего ограничения на диапазон допустимых состояний ее пространственных элементов. Меры мозаичности рельефа выступают как предикторы в уравнениях межуровневых связей субординации («целое влияет на часть»), предлагаемых как способ трансляции информации с высокого уровня на низкий.

Значение свойства, измеренное в ОТЕ, в нашей работе считается не только продуктом радиальных межкомпонентных связей, но и проявлением физического поля, существующего во вмещающей геосистеме. В этом аспекте количественная характеристика свойства рассматривается как потенциал поля (А.Д. Арманд, 1975б), обусловленного информационным и вещественным взаимодействием элементов вмещающей геосистемы. Размеры вмещающей геосистемы определяются суммой площадей пространственных единиц (ОТЕ), которые в совокупности определяют потенциал поля свойства для ОТЕ, расположенной в центре такой геосистемы.

В дальнейшем из широкого набора возможных характеристик вмещающей геосистемы мы выбрали для анализа морфометрические характеристики рельефа. Делается предположение, что если изменятся (в нашем случае – в пространстве, но возможно – и во времени) некоторые характеристики рельефа в окрестности ОТЕ, то должны измениться и свойства самой ОТЕ. Набор «проверяемых» характеристик рельефа может быть широкий, но статистические средства позволяют отобрать только те из них, которые значимо связаны с собственными свойствами ОТЕ. Проверяемый набор характеристик рельефа должен отражать гипотезу о возможных механизмах влияния на ОТЕ. В нашей работе отобраны характеристики расчлененности и кривизны. Расчлененность и кривизна описывают комбинацию форм рельефа, которая имеет значение для дальнейших рассуждений в трех аспектах:

- 1) как индикатор трехмерного геологического тела (результата потоков вещества прошлых эпох) и современных радиальных потоков элементов минерального питания;
- 2) как условие современных латеральных потоков воды, наносов, растворенного вещества;

3) как условие антропогенной активности, в том числе влияющей на степень сохранности зональных фитоценозов и пространственное распределение стадий сукцессии.

Далее необходимо будет определить размер такой окрестности, которая передает в ОТЕ информацию о допустимом диапазоне значений свойств.

Разумеется, вывод о трансляции информации от одного масштабного уровня к другому можно будет делать только на основании исследования достаточно большой выборки данных. Предметом исследования будет существование статистически значимых отношений операционных территориальных единиц и геосистем в их окрестностях. Вмещающую геосистему (уровень «+1») со свойственным ей размером, свойства и процессы которой налагают ограничения на возможные состояния свойств ОТЕ (уровень «0»), метафорически 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 геосистем более крупного размера ту, которой она «согласна» подчиняться, информацию (рамочные условия) от которой «усваивает». Сходным образом вопрос ставится в ландшафтной экологии при исследованиях состояния популяций животных (Szabo, Meszema, 2006; Weaver et al., 2012). 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 тесноты связей, перебирая размеры окрестности, что позволит выявить «резонансный» уровень. В нашей работе осуществляется второй из этих способов. Мы характеризуем ОТЕ не только ее собственными свойствами (например, видовым составом фитоценоза), но и свойствами, которые ей заданы «сверху». Например, характеристикой ОТЕ, сопоставимой по размерам с фацией (метры – десятки метров), является принадлежность не только 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 функционирования 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, мы получаем возможность оценить связи его со средой на нескольких масштабных уровнях. Если увеличить окрестность, то тем самым высказывается гипотеза о том, что наша фация зависит от геосистемы более крупной, необязательно «вписывающейся» в иерархию традиционных морфологических единиц. 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 разработанного подхода служит положение, что изначально размеры вмещающих геосистем неизвестны и для разных свойств могут быть значимы геосистемы разных типов (рис. 15, А). Принципиально важно, что значимые процессы во вмещающих геосистемах могут иметь разную природу; поэтому вмещающие геосистемы необязательно вложены друг в друга как части матрешки. По этой причине для обозначения их неодинаковых размеров автор использует термин «масштабный уровень», а не более привычный (но неадекватный в данном контексте) термин «иерархический уровень». Затем выдвигается и проверяется серия гипотез о размерах вмещающих геосистем (рис. 15, Б, уровни 1–5). Далее, составляются модели, связывающих координаты ОТЕ на каждой оси дифференциации (см. раздел 3.4) (серые кружки на рис. 15, Б), с морфометрическими свойствами окрестностей разного размера поочередно (уровни 1–5). Сравнение качества моделей позволяет принять решение о том, какие из гипотетических вмещающих геосистем реально создают рамочные условия для каждого свойства или группы взаимосвязанных свойств. Та окрестность ОТЕ, при которой зависимость ее свойств от рельефа окрестностей (в одном из трех вышеперечисленных аспектов) максимальна, интерпретируется как «резонансное пространство» межуровневых 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. На выходе анализа будет получена классификация свойств компонентов ландшафта по чувствительности к свойствам окрестностей разного размера, а, следовательно, и к процессам, ответственным за обособление вмещающих геосистем (рис. 15, В). Это дает основания для соотнесения характеристик ландшафта с масштабными уровнями организации парциальных геосистем. Совпадение характерного пространства реализации межкомпонентных связей у некоторой группы 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.

Зная, что к определенному 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 к процессам именно такого масштабного уровня «привязано» варьирование в пространстве ряда свойств компонентной структуры ландшафта. Влияние рельефа на почвенно-растительный покров 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). 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).

Если при выбранных параметрах ЦМР и размере ОТЕ для всех свойств размер вмещающей геосистемы оказался бы один и тот же, то этот случай соответствовал бы строгой детерминированности всех свойств единственным экологическим фактором, действующим на соответствующем масштабном уровне. Тогда действительно можно было бы уподоблять ландшафтную организацию «матрешке» со строгой вложенностью одного уровня в другой, т.е. говорить об иерархии как таковой.

Однако в силу разного характерного времени компонентов ландшафта (Арманд, Таргульян, 1974; Delcourt et al., 1983; Сысуев, 2003; Turner, Gardner, 2015) 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) разных масштабных уровней, необязательно находящихся в отношениях подчинения друг другу. В разработанном подходе (рис. 8, рис. 15) принципиальны следующие положения, исходящие из признания полиструктурной и полимасштабной организации ландшафта:

1) Масштабные уровни организации заранее не постулируются, но выявляются на основе связей свойств ОТЕ со свойствами гипотетических надсистем.

2) Надсистемы разных масштабных уровней независимы друг от друга, так как формируются процессами с разными характерными временами и пространствами.

3) Компонент необязательно всеми свойствами реагирует на каждый масштабный уровень надсистем.

4) Свойство компонента может подчиняться нескольким масштабным уровням надсистем.

5) Группа свойств, контролируемых одним и тем же уровнем надсистемы, образует парциальную геосистему.

6) Подчиненность группы свойств одному уровню надсистем трактуется как проявление общего для этой группы контролирующего процесса.

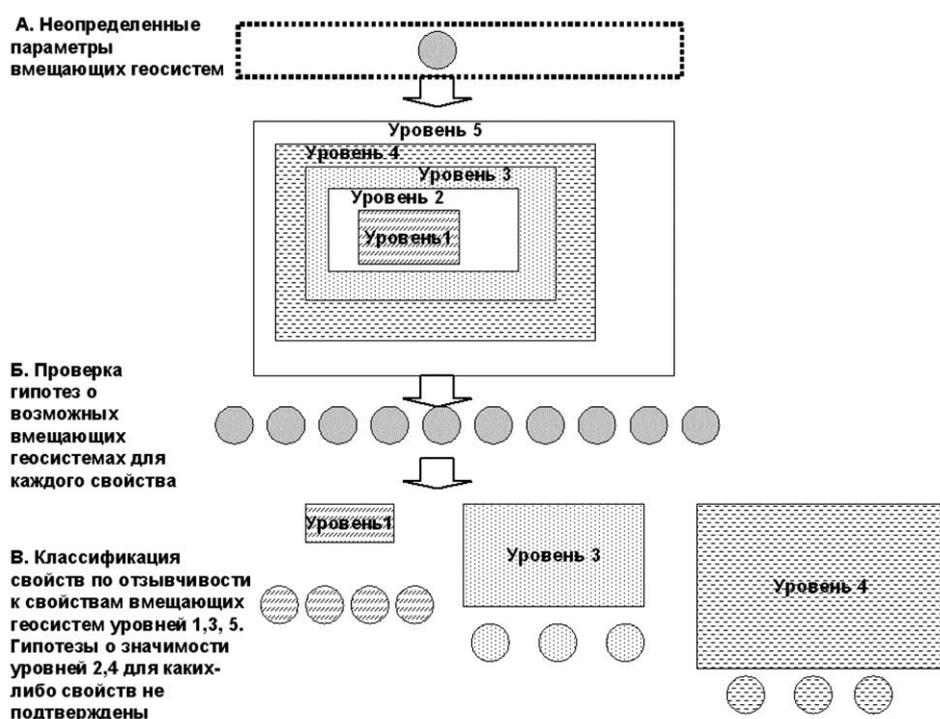


Рис. 15. Модель перебора гипотез о размерах вмещающей геосистемы и определения резонансного уровня для каждого свойства. Серые кружки – свойства компонентов ландшафта, кружки со штриховками – то же, но с установленной подчиненностью одному или нескольким масштабным уровням вмещающих геосистем. Заштрихованные прямоугольники – масштабные уровни вмещающих геосистем с известными размерами, для которых доказана подчиненность некоторых свойств компонентов. Незаштрихованные прямоугольники – масштабные уровни гипотетических вмещающих геосистем, которые незначимы ни для одного из исследуемых свойств компонентов.

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. Природу и время проявления процесса (прошлое или современность), связанного с варьированием рельефа в пространстве того или иного размера, в большинстве случаев можно в первом приближении оценить из анализа набора форм рельефа со свойственными морфометрическими характеристиками (рис. 16). Так, в пределах равнинного региона амплитуды высот в несколько десятков метров и размеры форм рельефа порядка нескольких километров в большинстве случаев соответствуют наследию неотектонических движений и разрывных нарушений высокого порядка. Амплитуды порядка метров и размеры порядка сотен метров адекватны наследию или современному воздействию эрозионных, карстовых, ледниково-аккумулятивных процессов. Амплитуды в пределах десятков сантиметров и размеры порядка десятков 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 гранулометрического состава отложений, а также распространения гидрографических объектов.

Поскольку связь можно выявить только на основании большого количества пространственных единиц, то параллельно мы выявляем *ареал ОТЕ с единым видом зависимости между свойствами*, одно из которых считается зависимым от потоков во вмещающей геосистеме (например, грунтовых вод), а другое – результатом адаптации к первому (например – соотношение ели и сосны). Между пространственными единицами необязательно существуют латеральные связи, но вид зависимости от свойств вмещающей геосистемы постояен. Это системы 5-й группы из перечисленных в разделе 3.1.2. Особые свойства ОТЕ возникают как результат процессов в геосистеме более высокого ранга, контролируемых комбинацией форм рельефа. Внутри такой мозаичной (иногда даже весьма контрастной по диапазону свойств) геосистемы действует единый фактор дифференциации ОТЕ с разной силой влияния на разных участках.

Как и в случае с внутриуровневыми связями (разделы 3.6.1, 3.6.2), в пределах геосистемы с единым видом зависимости реакция компонента ландшафта на количественное изменение организующего фактора должна выражаться одной и той же функцией. Применяя математическую терминологию, можно сказать, что границы таких геосистем определяются по изменению знака и/или величины производной функции, описывающей сопряженное изменение свойств в пространстве.

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 фитоценоза на рассеяние или аккумуляцию вещества в процессе латерального 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 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.

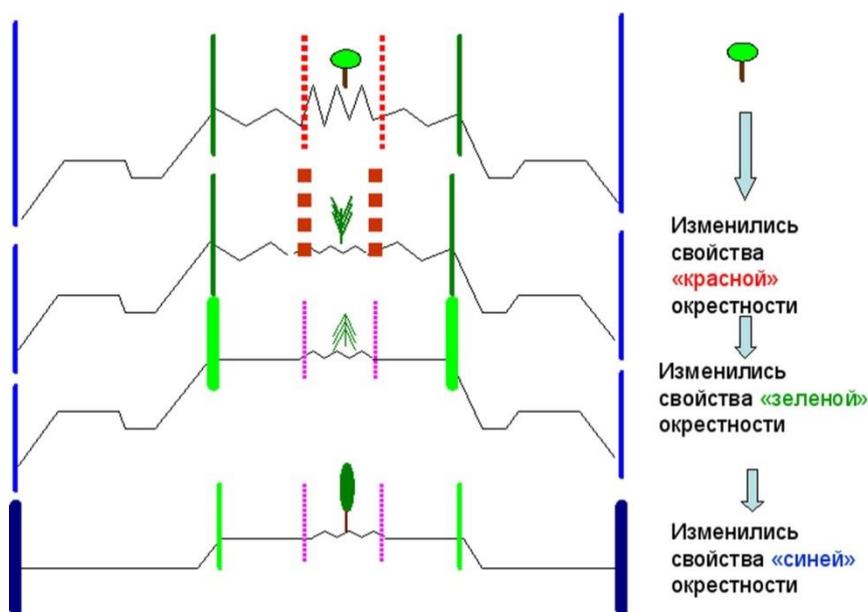


Рис. 16. Морфометрические характеристики окрестности как индикатор ландшафтоформирующего процесса. Проверяется гипотеза, что свойство ПТК (показанное символическим изображением лесобразующей породы) меняется согласованно со свойствами некоторой окрестности.

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 (Лурье, 2008). Зависимой переменной является свойство растительного покрова, измеренное по

космическому снимку в ОТЕ, предикторами (независимыми переменными) – морфометрические свойства рельефа в некоторой окрестности ОТЕ. Расчет ведется для массива, включающего все пиксели внутри окна. Размер окна отражает гипотезу о масштабном уровне мозаичной геосистемы с единым типом отношений между слоями, т.е. компонентами ландшафта. Результат расчета присваивается центральному пикселу окна. После получения результатов окно смещается на одну ОТЕ (пиксел) и результат перерасчета присваивается соседнему пикселу. Таким образом, каждый пиксел характеризуется набором параметров модели (например, коэффициентов регрессионного уравнения и долей объясненной дисперсии). Классификация пикселей (ОТЕ) по параметрам модели позволяет выделить на территории ареалы с разными видами зависимости между их собственными свойствами и свойствами вмещающей геосистемы.

Предлагаемый подход по смыслу близок к методу географически взвешенной регрессии, который может интерпретироваться как частный случай регрессионных моделей при предположении, что коэффициенты не являются постоянными в пространстве, а плавно изменяются по территории (Балаш и др., 2011). При применении географически взвешенной регрессии задают предельно допустимую удаленность, т.е. некоторое фиксированное расстояние, относительно которого определяют категорию ближайшего соседа. Предельное расстояние от точки (в нашем случае – ОТЕ), при котором влияние всех соседей считается одинаковым, носит название ширины окна, или полосы пропускания; весовой коэффициент принимается за 1, а для точек за пределами окна – за 0 (Балаш и др., 2011). В наших расчетах считается, что внутри такого окна вклад всех ОТЕ в формирование некоторого общего свойства одинаков в том смысле, что при изменении свойств любой из них ОТЕ, расположенная в центре окна, тоже приобретет другие свойства. Можно подобрать такой размер скользящего окна, при котором коэффициент детерминации регрессионного уравнения будет максимален. Таким способом может быть установлен размер пространственной единицы, в пределах которой компоненты связаны по единому правилу.

Решение задачи таким способом позволяет выявлять разнообразие факторов организующих территорию на заданном масштабном уровне. Об этом можно судить по неодинаковым вкладам переменных-предикторов на разных участках территории, которые описываются регрессионными коэффициентами. Например, уровень грунтовых вод фации определяется степенью расчлененности урочища, и эта закономерность проявляется в пределах некоторой местности. 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 гранулометрическим составом отложений.

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 необходимость сравнить вид и качество мультирегрессионных уравнений, которые получены для ОТЕ разных размеров. Каждый пиксел-ОТЕ, сопоставимый по размерам с урочищем, можно представить как совокупность вложенных в него более мелких пикселов (операционных единиц более детального масштаба, например, сопоставимых с фацией) (рис. 17). Каждый из пикселов-«фаций» испытывает влияние соседних «фаций», составляющих вместе более крупный пиксел-«урочище»; в свою очередь, каждый пиксел-«урочище» испытывает влияние соседних «урочищ», что отображено стрелками разной толщины на рис. 17. На примере традиционных морфологических единиц вопрос можно сформулировать следующим образом: если фация по некоторому правилу (которое отражается математическим видом зависимости) зависит от свойств урочища в пределах местности, то зависит ли урочище от свойств местности по такому же правилу или по другому? Повторяется ли такой вид зависимости в пределах всего ландшафта или только некоторой группы местностей? Предметом анализа становится совпадение или несовпадение правила пространственной дифференциации на уровне урочища и на уровне вложенных в него фаций. Несовпадение видов зависимости на разных иерархических уровнях означает смену фактора дифференциации, совпадение же может указывать на сходство физической сути разномасштабных процессов. 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). Иначе говоря, мы определяем, каков размер геосистемы (уровень «+2») с единым типом отношений между свойствами операционной территориальной единицы (уровень «0») и свойствами вмещающей геосистемы (уровень «+1») (рис. 17). Геосистема такого размера (уровень «+2») составляет *характерное пространство «межуровневых» связей*.

Возможны несколько вариантов выявления иерархической организации межкомпонентных отношений.

1) Один и тот же вид зависимости проявляется при расчете модели для окрестностей нескольких размеров. Только один из масштабных уровней, 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 уровнями. Уменьшение значения коэффициента детерминации означает, что данное пространство охватывает либо лишь часть

территории, в которой реально проявляется данный вид зависимости, либо часть территории с принципиально другим видом зависимости.

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 видом зависимости). Частный случай – когда связь одного и того же типа проявляется для нескольких масштабных уровней, разделенных некоторым диапазоном уровней, в которых отношения данного типа не реализуются.

3) Вид зависимости меняется при переходе от одного масштабного уровня к другому. Этот случай соответствует иерархической организации межкомпонентных отношений при наличии специфического ведущего фактора ландшафтной организации для каждого масштабного уровня. Такой вариант в целом соответствует традиционному пониманию иерархической организации ландшафта.

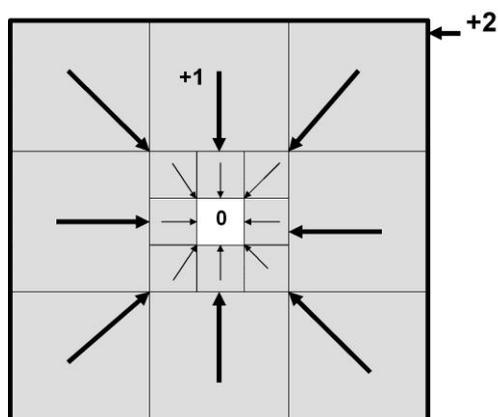


Рис. 17. Полимасштабная организация межуровневых связей. Геосистемы уровня «0» контролируются совокупным воздействием (тонкие стрелки) соседних подобных геосистем, которые вместе составляют геосистему уровня «+1». Геосистемы уровня «+1» контролируются совокупным воздействием (толстые стрелки) соседних подобных геосистем, которые вместе составляют геосистему уровня «+2».

Итак, необходимо проверять гипотезу, что вид 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. Допустим, установлено, что в пределах системы террас существует общая закономерность возрастания влажности по мере приближения к реке. Нижняя терраса в целом влажнее, чем верхняя, потому что 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.

Под полимасштабной организацией географического ландшафта в дальнейшем будем понимать одновременное подчинение свойств компонентов разномасштабным процессам и явлениям в геосистемах разных типов, что выражается в устойчивой взаимозависимости масштабных уровней.

Полимасштабная организация ландшафта может характеризоваться в нескольких аспектах.

1) Подчиненность разных свойств компонентов ландшафта процессам разного масштаба. Объективная привязка групп свойств к масштабным 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 обуславливает 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 вида зависимостей между компонентами и стоящих за ними процессов в геосистемах разных масштабных 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, центральным предметом анализа межуровневых взаимодействий становятся вклады разных гипотетических масштабных уровней вмещающих геосистем и существование одного или нескольких масштабных уровней, контролирующих свойства ОТЕ. Центральным предметом анализа внутриуровневых взаимодействий становятся соотношение внутрифитоценологических и почвенно-фитоценологических связей, а также комбинированные эффекты взаимодействия независимых парциальных ландшафтных структур.

3.7.2. Методы выявления резонансного пространства межуровневых связей и ареалов проявления видов зависимостей

Морфометрические характеристики рельефа, использованные для построения моделей межуровневых связей.

Пространственная структура вмещающей геосистемы описывалась с использованием следующих морфометрических характеристик рельефа:

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

Чтобы описать интегральные свойства мозаичной геосистемы, которая включает в себе операционную территориальную единицу и создает для нее рамочные условия функционирования, нужен простой и емкий показатель, отражающий её внутреннее разнообразие. Наиболее широко применяются показатели кривизн, которые хорошо описывают условия аккумуляции и рассеяния вещества (Сысуюев, 2003), в том числе перераспределения влаги, которому придается ключевое значение в данном исследовании. Когда выдвинута гипотеза о размере вмещающей геосистемы, то, чтобы описать ее форму кривизнами, приходится применять большой набор кривизн, рассчитанных для всех возможных вариантов окрестностей. При этом можно потерять информацию о внутреннем устройстве геосистемы (плотность и глубина эрозионных форм, совокупность бугров и западин, перегибов рельефа склонов и др.), а, следовательно – 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.

Для определения информативности показателей вертикальной и горизонтальной расчлененности при описания распределения гиротопов были использованы данные 309 измерений уровня грунтовых вод на полигоне «Трансект» в Архангельской области. Для каждой точки наблюдения рассчитаны вертикальная и горизонтальная расчлененность в квадратной окрестности с разной длиной стороны при размере ОТЕ 400 м. Рассчитаны непараметрические коэффициенты корреляции Спирмена между уровнем грунтовых вод в летний период и показателями расчлененности (таблица 5). Обнаружена достоверная зависимость: чем больше стандартное отклонение высот и сумма длин тальвегов, тем глубже уровень грунтовых вод. Это позволяет рассматривать вертикальную и горизонтальную расчлененность рельефа вмещающей геосистемы как условие формирования поля влажности в ландшафте и, следовательно, тех или иных гиротопов в ОТЕ.

Метод «резонансных уровней» предложен для определения масштабных уровней вмещающих геосистем, свойства которых контролируют состояние геосистемы анализируемого ранга. Этот метод выполняет ключевую роль в решении основных задач работы. Строятся уравнения «регрессии поверхности отклика» вида:

$$Y = b_0 + \sum b_n X_n + \sum b_k X_n^2 + \sum b_z X_n X_m \pm \varepsilon \quad (1)$$

где Y – координата на оси дифференциации того или иного компонента ландшафта (т.е. на экологическом градиенте), $X_{n(m)}$ – морфометрические характеристики рельефа в окрестности, размер которой отражает гипотезу о размере вышестоящей контролирующей геосистемы, $b_{n(k,l)}$ – регрессионные коэффициенты, ε – стандартная ошибка расчета (мера случайного варьирования).

Для определения «резонансного уровня» вмещающих геосистем сравнивались коэффициенты детерминации R^2 , полученные в уравнениях (1) при разных размерах квадратных окрестностей (рис. 18). Морфометрические характеристики рельефа рассчитывались для квадратных окрестностей, сторона которых в 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 раз превышала размер стороны ОТЕ. Например, если сторона ОТЕ 400 м, то отдельные уравнения строились для окрестностей со стороной 1200, 2000, 2800, 3600, 4400, 5200, 6000 м. В качестве «резонансного уровня» принималось максимальное значение коэффициента детерминации среди серии уравнений. Метод позволяет установить набор свойств компонентов, которые сходны по чувствительности к одному и тому же масштабному уровню вмещающих геосистем. Поэтому такой набор свойств может быть положен в основу содержательной ландшафтной интерпретации классов геосистем, выделенных по сходству морфометрических характеристик рельефа в «резонансной» окрестности.

Таблица 5. Непараметрические коэффициенты корреляции Спирмена между глубиной залегания верховодки в летний период и показателями расчлененности рельефа. Среднетаежный полигон «Трансект» (Архангельская область)

Морфометрическая характеристика рельефа окрестности	Корреляция Спирмена с глубиной верховодки
Вертикальная расчлененность, окрестность 1200 м	0.611759
Горизонтальная расчлененность, окрестность 1200 м	0.618792
Вертикальная расчлененность, окрестность 2000 м	0.554323
Горизонтальная расчлененность, окрестность 2000 м	0.486946
Вертикальная расчлененность, окрестность 2800 м	0.421984
Горизонтальная расчлененность, окрестность 2800 м	0.479695
Вертикальная расчлененность, окрестность 3600 м	0.411317
Горизонтальная расчлененность, окрестность 3600 м	0.485759
Вертикальная расчлененность, окрестность 6000 м	0.490568
Горизонтальная расчлененность, окрестность 6000 м	0.514507

Варьирование разрешения цифровой модели рельефа использовано для определения иерархического уровня геосистемы, который чувствителен к характеристикам вмещающей геосистемы. Метод решает обратную задачу по отношению к методу резонансных уровней посредством того же уравнения. Подлежат сравнению модели связей того же вида (рис. 18), построенные для ОТЕ разного размера (разрешения цифровой модели рельефа или космического снимка) при одинаковом размере контролирующей вмещающей геосистемы.

Метод расчета варьирующих регрессионных коэффициентов и классификация пространственных единиц по регрессионным коэффициентам. Метод позволяет разделить территорию на геосистемы с единством типа отношений между компонентами, для которых имеются континуальные данные (Хорошев, Алещенко, 2005, 2007, 2008). Он является новым для русскоязычной литературы, англоязычные аналоги автору также неизвестны. Хорошо известны методы выявления иерархических уровней организации какой-либо одной характеристики. В них индикатором перехода на новый уровень считается резкий рост дисперсии при достижении некоторого порога территориального охвата (Turner et al., 2001; Hay et al., 2002). В нашей работе решается более сложная задача: анализируется сопряженное изменение в пространстве сразу нескольких свойств. Возможность пространственного анализа коэффициентов мультирегрессионных зависимостей, реализованный, по предложению автора, Г.М. Алещенко 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 тесноту связей для каждого участка ландшафта, но и сопоставить по модулю и по знаку вклады нескольких гипотетических факторов в варьирование зависимой переменной.

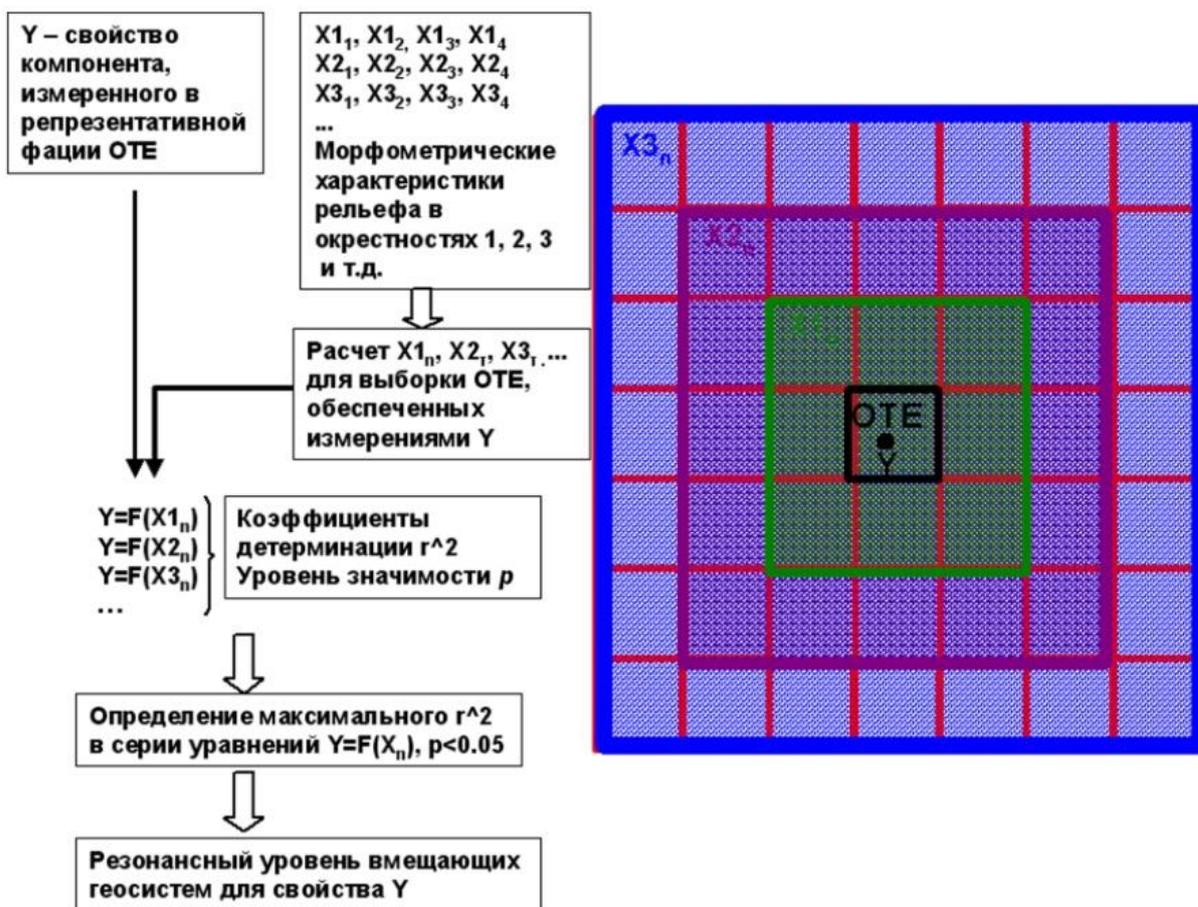


Рис. 18. Процедура выявления резонансного уровня вмещающих геосистем по цифровой модели рельефа и значениям свойств компонентов ландшафта. ОТЕ – операционная территориальная единица. Y – свойство компонента, измеренное в репрезентативной фации ОТЕ. $X_1, X_2, X_3 \dots$ – размеры окрестностей. X_{1n}, X_{2n}, X_{3n} – морфометрические характеристики рельефа (вертикальная расчлененность, горизонтальная расчлененность, вертикальная кривизна, горизонтальная кривизна), рассчитанные для квадратных окрестностей ОТЕ с размерами, соответственно, X_1, X_2, X_3 . $Y=F(X_{1n}), Y=F(X_{2n}), Y=F(X_{3n})$ функция связи, выраженная уравнением «регрессии поверхности отклика».

В нашей работе основным предметом исследования стала зависимость свойств растительного покрова, оцененных по многоканальному космическому снимку, от

морфометрических характеристик рельефа окрестности варьирующего размера. Предварительно значения оптических плотностей разных каналов космического снимка были преобразованы методом главных компонент во взаимонезависимые факторы дифференциации, каждая из которых отражает одно из свойств растительного покрова (рис. 19). Из свойств мы основное внимание уделяли чувствительности растительного покрова к влажности местообитания.

Основная задача решается путем построения серии линейных мультирегрессионных уравнений вида

$$Y = b_0 + \sum b_n X_n \pm \varepsilon \quad (2)$$

где Y – координата на оси дифференциации того или иного компонента ландшафта (т.е. на экологическом градиенте), X_n – морфометрические характеристики рельефа в окрестности, размер которой отражает гипотезу о размере вышестоящей контролирующей геосистемы, b_n – регрессионные коэффициенты, ε – стандартная ошибка расчета (мера случайного варьирования).

Построение линейных регрессионных уравнений, включает расчет: а) регрессионных коэффициентов и свободного члена; б) стандартизованных коэффициентов регрессии ВЕТА, которые поддаются сравнению как коэффициенты чувствительности отклика к каждому из предикторов (характеристик рельефа); в) коэффициента детерминации R^2 ; г) меры отклонения наблюдаемого свойства от рассчитанного по уравнению (остаток).

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. Условием существования геохоры считалось наличие в некотором компактном ареале единого правила, по которому свойства ОТЕ связаны со свойствами вмещающей ее окрестности (рис. 19).

Каждый пиксел изображения рассматривается как операционная территориальная единица (ОТЕ), сопоставимая примерно с природно-территориальным комплексом ранга фации, подурочища или урочища (в зависимости от разрешения используемой ЦМР). Каждая ОТЕ в этом ареале характеризуется собственными свойствами фитоценоза по космоснимку (зависимая переменная - один из факторов дифференциации фитоценоза) и четырьмя вышеназванными морфометрическими характеристиками рельефа заданной квадратной окрестности (независимые переменные). Строится серия линейных регрессионных уравнений, связывающих свойства ОТЕ с морфометрическими свойствами рельефа окрестности. В выборку включаются все ОТЕ в заданном квадратном ареале, т.е. в предполагаемой геохоре (рис. 19). Перерасчет модели ведется в скользящем квадрате. Центальному пикселу

присваивается численная оценка тесноты связи и регрессионные коэффициенты, полученные в выборке в границах заданного ареала. Показателем качества статистической модели считалось значение коэффициента детерминации $R^2 \rightarrow 1$ при значении ошибки первого рода $p < 0.05$. Затем ведется серия перерасчетов для других размеров окрестностей и для геохор других размеров. Как и в методе резонансных уровней, значительное превышение значения коэффициента детерминации модели, составленной для какой-либо окрестности, по сравнению с моделями для окрестностей других размеров, индицирует приоритетную подчиненность исследуемого свойства ОТЕ свойствам геосистемы данного размера. Основным результатом – ответ на следующий вопрос: выдерживается ли в заданном ареале (геохоре) единое правило подчинения компактной группы ОТЕ вмещающим геосистемам. В геохоре, если она существует (т. е. установлена достоверная связь), варьирование объясняется разными количественными уровнями проявления единого фактора. Ее составные части находятся в едином факторально-динамическом ряду. Поэтому считается, что серия геосистем (ОТЕ и ее окрестность) образует *парагенетическую систему – геохору*: она мозаична, но правило внутренней дифференциации едино.

Описанная процедура позволяет отразить на карте варьирование тесноты межуровневых связей по территории исследования и указать, где компоненты наиболее жестко адаптированы друг к другу. Однако территориальная близость участков с высоким коэффициентом детерминации еще не гарантирует, что вид зависимости на этих участках один и тот же. Эта проблема решается классификацией ОТЕ по значениям регрессионных коэффициентов. Применялась дихотомическая классификация стандартизованных коэффициентов регрессии ВЕТА по метрике Евклида методом к-средних (рис. 19). Таким способом устанавливалась общность ОТЕ не только по факту существования связи между растительностью и рельефом в заданном квадрате, но и по виду зависимости, т. е. по классу комбинаций регрессионных коэффициентов. Фактически выявляются геохоры, различные по набору факторов внутренней дифференциации.

Применяя описанный метод, мы сталкиваемся с проблемой корректного разграничения ареалов с разными типами межкомпонентных отношений. Она возникает из-за того, что результат классификации ОТЕ 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.

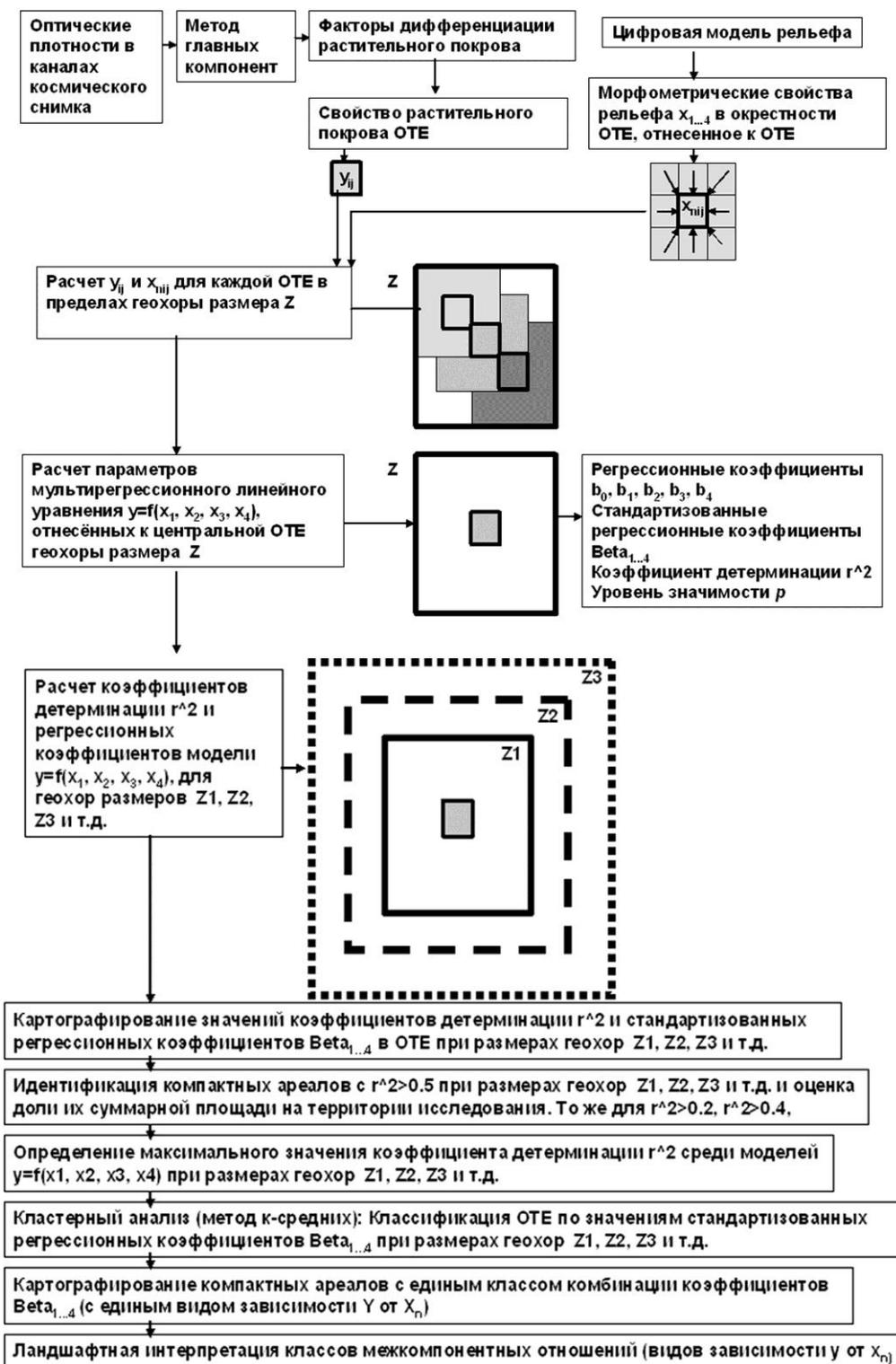


Рис. 19. Процедура выявления ареалов классов межкомпонентных отношений для континуальных данных.

3.8. Проблема разделения вкладов внутриуровневых и межуровневых связей

3.8.1. Основные составляющие пространственного варьирования свойств компонентов ландшафта

Конкретное измеренное значение свойства ландшафта (обилие вида, мощность почвенного горизонта и т.д.), как правило, отражает результат суперпозиции множества факторов (В.Н. Солнцев, 1997). Большинство характеристик ландшафта, так или иначе, связано друг с другом. Поэтому измеренное значение не дает однозначной информации об истинном положении точки на оси экологического фактора (например, на оси 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. Однако отклик компонента ландшафта на внешний фактор может быть не только прямой, но и опосредованный. Проиллюстрируем это положение на примере восточноевропейской тайги, где, помимо бореальных, могут спорадически встречаться неморальные виды трав. Прямой отклик может быть выражен 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 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 и почвообразующими отложениями 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 и 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, следует определить вклад варьирования, связанного с рамочными условиями со стороны геосистемы более высокого ранга. Рельеф (в приведенном выше примере – «крутой склон») рассматривается не только как собственная характеристика ПТК, но и как косвенная характеристика геосистемы более высокого ранга (наличие долины), обуславливающая

определенные константы в свойствах заключенных в ней ПТК. Важен при этом не сам рельеф как таковой, а процессы, ход которых контролируется его свойствами (например, интенсивный латеральный отток влаги с крутого склона) или контролировался в прошлом, но унаследован современными характеристиками ландшафта. Если несколько урочищ принадлежат одной геосистеме более высокого ранга, то всем им присущ некоторый общий диапазон допустимой вариабельности свойств. В то же время они могут выстраиваться в факторально-динамические ряды и образовывать пространственную мозаику.

Во-вторых, следует оценить *составляющую саморазвития* – результат варьирования под действием радиальных связей с другими компонентами. Однако сложность состоит в том, что и эти 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 различать (рис. 8): а) варьирование, зависимое от вышестоящей геосистемы (зависимость от свойств пространства), и б) независимое от окружающего пространства сопряженное варьирование двух свойств, отражающее их взаимовлияние (обратная связь) или одностороннее влияние (прямая связь).

В качестве способа решения проблемы разделения вкладов детерминированных свойств и саморазвития предлагается построение единого факторного пространства для объединенного массива данных о координатах ОТЕ на «осях» дифференциации компонентов и о свойствах рельефа разномасштабных вмещающих геосистем. Тогда методом главных компонент можно установить группы свойств, управляемые некоррелированными факторами (латентными переменными). Ограничения на допустимость применения этого метода частично снимаются тем, что переменные-«оси», в отличие от исходных данных, уже приведены к нормальному распределению. Это условие применения метода (Шитиков и др., 2005). В нашем случае оно обеспечено результатами многомерного шкалирования. Сущность метода главных компонент заключается в представлении исходных показателей X в виде некоторой совокупности латентных переменных F без существенной потери содержательной информации, содержащейся в исходных данных. В основу метода главных компонент положено, что латентные переменные являются линейной комбинацией исходных показателей:

$$X_j = \sum_{k=1}^p a_{jk} F_{kj}$$

где F_k – главные компоненты, a_{jk} – факторные нагрузки (Шитиков и др., 2005). В нашем случае исходными показателями X_j выступают значения осей дифференциации компонентов, полученные на вышеописанном этапе методом многомерного шкалирования, т.е. меры чувствительности компонентов к экологическим факторам.

Из них нас интересуют группы свойств, варьирующих в пространстве сопряженно с рельефом вышестоящих геосистем, и варьирующих независимо от него (рис. 20).

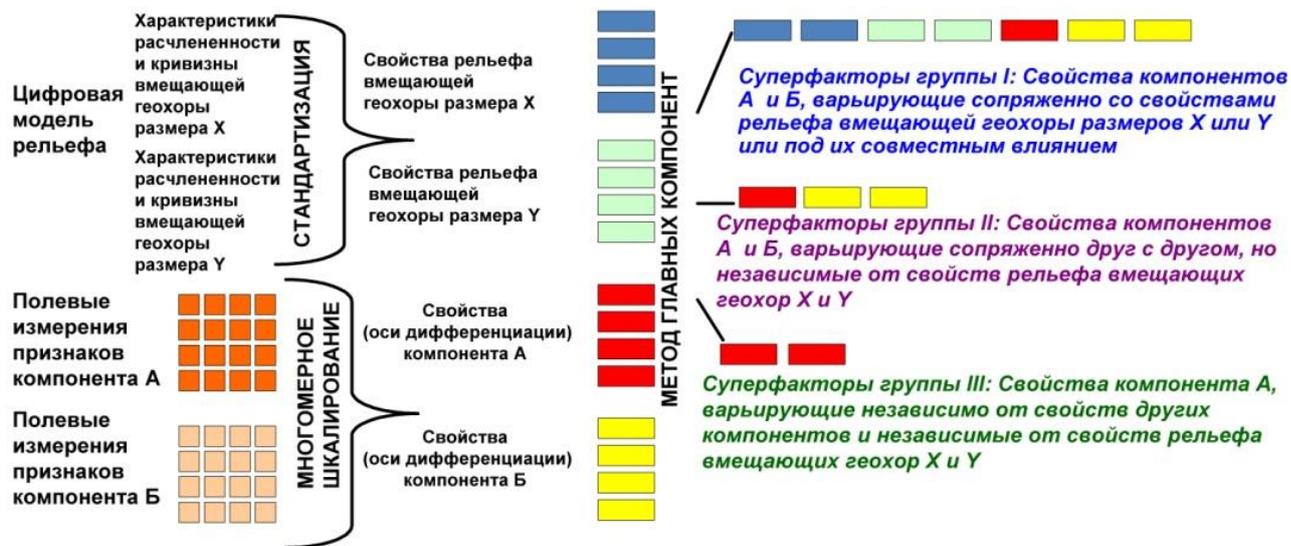


Рис. 20. Схема разделения вкладов факторов варьирования свойств компонентов

Метод главных компонент позволяет для объединенного массива данных выделить новые латентные переменные – некоррелированные (!) интегральные «суперфакторы». Они являются линейными комбинациями переменных-осей. Объясним принцип объединения всех суперфакторов в три группы (рис. 20).

Первая группа суперфакторов объединяется высокими факторными нагрузками для морфометрических характеристик рельефа вмещающих геосистем и некоторых почвенно-фитоценологических свойств ландшафта, зафиксированных в пределах ОТЕ. Эти суперфакторы отражают сопряженное варьирование свойств, контролируемых *межуровневыми связями, т.е. зависимыми от свойств вмещающих геосистем*. Вторая группа суперфакторов должна иметь близкие к нулю факторные нагрузки для морфометрических характеристик рельефа (т.е. быть безразличной к ним), но большие по модулю факторные нагрузки для почвенно-фитоценологических свойств, измеренных в ОТЕ. Эта группа отражает *внутриуровневые межкомпонентные радиальные взаимодействия в геосистемах, независимые от вмещающих геосистем*.

Некоторые свойства компонентов могут иметь высокие нагрузки по обоим группам суперфакторов, что должно отражать их участие как в межкомпонентных отношениях, 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 радиальных вещественно-энергетических потоков. Наконец, часть свойств может варьировать исключительно под

влиянием зависимых от рельефа процессов. Таким образом, мы можем разделить и количественно сравнить долю варьирования каждого свойства, связанную с рельефом вмещающих геосистем, и долю, обусловленную собственно межкомпонентными (радиальными) связями на уровне фации (внутрифитоценоотическими, почвенно-фитоценоотическими, почвенно-литологическими и др.).

Возможна и третья группа суперфакторов. Она может объединять свойства одного компонента, варьирующие независимо от других компонентов, т.е. вследствие саморазвития этого компонента или случайных факторов.

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

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

1) Значения тесноты связей. Если исследование связей проводится методами регрессионного анализа, то коэффициент детерминации – доля объясненного варьирования. Так как невысокие показатели тесноты связи необязательно означают слабую физическую связь или ее отсутствие (см. раздел 3.5), то они могут быть интерпретированы в более общем виде: *на данном масштабном 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) Совпадение резонансных пространств 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 общего для них процесса. Генезис определяет сочетание форм рельефа вмещающей геосистемы, которые вместе задают допустимый диапазон значений свойств ОТЕ. Например, уровень дренированности задает максимально допустимую мощность торфяного горизонта. 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 окажется, то придется признать, что генезис рельефа имеет лишь ограниченное выборочное «давление» на отдельные свойства. Тогда генетический принцип ландшафтного картографирования нецелесообразно использовать как

основной для данной территории. В таком случае больше оснований для ландшафтного картографирования на основе представления о полиструктурности.

3) Единственность или множественность резонансных масштабных уровней для свойств. Единственный резонансный уровень свидетельствует о масштабной специфичности процесса, ответственного за дифференциацию значений свойства. Второй случай может свидетельствовать о множественности и разномасштабности управляющих процессов либо 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.

4) Наличие и вклад в пространственное варьирование 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.

На основании реализованной программы становится возможным заключение о соотношении значимости почвенно-фитоценотических и внутрифитоценотических связей и о том, насколько жестко измеренные свойства детерминированы морфолитогенной основой ландшафта.

3.8.2. Метод разделения вкладов внутриуровневых и межуровневых связей

Метод «суперфакторов» (рис. 14) предложен 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 (Хорошев, 2014 б). В таблице 6 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.

Когда получены уравнения, связывающие каждое свойство с обеими группами суперфакторов, переходим к поиску ответа на следующие три вопроса:

1) Какая группа факторов вносит более значимый вклад в варьирование свойства: обусловленных морфолитогенными свойствами вмещающих геосистем или обусловленных межкомпонентными взаимодействиями независимо от вмещающих геосистем?

2) Создает ли комбинированное влияние вмещающих геосистем нескольких масштабных уровней более значимый эффект для варьирования свойства, чем эффект каждой из вмещающих геосистем по отдельности?

3) Создает ли комбинированное влияние группы компонентов более значимый эффект для варьирования свойства, чем эффект каждого из компонентов по отдельности?

Для решения этих вопросов производится сравнение коэффициентов детерминации мультирегрессионных моделей (этапы 5, 8, 9 в таблице 6). Наиболее ожидаемы следующие варианты (все рассуждения – при условии статистической значимости коэффициента детерминации при $p < 0,05$).

Этап 5 (таблица 6). Первый вариант: коэффициент детерминации уравнения I больше коэффициента детерминации уравнения II. Следовательно, свойство d_{1a} варьирует в пространстве в зависимости от состояния рельефа и сопряженных с ним процессов вмещающей геосистемы или совокупности вмещающих геосистем нескольких масштабных уровней. Второй вариант: коэффициент детерминации уравнения I меньше коэффициента детерминации уравнения II. Следовательно, варьирование свойства d_{1a} в пространстве определяется исключительно взаимодействиями компонентов на локальном уровне, соответствующем заданному размеру ОТЕ.

Этап 8 (таблица 6). Первый вариант для уравнения I: Коэффициент детерминации уравнения I выше, чем любой из коэффициентов детерминации уравнений группы III, несмотря на неизбежную потерю части информации при выделении суперфакторов методом главных компонент. Тогда значения свойства d_{1a} определяется комбинированным эффектом одновременно действующих процессов нескольких масштабных уровней. Второй вариант для уравнения I: Коэффициент детерминации уравнения I ниже, чем какой-либо из коэффициентов детерминации уравнений группы III. Тогда подтверждается гипотеза о доминирующем влиянии вмещающей геосистемы одного масштабного уровня; комбинированный эффект совокупного влияния геосистем нескольких масштабных уровней отсутствует.

Этап 9 (таблица 6). Первый вариант для уравнения II: коэффициент детерминации уравнения II, выше, чем любой из коэффициентов детерминации уравнений группы IV, несмотря на неизбежную потерю части информации при выделении суперфакторов методом главных компонент. Следовательно, парные межкомпонентные взаимодействия слабее, чем комбинированный эффект совместного влияния нескольких компонентов. Второй вариант для уравнения II: коэффициент детерминации уравнения II ниже, чем коэффициент детерминации какого-либо из уравнений группы IV. Следовательно, парные межкомпонентные взаимодействия сильные; комбинированный эффект совместного влияния нескольких компонентов не выражен.

Таблица 6. Алгоритм разделения вкладов внутриуровневых и межуровневых взаимодействий методом «суперфакторов» и выявления комбинированных эффектов воздействия компонентов и вмещающих геосистем.

Шаг	Процедура	Результат
1	Выделение независимых факторов дифференциации свойств компонентов методом многомерного шкалирования	Оси дифференциации компонентов, полученные методом многомерного шкалирования $d1a, d2a, d3a, d1b, d2b, d3b, d1c, d2c, d3c$, где d-оси; a, b, c – компоненты ландшафта.
2	Расчет морфометрических характеристик рельефа для разных окрестностей пиксела (ОТЕ), заключающего описанную в поле фацию.	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)
3	Метод главных компонент Исходные переменные: $d1a, d2a, d3a, d1b, d2b, d3b, d1c, d2c, d3c, A1, A2, A3, B1, B2, B3$.	Значения взаимонезависимых «суперфакторов» $F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8$ для каждой точки описания
4	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)
5	Составление двух моделей «регрессии поверхности отклика» для каждого свойства, например: (I) $d1a = \Phi(F1, F2, F6, F8)$ – модель вклада рельефа совокупности вмещающих геосистем (II) $d1a = \Phi(F3, F4, F5, F7)$ – модель вклада совокупности других свойств фитоценоза, почв, отложений, независимых от рельефа вмещающих геосистем	Сравнение качества моделей I и II по коэффициенту детерминации (при условии их статистической достоверности, $p < 0,05$).
6	Составление серии моделей «регрессии поверхности отклика» (III) $D1a = F(z_1, z_2, z_3, z_4)$ для окрестностей X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 , где z_n – морфометрические характеристики рельефа в окрестности X_k	Коэффициенты детерминации моделей группы III

Шаг	Процедура	Результат
7	Составление серии моделей «регрессии поверхности отклика»: (IV) $D1a=F(c_1, c_2, c_3, c_4)$ для компонентов L_1, L_2, \dots, L_m , где c_n – оси дифференциации компонента L_m	Коэффициенты детерминации моделей группы IV
8	Проверка гипотезы о наличии комбинированных эффектов совместного влияния вмещающих геосистем нескольких иерархических уровней на свойство $d1a$	Сравнение коэффициента детерминации уравнения I с коэффициентами детерминации каждого из уравнений группы III
9	Проверка гипотезы о наличии комбинированных эффектов совместного влияния группы свойств компонентов	Сравнение коэффициента детерминации уравнения II с коэффициентами детерминации каждого из уравнений группы IV

3.9. Программа синтеза парциальных геосистем

Ландшафтная карта, как правило, показывает наиболее устойчивые взаимно детерминированные комбинации свойств компонентов. Степень взаимной адаптации компонентов, выраженная через критерии статистически достоверной связи, рассматривается как один из возможных критериев устойчивости к внешним воздействиям (Дьяконов, Иванов, 1991; Гродзинский, 1995). 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 (Wood, Bowman, 2012).

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 хвойно-широколиственных 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. Пример того, как лесная растительность сама создает благоприятные почвенные условия для собственного восстановления после пожаров, приводят австралийские исследователи (Wood, Bowman, 2012). Следует заметить, что условием восстановления после нарушений является наличие инертных свойств почв и почвообразующих пород с характерным временем, превышающим время релаксации фитоценоза. Разница характерных времен – это защита структуры 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, гранулометрический состав почв и почвообразующих пород, структурность почв) сохраняют предпосылки восстановления исходного состояния ландшафта. Следовательно, в процедуру картографирования ландшафта должны 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; г) идентификация переходных зон, где сочетаются свойства сразу нескольких соседних элементов. Для переходных зон возможно несколько устойчивых состояний (пластичность). Такие зоны 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). Поэтому их следует считать наиболее неравновесными, с минимальной инертностью, низкой эластичностью, высокой пластичностью.

Разумеется, такая трактовка должна производиться с большой осторожностью, поскольку существует и другая причина несоответствий между свойствами компонентов – различные динамические (серийные) состояния одного и того же ландшафта в пределах исследуемой территории. Наиболее очевидный случай – разнообразие стадий сукцессии растительности после каких-либо нарушений. 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.

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 А, В, их отдельные свойства строчными буквами, например а – обилие видов древесного яруса, b – обилие видов кустарникового яруса, с – обилие видов травяного яруса и т.д. Каждый ярус управляется осями 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» каждая из осей. Допустим, одна из осей дифференциации древесного яруса подчиняется геосистемам уровня I (Aa1-I), другая – геосистемам уровня II (Aa2-II), а из осей дифференциации кустарникового яруса один подчиняется геосистемам уровня III (Ab1-III), а два других – уровня I (Ab1-I, Ab2-I). Две оси 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 информативные 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 оказываются 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 масштабных 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.

Одновременное проявление в ландшафте и наложение трех типов парциальных структур (геостационарной, геодинамической и биоциркуляционной, в терминологии В.Н. Солнцева, 1997) подводит нас к серьезной проблеме выбора между континуальной и дискретной моделями пространственной организации ландшафта. Геостационарные структуры, как следует уже из названия, формируются наиболее инертными свойствами ландшафта. При ненарушенном климаксом состоянии ландшафта можно ожидать формирования резких границ в силу длительного периода адаптации мобильных компонентов. В качестве оснований для разграничения геостационарных структур (традиционных объектов генетико-морфологического ландшафтоведения) в зависимости использовались: границы форм мезорельефа или микрорельефа (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. Однако морфолитогенные границы далеко не всегда резкие. 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), на чем особенно настаивает А.Н. Ласточкин (2011) при разработке теории геосистем, 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).

Из концепции полиструктурности и полимасштабности ландшафта следует, что вряд ли существуют однозначно жесткие основания для выделения ландшафтных границ, которые были бы значимы для абсолютно всех свойств ландшафта. Поскольку один из важнейших смыслов ландшафтно-географического исследования состоит в выявлении и разграничении на местности (картографировании) целостных природных систем, разработана следующая программа синтеза парциальных геосистем. Эта программа включает процедуры, описанные в предыдущих разделах работы, и предусматривает некоторые дополнительные расчеты. Реализация программы рассмотрена в разделе 4.8.

На первом шаге идентифицируем парциальные геосистемы по принципу *приоритетной отзывчивости* некоторой группы свойств почвенно-растительного покрова (ПРП) к *одному и тому же масштабному 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 можно отнести к группе дедуктивных. Выдвигается гипотеза о

существовании некоторого масштабного уровня организации рельефа и соответствующего 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 масштабного уровня.

Целесообразное количество классов рельефа определяется *методом дискриминантного анализа* по перегибам графика зависимости «количество классов – доля корректно классифицированных ПТК». В качестве группирующих переменных задаются классы рельефа. 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 которых свойства почв и растительности точно распознаются заданными классами рельефа). 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 гипотезы о причинах неравновесности.

Результирующую картографическую модель можно назвать *двухуровневой*, поскольку картографирование производится на основании статистически значимых связей фоновой субординации (Боков, 1990) между некоторыми свойствами ОТЕ (первый уровень) и свойствами вмещающей геосистемы какого-то одного размера, оказывающей приоритетное влияние на эти (но не все!) свойства (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 фитоценоза, 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 такой окрестности хорошо различает днище долины (с такими признаками, как глубокое расчленение окрестности, вогнутая форма), крутой склон долины (глубокое расчленение, выпуклая форма) и приречную часть

междуречья (малое расчленение, 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. Для этого составляем *плеяды взаимосвязанных свойств ландшафта* и схемы отношений между плеядами. В каждой плеяде для каждого свойства методом суперфакторов (см. раздел 3.8) устанавливаем *соотношение вкладов внутриуровневых (вертикальных) межкомпонентных связей* (цифра 1 на рис. 8) *и межуровневых связей, отражающих рамочные условия, накладываемые вмещающими геосистемами* и индицируемые по морфометрическим свойствам их рельефа (цифра 2 на рис. 8). На этом шаге описываемая часть дисперсии, обусловленная межуровневыми связями, частично пересекается с дисперсией, описанной в предыдущем абзаце и обусловленной влиянием только одного – самого главного – масштабного 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. Иными словами – если варьирование свойства не описывается без привлечения гипотезы полимасштабности. Если же более значимым оказывается вклад внутриуровневых межкомпонентных связей (преимущественно почвенно-фитоценоотических и внутрифитоценоотических), 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. Модель имеет обычный для данного диссертационного исследования вид:

$$Y = b_0 + \sum b_n X_n + \sum b_k X_n^2 + \sum b_z X_n X_m \pm \varepsilon,$$

где Y – координата на оси дифференциации того или иного компонента ландшафта (т.е. на экологическом градиенте), $X_{n(m)}$ – координаты свойств другого компонента на значимой для него оси дифференциации, $b_{n(k,l)}$ – регрессионные коэффициенты, ε – стандартная ошибка расчета (мера случайного варьирования).

Выбирается уравнение с максимальным коэффициентом детерминации. Таким образом, выявляется свойство – *ядро плеяды*, которое в максимальной степени аккумулирует информацию о состоянии свойств остальных членов плеяды, хотя и необязательно является прямым следствием их «деятельности».

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 *разностью* между наблюдаемыми значениями и предсказанными моделью (*остатками (residuals) близкими к 0*). 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 (индивидуальные парциальные геосистемы) относительно монотонные по свойствам, входящим в рассматриваемую плеяду. Для этого проводится классификация полевых описаний методом *k*-средних 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 комбинации свойств рельефа вмещающих геосистем, характерном для каждой ОТЕ. Расчет условных (постериорных) вероятностей реализуется в модуле дискриминантного анализа программы Statistica 7.0. 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. На этом этапе реализуется *индуктивная процедура выявления геосистем*: по взаимосвязанным свойствам ПРП и их чувствительности в свойствах вмещающих геосистем определяются границы индивидуальных парциальных геосистем.

На шестом шаге оценивается степень неопределенности классификационной принадлежности (НКП) для каждой операционной территориальной единицы (Хорошев и др., 2002). Показатель вероятности принадлежности комплекса к разным классам стал широко применяться в последние десятилетия как средство избежать субъективности в классификации объектов с неопределенными границами в картографировании (Burrough et al., 2001; Zhu et al., 2001; Molenaar, Cheng, 2002; Hlasny, 2006; Witte et al., 2015). Оценка степени уверенности исследователя при проведении границ на карте становится необходимым атрибутом выделения геосистем на основе концепции полиструктурности (Guisan, Zimmermann, 2000; Fortin et al.,

2000). Вероятностный характер отношений между компонентами давно признается в почвоведении (Козловский, 1970) и ландшафтоведении (А.Г. Исаченко, 2004). Этот путь подробно охарактеризован, в ряде работ автора и его сотрудников (Хорошев, 2004, 2005б; Мерекалова, 2006; Хорошев и др., 2010). Д.Н. Козловым (2009) сходный способ применен для целей почвенного картографирования. Исходим из гипотезы, что существуют постепенные переходы между классами почвенно-растительного покрова. С одной стороны они могут быть приспособлением к постепенно меняющимся в пространстве характеристикам морфолитогенной основы и связанных с ней свойств ландшафта. С другой стороны постепенные переходы могут быть следствием саморазвития, внутрифитоценостических отношений, антропогенных нарушений. Если какое-либо сочетание свойств, входящих в плеяду (класс ПРП), встречается в 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 геосистеме. Если при данном сочетании свойств рельефа с близкими вероятностями могут встречаться разные классы ПРП («рассогласование индикаторов» на периферии функциональной структуры, по Ф.И. Козловскому, 1992), то можно констатировать неравновесные отношения между морфолитогенной основой ландшафта и ПРП либо наличие ареала континуальных переходов между парциальными геосистемами.

Для расчета меры неопределенности классификационной принадлежности (НКП) по формуле Шеннона мы используем значения постериорных вероятностей принадлежности к нескольким классам, полученные на предыдущем шаге средствами дискриминантного анализа:

$$НКП = -\sum p_i \cdot \log(p_i),$$

где p_i – вероятность принадлежности к классу.

Полученные в результате описанных процедур значения вероятностей принадлежности к классам и НКП наносятся на карты. Это позволяет получить представление не только о степени морфолитогенной детерминированности свойств ландшафта, но и о соотношении дискретности и континуальности в пространственной организации территории. Полосы с повышенной НКП трактуются как полосы континуального перехода между контрастными классами морфолитогенной основы, но с оговоркой «для данного масштабного уровня». Не исключается, что внутри такой полосы существуют весьма дискретные границы, но другого масштабного уровня, что требует для нее более детальных исследований.

Завершая описание примененных в работе статистических методов анализа структуры ландшафта, подытожим сопоставление задач с группами методов для их решения (таблица 7). Совокупность описанных процедур автор называет *полимасштабным анализом структуры ландшафта* (рис. 21).

Таблица 7. 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 масштабного уровня геосистем, на котором связи наиболее совершенны. Проверка гипотезы о неодинаковости факторов, действующих на разных масштабных уровнях.
Метод «резонансных уровней»	Определение масштабных уровней вмещающих геосистем, свойства которых контролируют состояние геосистемы анализируемого ранга
Метод варьирующего разрешения	Определение масштабного уровня геосистемы, который чувствителен к характеристикам вмещающей геосистемы
Метод анализа «остатков» регрессионных уравнений	Выявление группы геосистем, которая в наилучшей степени подчиняется типу межкомпонентных отношений, описываемому уравнением
Метод классификации пространственных единиц по регрессионным коэффициентам	Разделение территории на ареалы парагенетических геохор 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

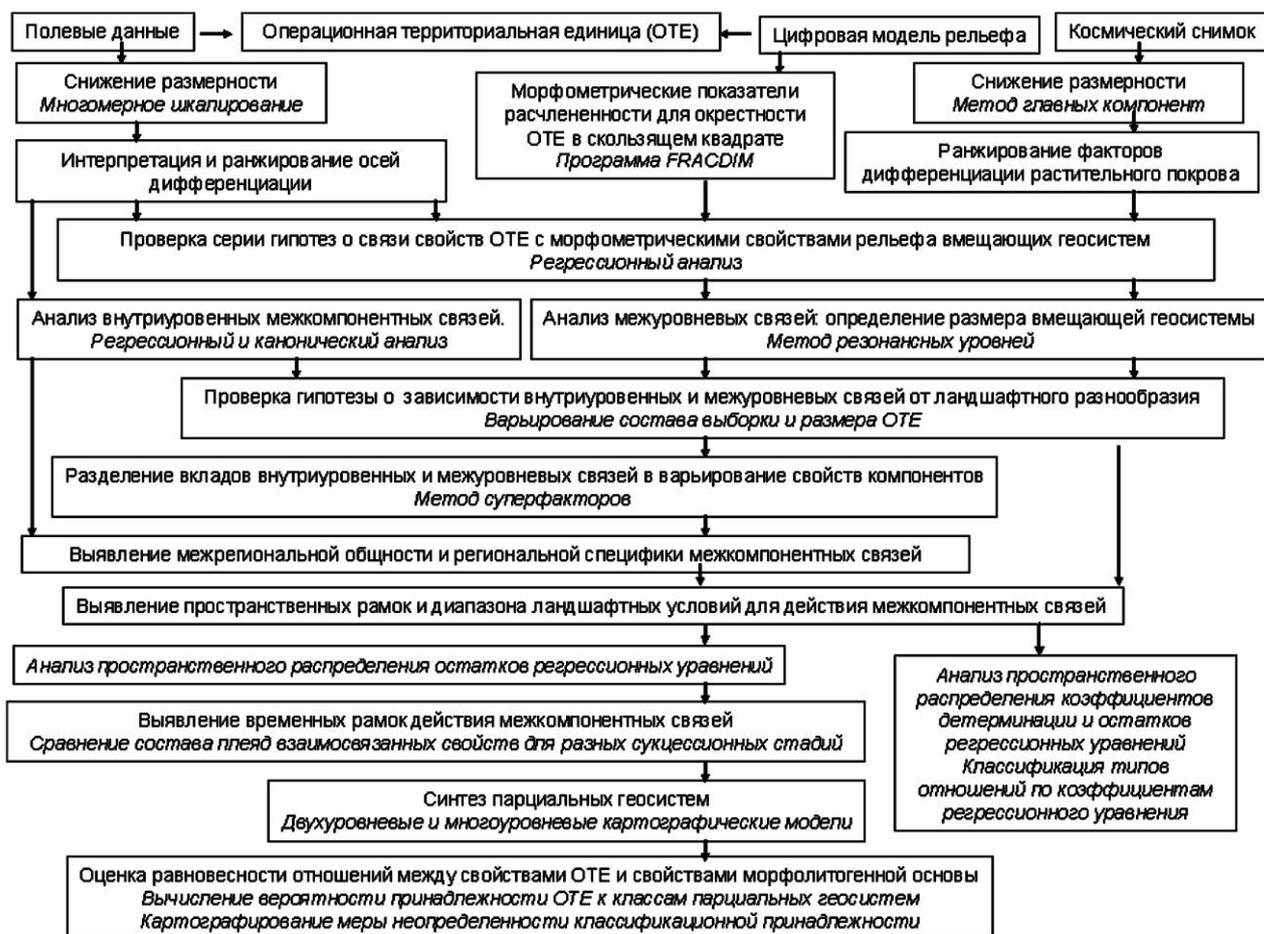


Рис. 21. Процедура полимасштабного анализа структуры ландшафта.

3.10. Место полимасштабного анализа структуры ландшафта среди подходов к объективизации выделения геосистем и ее предметные и региональные ограничения

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, описываемым 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 формирования почвенных комбинаций и т. п. (Пузаченко и др., 1997; Гагаева и др., 2003; Степанов, 2003; Сысуев, 2003а; Данько и др., 2004; Глуценко, 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, 2014; 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, контролируемым рельефом*. В отличие от большинства цитированных выше методик, автор предлагает на предварительном этапе реализовать *классификацию свойств по степени подчиненности рельефу разных масштабных уровней*. Наиболее очевидные случаи «неподчинения» или неполного подчинения рельефу – это «подконтрольность» свойств ландшафта химическим и физическим свойствам почвообразующих пород, внутрифитоценоотическим отношениям, сукцессионным трендам, антропогенным модификациям. Подчеркнем, что заранее иерархические уровни организации рельефа не выявляются. Вместо этого происходит последовательная проверка гипотез о возможных уровнях организации ландшафта; причем за критерий принимается достоверная связь свойств компонентов ландшафта с характеристиками рельефа на разных масштабных уровнях. 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, 2014) 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; Пузаченко, 2014) 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 биогеоценоотические (Восточно-Европейские..., 2004; Бобровский, 2010; Смирнова, 2011) или литогеохимические. Таким образом, предлагаемая автором последовательность процедур *предваряет выбор корректной «траектории» углубленного анализа связей между пространственной структурой и процессами массоэнергопереноса*. Для одних свойств это

будет моделирование зависимости от рельефа, для других – от сукцессионной динамики, для третьих – от 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 взаимонезависимых 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. 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.

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 и геохимическими 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.

Представленное исследование лежит в рамках функционально-статического направления ландшафтоведения (рис. 22). Демонстрируемые в главе 4 результаты применения методологии

полимасштабного анализа основаны на единовременных наблюдениях, представляющих собой только один возможный временной «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 межкомпонентных 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 рамочным условиям, которые задает комбинация форм рельефа вмещающей геосистемы для свойств вложенных геосистем. В лесной зоне особенно важен уровень грунтовых вод. 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 заблокировано 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, 2014), автор сосредоточил внимание на тех, которые наиболее близки к геостационарным и косвенно – геоциркуляционным (в терминологии В.Н. Солнцева, 1997) (рис. 22). Для исследования полимасштабной организации биоциркуляционных структур использованных показателей расчлененности рельефа недостаточно. Для исследования эффектов взаимодействия пространственных элементов 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 обогревающим 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 ландшафтных структур (в терминологии М.Д. Гродзинського, 2014), то предложенные подходы, по мнению автора, вполне применимы, но 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 на данном этапе инструментов характеристики анизотропности пространства вмещающей геосистемы, т.е. зависимости свойств от направлений. Используемые количественные показатели характеризуют общий уровень гетерогенности и конфигурации геосистемы, но не пространственные различия в размещении внутренних элементов (например, зоны сгущения эрозионных форм или склонов повышенной крутизны). Вероятно, в дальнейшем потребуются 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. Тогда станет возможным расширение потенциала предлагаемой методологии с использованием концепций геохимии и геофизики ландшафта. 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; Coueron 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).



Рис. 22. Рассматриваемые в работе направления моделирования и типы структур (выделены желтым фоном). Направления моделирования по А.Г. Топчиеву (1988). Типы структур по В.Н. Солнцеву (1997).

Глава 4

ПОЛИМАСШТАБНЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ЛАНДШАФТА

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

Причины пространственного варьирования свойств ландшафта являются основным предметом исследования. Рассматриваемые свойства выражены посредством координат ОТЕ на осях экологических факторов, которые характеризуют пространственную дифференциацию фитоценозов, почв, почвообразующих отложений. Значения абсолютного большинства осей, рассчитанные методом многомерного шкалирования, подчиняются нормальному распределению, что позволяет использовать для анализа стандартные статистические методы. Результаты интерпретации ландшафтного содержания осей дифференциации для модельных регионов приведены в таблице 8.

Снижение размерности данных методом многомерного шкалирования показало, что дисперсия значений абсолютного большинства измеренных в поле признаков во всех регионах объясняется уравнением «регрессии поверхности отклика» на 60–80% четырьмя независимыми осями (Хорошев, 2016 б).

Напомним, что значения осей отражают результаты «конкурентных» внутрикомпонентных взаимодействий в системах первой группы (см. раздел 3.1.2.). Результаты интерпретации осей дифференциации свойств ландшафта (таблица 8) показывают, что ведущими факторами для всех компонентов во всех регионах являются влажность и трофность. Именно так интерпретируются оси, которые объясняют 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. Особенно ярко это проявляется в зоне хвойно-широколиственных лесов (полигоны на Куршской косе и в Удмуртии), где свойства, чувствительные к трофности, отражают соотношение признаков, свойственных таежным и широколиственнолесным ландшафтам. Ось азотообеспеченности выделена отдельно, поскольку в геоботанике давно выявлена нитрофильная группа видов, образующая очень своеобразные легко распознаваемые на местности сообщества. Такая ось предусмотрена в экологических шкалах Д.Н. Цыганова (1983) наряду с осью трофности.

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 относительно богатое минеральное питание выражается в повышенной доле в древостое осины и (на Обском полигоне) пихты. В кустарниковом ярусе в таких условиях повышены закустаренность в целом и обилие жимолости в частности. В кустарничковом ярусе высокая трофность проявляется в росте обилия черники по сравнению с брусникой и видами олиготрофных болот (клюква, морошка, багульник, голубика, мирт, подбел). В травостое – в росте обилия видов неморальной группы (сныть, медуница, копытень, вороний глаз, сочевичник и др.). В почвенном профиле при повышенном минеральном питании появляется листовенная подстилка, увеличивается гумусовый горизонт и сокращается элювиальный. При пониженном минеральном питании в естественных лесах господство переходит в древостое к ели, сосне, при восстановительной сукцессии – к березе. В кустарниковом ярусе могут господствовать волчегодник, 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 хвойно-широколиственных 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, определяющих 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 две оси влажности, но на разных масштабных уровнях. Одна из них чувствительна к уровню типов ландшафтов и отделяет болотные ПТК со сфагновыми мхами и торфяным горизонтом мощностью более 25 см от зональных лесных ПТК.

Вторая ось влажности, как правило, различает видовой состав мхов в свежих урочищах вершин и склонов бугров и во влажных, но не заболоченных понижениях. 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 урочищах – кедр (*Pinus sibirica*), ель, пихта, осина. На остальных лесных полигонах такого противопоставления нет, так как один и тот же вид сосны *Pinus silvestris* не только присутствует, но и может составлять фон как на болотах, так 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 и оглеения, и почвы 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 элювиально-глеевого процесса (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 оглеенных горизонтов, и наоборот.

Ось сукцессии. Определение вклада сукцессионного фактора имеет принципиальное значение, так как он способен создавать наиболее физиономичные черты 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 и отражает соотношение еловых и березово-сосновых лесов. В Удмуртии, где видовое разнообразие деревьев значительно богаче, сукцессионный фактор уступает по значимости двум факторам трофности. 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 дерново-подзолистых почвах).

Таблица 8. Экологическая интерпретация физического смысла осей дифференциации свойств компонентов ландшафта на лесных полигонах исследования. У.с.ф. – узлокальные или случайные факторы

Ось дифференциации: компонент и порядковый номер	Символическое обозначение в тексте и на рисунках	Архангельская обл. Полигон «Заячья» 1	Архангельская обл. Полигон «Грансект» 2	Архангельская обл. Полигон «Медвежий» 3	Архангельская обл. Полигон «Козловка» 4	Ханты-Мансийский округ Обский полигон 5	Костромская область 6	Костромская область Кологривский район 7	Удмуртия 8	Куршская коса 9
Фитоценоз										
Деревья 1	D1 tree	Трофность	Трофность	Трофность	Сукцессия	Влажность	Трофность	Трофность	Трофность	Трофность
Деревья 2	D2 tree	Влажность	Сукцессия	Трофность	Трофность	Влажность	Мехсостав	Влажность	Трофность	Интродуценты
Деревья 3	D3 tree	Трофность	Влажность	Влажность	Влажность	Трофность	Влажность	Влажность	Сукцессия	Влажность
Деревья 4	D4 tree	Влажность	Влажность	-	Влажность	Сукцессия	Мехсостав	Сукцессия	Влажность	Сукцессия
Деревья 5	D5 tree	-	-	-	-	Сукцессия	У.с.ф.	Сукцессия	У.с.ф.	-
Деревья 6	D6 tree	-	-	-	-	У.с.ф.	У.с.ф.	Сукцессия	У.с.ф.	-
Деревья 7	D7 tree	-	-	-	-	Сукцессия	Сукцессия	-	У.с.ф.	-
Деревья 8	D8 tree	-	-	-	-	У.с.ф.	У.с.ф.	-	Сукцессия	-
Кустарники 1	D1 bush	Трофность	Трофность	Трофность	Трофность	Влажность	Азот	Мехсостав	Влажность	Трофность
Кустарники 2	D2 bush	Влажность	У.с.ф.	У.с.ф.	Азот	Азот	Влажность	У.с.ф.	Мехсостав	Влажность
Кустарники 3	D3 bush	Азот	Трофность	У.с.ф.	Трофность	Влажность	Мехсостав	Сукцессия	У.с.ф.	У.с.ф.
Кустарники 4	D4 bush	Гумус	Гумус	У.с.ф.	Влажность	У.с.ф.	Трофность	У.с.ф.	У.с.ф.	Трофность
Кустарнички 1	D1 low	Влажность	Влажность	У.с.ф.	Влажность	Влажность	Влажность	Влажность	Трофность	Влажность
Кустарнички 2	D2 low	Трофность		Трофность	Трофность	Трофность	Трофность	Трофность	Влажность	Трофность
Кустарнички 3	D3 low	Сукцессия	Трофность	-	-	Трофность	Мехсостав	Трофность	-	Трофность
Кустарнички 4	D4 low	У.с.ф.	Влажность	-	-	-	Влажность	Влажность	-	Влажность
Травы 1	D1 herb	Трофность	Трофность	Трофность	Влажность	Трофность	Трофность	Влажность	Азот	Влажность
Травы 2	D2 herb	Влажность	Трофность	Влажность	Азот	Влажность	Влажность	Сукцессия	Трофность	Азот
Травы 3	D3 herb	У.с.ф.	Влажность	Влажность	Влажность	Свет	Азот	Трофность	Мехсостав	Трофность
Травы 4	D4 herb	Влажность	Сукцессия	У.с.ф.	Трофность	Влажность	У.с.ф.	Азот	У.с.ф.	Влажность
Травы 5	D5 herb	Сукцессия	У.с.ф.	У.с.ф.	Трофность	Влажность	У.с.ф.	У.с.ф.	Трофность	У.с.ф.

Ось		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Травы 6	D6 herb	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	D7 herb	Сукцессия		У.с.ф.	У.с.ф.	У.с.ф.	У.с.ф.	У.с.ф.	У.с.ф.	У.с.ф.
Травы 8	D8 herb	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	D1 moss	Влажность	Влажность	-	Влажность	Влажность	Влажность	Влажность	-	Влажность
Мхи 2	D2 moss	Влажность	Влажность	-	Влажность	Влажность	Трофность	Влажность	-	Мехсостав
Мхи 3	D3 moss	-	-	-	-	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										
Гран. состав почв 1	D1text	Двучленность	Двучленность	Двучленность	15-30 см	-	5-25 см	Двучленность	Двучленность	-
Гран. состав почв 2	D2text	20-40 см	25-40 см	20-35 см	5-25 см	-	30-45см	35-50 см	20-45 см	-
Гран. состав почв 3	D3text	5-40 см	15-25 см	30-40 см	5-15см	-	5-15 см	25-40 см	5-10см	-
Гран. состав почв 4	D4text	10-50 см	40-50 см	15-20 см	5-30см	-	15-45 см	20-50 см	10-50 см	-

Отметим, что в средней тайге в большинстве случаев восстановительная сукцессия идет через березу или осину (за исключением урочищ на песках с подзолами); 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 занимает лишь третье место по значимости. Для Костромского и Кологривского полигонов сукцессионный фактор уступает по значимости факторам трофности, влажности, гранулометрического 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 и др.). 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 палеве, и лесам с посадками сосны обыкновенной (*Pinus silvestris*) и сосны горной (*Pinus mugo*) на хорошо дренированной высокой палеве со свежими гигротопами и на 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.

Сукцессионный статус 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).

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. Поэтому распределение значений этой оси в пространстве несет значительную ландшафтно-геохимическую информацию, прежде всего, выделяя трансаккумулятивные и супераккумулятивные позиции. Так, 1-я ось дифференциации травостоя в Удмуртии выделяет ПТК с высоким обилием борца, крапивы, противопоставляя сообществам с орляком, вейником, ортилей, ожикой, седмичником. На Куршской косе целая местность низкой палеве содержит преимущественно супераккумулятивные комплексы и сочетает в себе черты высокой нитрофильности и гигрофильности (2-я ось дифференциации травостоя) – сообщества со снытью, борцом, гравилатом, таволгой, крапивой. Они противопоставляются сообществам с луговиком извилистым, мерингией, седмичником, щитовником австрийским.

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 травостоя для Костромского полигона, различающая среди южнотаежных ПТК, с одной стороны, сосновые леса на песках и лиственнично-сосновые на песках пылеватых, с другой стороны – пихтово-еловые леса на суглинках, лессовидных или двучленных супесчано-суглинистых 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, а 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 переходить к оценке тесноты межкомпонентных связей (между осями дифференциации компонентов) в ландшафтных плеядах и сравнить значимость разных видов межкомпонентных связей между регионами.

4.2. Межрегиональный анализ внутриуровневой компонентной структуры

Основной вопрос этого этапа исследования формулируется так: *являются ли те или иные связи универсальными для разных регионов; выдерживается ли в разных регионах соотношение значимостей видов связей?* Предметом являются внутриуровневые связи, то есть отношения между компонентами ландшафта без учета рамочных условий, создаваемых геосистемами более высокого ранга.

Для каждого полигона построены уравнения «регрессии поверхности отклика» (*response surface regression*) 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 связи), б) коэффициенты детерминации уравнения (плотность связи), в) значения регрессионных коэффициентов (вклад каждой независимой переменной), г) знак регрессионных коэффициентов (положительная или отрицательная связь), д) вклад нелинейной составляющей.

Для иллюстрации повышенной информативности моделей «регрессии поверхности отклика», по сравнению с линейными моделями, покажем вклад нелинейной составляющей межкомпонентных связей. Используем пример свойств травостоя чувствительных к трофности местообитания, для среднетаежного ландшафта полигона «Заячья» в Архангельской области (см. раздел 2.1.1).

Первая (т.е. главная по значимости) 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, гигрофильной групп, способных произрастать на бедных почвах (ожика волосистая, плаун булавовидный,

ситник нитевидный, ятрышник мужской). Проверим, в какой степени это свойство травостоя описывается 4-мя осями дифференциации мощностей генетических горизонтов почв, иначе говоря – насколько современный травостой адаптирован к результатам многовекового развития почвенного профиля. Линейное мультирегрессионное уравнение обеспечивает объяснение лишь 35% варьирования. Уравнение второй степени значимо с коэффициентом детерминации (КД) 0,45, т.е. объясняет 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 (таблица 9). Отметим, что непосредственно как ось обеспеченности почв основаниями может интерпретироваться лишь 2-я (D2hor). Она отличает почвы, в которых велика мощность гумусового или перегнойного горизонта при отсутствии или маломощности элювиального, от почв с противоположным соотношением горизонтов. Существует более или менее линейная связь гумусированности/оподзоленности (2-я ось) с исследуемым свойством травостоя. 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 (Горбунова, Гаврилова, 2002; Никитина и др., 2016). 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: в урочищах с вложенным субпрофилем альфегумусового подзола «запрещено» появление неморальных и нитрофильных видов. 4-я ось определяет соотношение торфонакопления и оподзоливания и фактически «запрещает» наличие неморальных видов даже при небольшом торфонакоплении.

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 обуславливать рост обилия требовательных к трофности видов (рис. 23, А). 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 совместного одновременного действия нескольких факторов. Аналогичные эффекты создаются группой свойств почв для оси чувствительности трав к трофности в средней тайге Западной Сибири (КД 0,36) (рис. 23, Б), южной тайге Костромской области (КД 0,28), хвойно-широколиственных лесах Удмуртии (КД 0,20).

Для сравнительного анализа структуры внутриуровневых межкомпонентных связей применены два способа (см. раздел 3.5.2): а) расчет среднего коэффициента детерминации (КД) группы свойств компонента группой свойств других компонентов, б) канонический анализ с расчетом коэффициентов канонической корреляции (ККК). 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 гранулометрический состав того или иного почвенного горизонта и др.) могут подчиняться сразу нескольким экологическим градиентам. Тем самым мы получаем возможность оценивать степень общности компонентов ландшафта, охарактеризованных множеством признаков. Таким способом отражается суперпозиция нескольких экологических факторов.

На основании осредненных коэффициентов детерминации (см. раздел 3.5.2) на схему (рис. 24) нанесены межкомпонентные связи, которые являются приоритетными для каждого компонента. По схеме видно, какие связи могут считаться универсальными для нескольких или всех регионов, а какие следует относить к регионально специфичным. Простым курсивом обозначены регионы, в которых наблюдается односторонне приоритетная связь. Это означает, что для одной группы свойств связь с другой является приоритетной среди других связей, но не наоборот. Тогда цифра, обозначающая регион, расположена на рисунке ближе к той группе свойств, для которой данная связь является приоритетной. Если данная связь не бывает двусторонне приоритетной, то односторонняя стрелка направлена к той группе свойств, для которой она является приоритетной.

Таблица 9. Уравнение «регрессии поверхности отклика» для 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

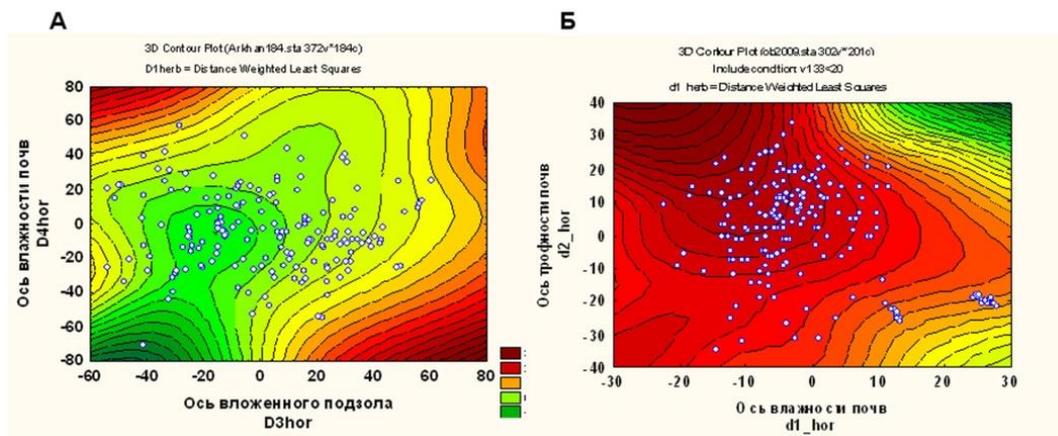


Рис. 23. Неаддитивные эффекты, создаваемые свойствами почв, для меры чувствительности травостоя к трофности ($d1herb$) в среднетаежных ландшафтах.

А. Архангельская область, полигон «Заячья». Наличие близкой верховодки (отрицательные значения 3-й оси дифференциации почв, $d3hor$) при отсутствии торфонакопления (положительные значения 4-й оси дифференциации почв, $d4hor$) обуславливает рост обилия требовательных к трофности видов (желтый фон, $d1herb$).

Б. Обский полигон. Оподзоливание при глубоко залегающих грунтовых водах (положительные значения 2-й оси дифференциации почв, $d2hor$) при отсутствии торфонакопления (отрицательные значения 1-й оси дифференциации почв, $d1hor$) благоприятствует росту обилия бореальных видов травостоя (красный фон, $d1herb$). Сочетание гумусонакопления и накопления перегноя в переувлажненных условиях (противоположные сочетания значений осей) способствует росту обилия нитрофильных и неморальных видов (желтый фон, $d1herb$).

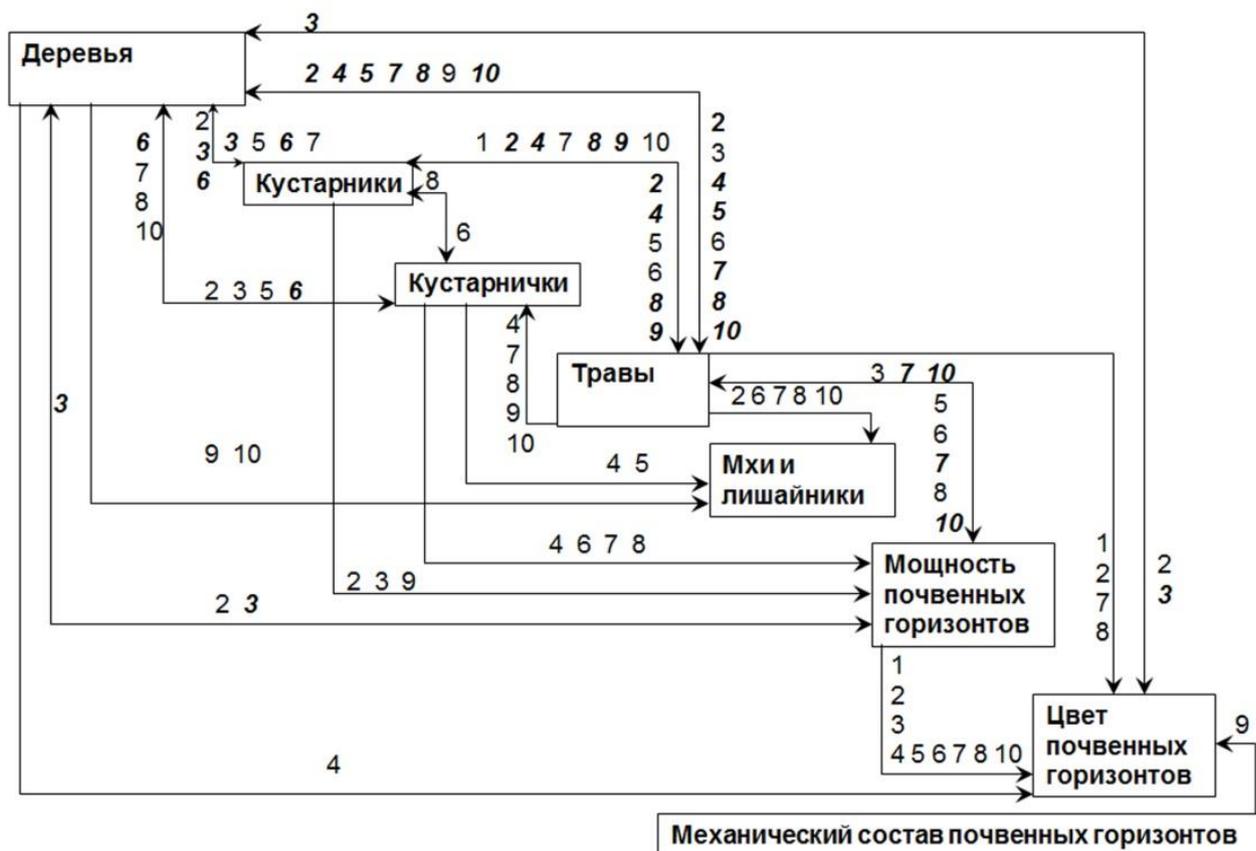


Рис. 24. Региональная специфика межкомпонентных связей: приоритетные связи для каждой группы свойств, рассчитанные по осредненным коэффициентам детерминации для разных осей дифференциации. Жирный шрифт обозначает обоюдно приоритетную связь для групп свойств. Полигоны исследования: 1 – Буртинская степь (С), 2 – Куришская 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.

Второй способ подразумевает расчет канонических коэффициентов корреляции между группами свойств, характеризующими компоненты (например, между четырьмя осями дифференциации древостоя и четырьмя осями дифференциации гранулометрического состава почв).

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 близости описанных ПТК в пространстве).

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

Травостой – группа свойств компонента «фитоценоз», отличающаяся наибольшим количеством описываемых признаков. Видовое богатство отражает множество действующих факторов, основные из которых, по гипотезе, совпадают с факторами, контролирующими состояние других компонентов (рис. 11). Результаты, полученные описанными выше способами (таблица 10), показывают, что *во всех регионах наиболее связанным (или одним из двух наиболее связанных) с травостоем ярусом является древостой, независимо от зональной принадлежности, степени континентальности и генезиса ландшафта*. 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. На Обском полигоне сосна может преобладать только на болотах. 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 внутрифитоценозические связи травостоя с эдификаторами лесных сообществ*. Кроме того, в пару наиболее сопряженных с травостоем ярусов 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 списку полигонов, где связи трех ярусов являются взаимно приоритетными. Возможен механизм и обратного влияния травостоя на кустарниковый и древесный ярусы, так как хорошо развитый плотный травостой может препятствовать возобновлению некоторых видов деревьев.

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. В этом факте отражается «конкуренция за пространство» видов с близкими размерами и положением в фитоценозе. Подчиняться разным факторам – это и есть способ сократить конкурентные отношения и сосуществовать в пространстве. В средней тайге сопряженность мхов и кустарничков с травостоем несколько выше (средние КД в интервале 0,10–0,27), чем в зоне хвойно-широколиственных лесов и южной тайге (КД в интервале 0,06–0,18).

Эти закономерности в целом выдерживаются и по результатам анализа канонических корреляций (Хорошев, 2016 б). На южнотаежных полигонах связь травяного яруса с кустарничковым более тесная, чем с кустарниковым, а в масштабе Кологривского района выходит на первое место. В среднетаежном ландшафте 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 приводораздельного 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»).

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) 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 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 (40–80 лет) распашки в лесах и реликты подзолистого профиля в заболачиваемых

урочищах. Фактически этот этап соответствует стадии инерционной устойчивости мутапедогенеза, когда почва находится в квазиравновесии с предшествовавшей комбинации факторов почвообразования (Геннадиев, 1990): изменения в строении почвы отстают от изменений факторов почвообразования. Внутри фитоценоза скорость изменения ярусов также неодинакова. В частности, это проявляется в сохранении 40-70% луговых видов в молодых березняках и сосняках (Горяинова и др., 2012).

Ландшафты Куршской косы являются исключением из правила относительного «безразличия» травостоя и других ярусов к цвету и гранулометрическому составу почв. 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. 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 сырых, но не заболоченных черноольхово-широколиственных лесов с высоким обилием нитрофильных видов: гравилата речного, лунника оживающего, сныти, таволги вязолистной. При этом с глубиной в почвах значение оттенка растёт, цветности (ожелезненности) – падает, а яркости – возрастает, что индицирует появление признаков глееватости. Высокую ожелезненность следует связывать с осаждением железа на кислородном барьере при контакте близко залегающих грунтовых вод с дренированной верхней толщей почв. Видимо, нитрофильность фитоценоза объясняется именно 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 кустарничков также достоверно чувствительны к цветовым характеристикам, которые в совокупности объясняют, соответственно, 34 и 29% варьирования их значений. Однако остальные оси дифференциации древостоя, кустарничков, 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.

Таблица 10. Средняя доля объясненной 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 степь	Куршская коса	Удмуртия	Костромская область	Кологривский район	Архангельская область. Полигон «Заячья»	Архангельская область. Полигон «Медвежий»	Архангельская область. Полигон «Грансект»	Архангельская область. Полигон «Козловка»	Обь
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
	Гран.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
	Гран. 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
	Гран. 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

Кустарнички (4 оси)	Независимые переменные – компонент Б	Буртинская степь	Куршская коса	Удмуртия	Костромская область	Кологривский район	Арханг. обл. «Заячья»	Арханг. обл. «Медвежий»	Арханг. обл. «Трансект»	Арханг. обл. «Козловка»	Обь
	Горизонты	-	25	5	17	20	20	32	25	13	31
	Гран. состав	-	-	4	8	8	11	8	11	8	-
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
	Гран. 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
	Гран. 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
	Гран. состав	13	-	11	9	10	16	14	15	26	-

Установлены 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 (Хорошев, 2016 б). Внутрифитоценотические связи (особенно в мохово-травяно-кустарничковой группе ярусов) в средней тайге сильнее, чем в южной тайге и в хвойно-широколиственнолесной зоне. Тесная связь мохово-лишайникового и

травяного ярусов объясняется, видимо, большой ролью мохового покрова как средообразователя для бореального мелкотравья и низких гигрофильных видов. Она реализуется за счет вклада в кислотность почв, накопление торфа, аккумуляцию влаги, и особенно – изоляцию дневной поверхности от минеральной поверхности. Древесный, кустарниковый и травяной ярусы образуют прочную плеяду. Ее участники в разной степени чувствительны к почвам: травы в наибольшей степени (6 осей из 8 достоверно описываются в моделях «регрессии поверхности отклика» 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» (масштабный уровень – ландшафт) 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 профиль*, что указывает на сопоставимость их характерных времен. Следовательно, проявляется индикационное значение трав и кустарничков по отношению к почвенному профилю для средней тайги. Этот результат согласуется с опубликованными сведениями по региону (Никитина и др., 2016). Например, высокое обилие сор₁ таволги вязолистной, сныти, борца индицирует мощность элювиального горизонта EL не более 10 см, а гумусового АУ – не менее 10 см; наличие линнеи показывает почти полную деградацию старопашотного горизонта, а кислицы – мощность подстильно-торфяного горизонта О не более 10 см; обилие брусники сор₁₋₂ соответствует мощности элювиального горизонта EL не менее 20 см и гумусового АУ – не более 5 см; черника присутствует в фитоценозе при мощности гумусированных горизонтов не более 10 см. Кустарниковый ярус достаточно прочно связан как с древесным и травяным ярусами, 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. Гранулометрический 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 цветковых характеристик для ярусов фитоценоза очень сильно зависит от масштаба расчета. Она весьма велика для 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 кустарничковым ярусом.

На Обском полигоне цветковые характеристики достаточно прочно коррелируют с ярусами фитоценоза в ландшафтном масштабе (ККК более 0,50), но слабо – при исключении из расчета 16 % точек, представляющих болотные урочища (ККК менее 0,35). Проективное покрытие мха *Pleurozium schreberii* более 40% индицирует отсутствие гумусонакопления и вложенных в элювиальную часть профиля альфегумусовых горизонтов ВНФ, покрытие *Hylocomium splendens* 10-30% часто свидетельствует о развитии вложенных альфегумусовых горизонтов ВНФ мощностью 2-10 см.

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. На среднетаежных полигонах из 15 пар канонических корреляций типа «горизонты – ярусы фитоценоза» 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 травяной ярус, не изолированный от минеральной толщи, может более чутко реагировать на другие факторы. В частности, по сравнению со средней тайгой, возрастает (хотя и на грани достоверности) чувствительность к гранулометрическому 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, травяной 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.

Хвойно-широколиственные леса. Несмотря на существенное различие сопряженности компонентов в Удмуртии и на Куршской косе (прежде всего из-за большей контрастности ландшафта последней), выделяется общее правило. *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, что *с приближением к полосе оптимального увлажнения снижается напряженность конкурентных отношений травяного и кустарничкового ярусов.*

В сравнении с полигонами в других зонах, ландшафты пластовых равнин зоны хвойно-широколиственных 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 между урочищами на песках, лессовидных суглинках, коренных карбонатных породах.

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 хвойно-широколиственным лесам, оказываются менее пластичными в отношении к почвам, по сравнению с таежными.*

Итак, установлены некоторые универсальные правила внутриуровневых 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 универсальные ландшафтные плеяды свойств, состав которых различается между ландшафтными зонами (рис. 25). Их можно считать реализацией парциальных геосистем, единство которых обусловлено общностью факторов пространственной дифференциации. Связь кустарников с травами и деревьев с травами – наиболее универсальная плеяда, которая сохраняется в хвойно-широколиственных лесах, южной тайге и средней тайге. Каждый из этих ярусов может выступать как ведущий для другого.

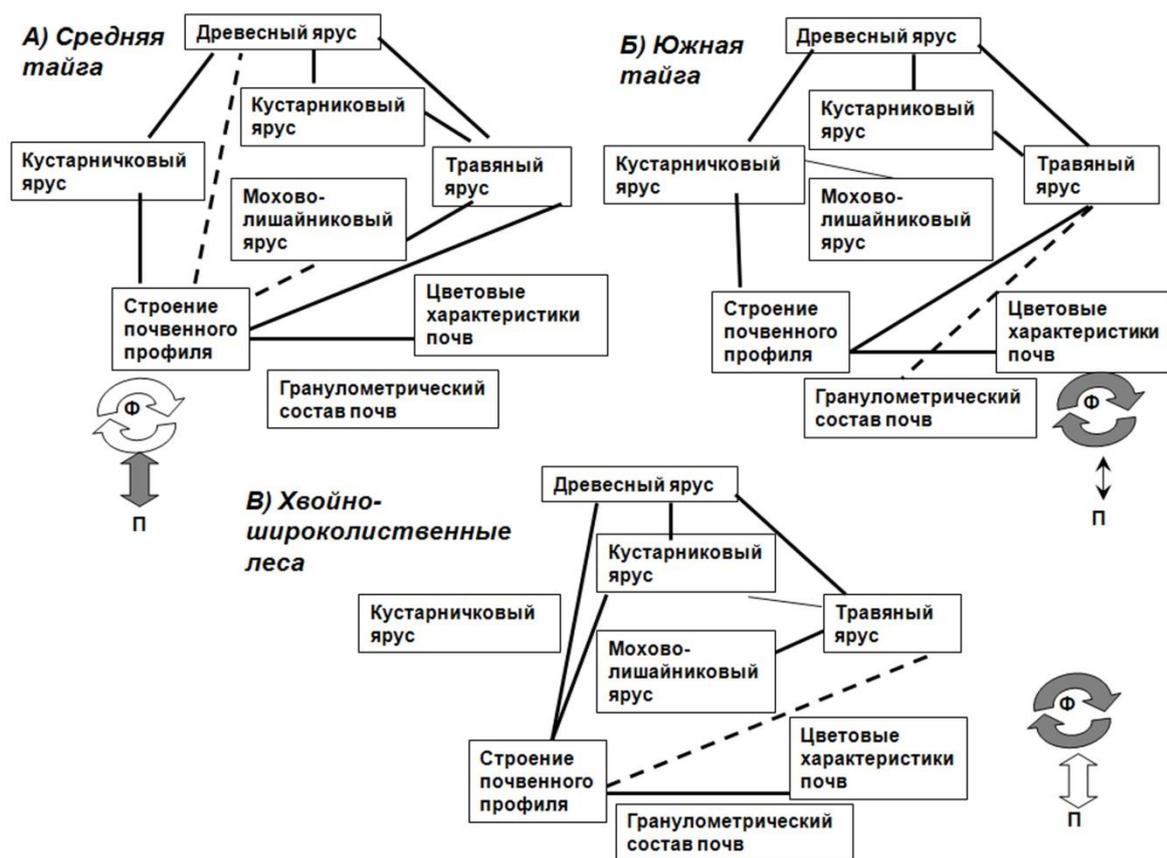


Рис. 25. Зональная специфика внутриуровневых межкомпонентных связей в средней тайге (А), южной тайге (Б), хвойно-широколиственных лесах (В). Толщина линии символически отображает плотность связей. Φ – фитоценоз. П – почва.

Полученные материалы о сопряженности компонентов ландшафта позволяют внести некоторую дополнительную ясность в вопрос об информативности фитоценоза для индикации свойств почв – труднонаблюдаемого компонента. Наши данные позволяют утверждать, что в лесной зоне индикация строения почвенного профиля по свойствам ярусов фитоценоза возможна, но наилучшие индикаторы различаются по регионам, что важно учитывать, в частности, при лесоустроительных работах. В заболоченной средней тайге Западной Сибири виды, служащие наилучшими индикаторами сосредоточены в моховом ярусе, в средней тайге Архангельской области и в южной тайге – в травяном и кустарничковом, в хвойно-широколиственных лесах – в древесном и кустарничковом. Более подробные сведения об индикационных свойствах ярусов фитоценоза по отношению к почвам и грунтовым водам приводятся в разделе 4.8.

Следующая стадия уточнения механизмов межкомпонентных связей должна не просто констатировать факт связанности компонентов, но конкретизировать плеяды свойств компонентов, подчиняющиеся одним и тем же ландшафтообразующим процессам.

4.3. Зависимость внутриуровневых межкомпонентных связей от уровня ландшафтного разнообразия

Высокие показатели тесноты межкомпонентных связей свидетельствуют о наличии многообразия комбинаций свойств при едином законе композиции (виде зависимости) внутри массива данных. Как уже говорилось, 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. Имеется в виду, что существует единое правило, объясняющее внутренние различия, а, следовательно, и существование геосистемы с единым упорядочивающим процессом, т.е. системы с единым законом композиции. Второй случай свидетельствует о том, что среди оставшихся данных нет строгого соответствия компонентов.

Для исследования вопроса о влиянии уровня ландшафтного разнообразия на тесноту межкомпонентных связей проведено сравнение канонических корреляций и качества уравнений «регрессии поверхности отклика» 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 2.1.1). Каждый из них представляет свой уровень ландшафтного разнообразия и охарактеризована серией описаний со специфичной плотностью расположения: ландшафтный уровень – полигон «Заячья» (22 группы урочищ, 90 видов урочищ); местностной – «Трансект» (12 групп урочищ, 21 вид урочищ); урочищный – «Медвежий» (12 групп урочищ, 34 вида урочищ); фациальный – «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 провинция, 2

района, 165 описаний). Для Куршского хвойно-широколиственнолесного ландшафта сравнивались модели межкомпонентных связей для лесо-болотного ландшафта (всего 110 описаний) и для группы лесных урочищ после исключения урочищ с мощностью торфа более 10 см (остается 85 описаний).

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 (Хорошев, 2016 б), установлены две четко различающихся плеяды компонентов (рис. 26). С одной стороны, от ландшафтного («Заячья») к местностному («Трансект») и 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.

При поиске причин возрастания связи древесного и кустарникового ярусов на ландшафтном уровне гипотеза о влиянии роста разнообразия почвенных условий прямо не подтверждается, так как связь со строением почвенного профиля и цветовых характеристик на ландшафтном уровне ослабевает. Для большинства кустарников разнообразие градаций обилия возрастает от фациально-урочищного к местностному и, особенно, – к ландшафтному уровню (Хорошев, 2016 б). 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» (урочищный уровень), более однообразна в отношении присутствия перечисленных видов. Однако эта территория выделяется повышенной встречаемостью сосняков с обильным можжевельником в подлеске, что указывает на повышенную (до 50–60 см) мощность песчано-супесчаного чехла и увеличение глубины оподзоливания. Таким образом, рост связи на ландшафтном уровне должен интерпретироваться как результат расширения диапазона возможных обилий видов древесного и кустарникового ярусов. Причины просматриваются в антропогенных воздействиях на растительный покров и косвенно – на химические свойства почв, которые не отражаются прямо в строении почвенного

профиля. В частности, при наличии одинакового по мощности старопашотного горизонта в нескольких урочищах, его химические свойства могут различаться из-за разной в прошлом интенсивности внесения удобрений, что и обуславливает присутствие или отсутствие в кустарниковом ярусе нитрофильных видов, а в древесном – ольхи серой (*Alnus incana*).

В то же время все три члена плеяды «древесный ярус – кустарниковый ярус – кустарничковый ярус» участвуют также в иной системе связей, которая достигает максимального проявления на урочищном уровне. Так, связи древесного яруса с моховым и травяным, а также с цветовыми характеристиками почв максимальны на урочищном уровне. Кустарниковый и кустарничковый ярусы варьируют наиболее сопряженно с моховым также на урочищном уровне. Таким образом, в полимасштабную систему межкомпонентных связей вовлечены три яруса фитоценоза.

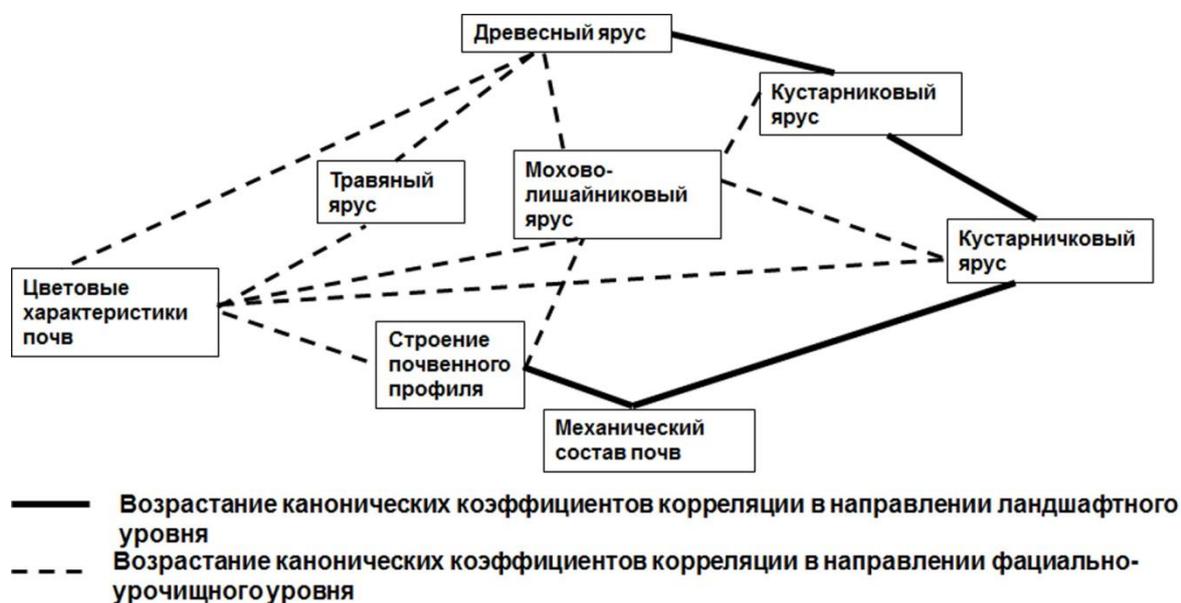


Рис. 26. Изменение канонических коэффициентов корреляции между свойствами ярусов фитоценоза и почв в ряду «урочищный уровень – местностной уровень – ландшафтный уровень». Среднетаежный ландшафт, Архангельская область.

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, 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 морфолитогенной основы и современному «противостоянию» лесных и болотных урочищ, – Обского (см. раздел 2.1.2) и Куршского (см. раздел 2.1.5). Основное их сходство заключается в доминировании бугристого рельефа эолового происхождения, резком контрасте хорошо 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 (ККК) между группами свойств компонентов монотонно снижаются по мере сокращения ландшафтного разнообразия выборки. Максимальных значений почти во всех парах групп свойств канонические корреляции достигают для выборки, охватывающей весь лесо-болотный ландшафт, в которой 16% наблюдений приходится на болотные урочища, что соответствует их площадной доле на исследованной территории ландшафта. Коэффициенты монотонно убывают при исключении сначала болотных фаций с мощностью торфа более 20 см (т.е. в группе фаций незаболоченных и заболоченных лесов), а затем – с мощностью торфа 10–20 см (то есть в группе фаций только незаболоченных лесов). Например, ККК древостоя и травостоя составляет ряд: 0,80–0,60–0,49, а травостоя и строения почвенного профиля – 0,74–0,44–0,42. Очевидно, что фации с мощностью торфа 10–20 см, приуроченные к окраинам болот и подножьям палеозоловых бугров, вносят основной вклад в снижение тесноты связей между почвами и ярусами фитоценоза. Это объясняется большим разнообразием почвенных профилей с переходными свойствами от светлосемов к торфяно-глеземам.

Таким образом, в группе суходольных урочищ разнообразие комбинаций свойств почв и фитоценозов значительно возрастает по сравнению с лесо-болотным ландшафтом в целом, что отражается на снижении канонических корреляций. В первом приближении, *эта группа урочищ допускает нестрогую взаимоадаптацию компонентов, по крайней мере до 80-летнего возраста древостоя.* Однако этот результат может не иметь универсального значения для всех свойств компонентов, выражаемых конкретными осями дифференциации. Поэтому необходимо удостовериться, сохраняется ли плеяда свойств при изменении размера выборки.

Сочетание болотных и суходольных урочищ можно рассматривать как следствие дивергенции ландшафта с бугристым рельефом. Присутствие в массиве данных обоих типов урочищ дает высокие коэффициенты детерминации модели «регрессии поверхности отклика», в

основном – за счет контраста всех 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. Например, качество моделей зависимости обилия видов фитоценоза от четырех осей строения почвенного профиля меняется следующим образом: для мохово-лишайникового яруса от 62% объясненной дисперсии до 17%, для травяного – от 49 до 28%, для древесного – от 35 до 6%, для кустарничкового – от 55 до 10% (таблица 11). 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.

Таким образом, оказывается, что в пределах группы суходольных урочищ одинаковые почвы позволяют существовать разнообразным фитоценозам, что неудивительно в силу большей динамичности фитоценозов. 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 фитоценоотическими. 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-фитоценоотических связей для группы суходольных урочищ. Она должна быть основана на какой-либо 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-фитоценоотических связей «растворяется», но вновь появляются в древостоях старше 80 лет (Хорошев, 2016 б), когда происходит взаимная адаптация в соответствии с локальными геоморфологическими условиями, т. е. почва и фитоценоз, возможно, приближаются к этапу собственно мутапедогенеза – этапа развития (по А.Н. Геннадиеву, 1990). Соотношение сосняков и пихтарников (1-я ось дифференциации древостоя), противоположно распределенных по гигротопам, 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. Это заставляет предполагать вклад микроклиматических контрастов, обусловленных 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 данными о сезонном промерзании почв, для проверки этой гипотезы.

Таблица 11. Сравнение тесноты почвенно-фитоценологических связей в заболоченных и суходольных урочищах Обской террасы и Куршской косы. Доля объясненной дисперсии по модели «регрессии поверхности отклика», отражающей зависимость оси дифференциации яруса фитоценоза от совокупности четырех осей дифференциации мощности почвенных горизонтов. Жирным курсивом выделены достоверные модели.

Оси дифференциации (ярус и порядковый номер)	Ландшафт			
	Обский		Куршская коса	
	<i>Уровень ландшафтного разнообразия</i>			
	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)
<i>% описаний в болотных урочищах</i>	16	0	15	0
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 1	11	10	29	23
Мхи 1	62	17	22	26
Мхи 2	11	16	13	16

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 можно считать либо несущественно контрастным для фитоценоза, либо однородным.

Куршский хвойно-широколиственнолесной ландшафт. Диапазон уровней «урочище – ландшафт». На Куршской косе оподзоливание и гумусонакопление, одновременно выраженные в зональных условиях хвойно-широколиственных лесов, уравновешены за пределами заболоченных участков (2-я ось дифференциации почвенных горизонтов, значения которой подчиняются нормальному распределению). Наиболее типичны песчаные почвы с очень слабой дифференциацией профиля на маломощные гумусовый и элювиальный горизонты. Они соответствуют условиям высокой дренированности бедных песчаных почв дюн и плоских поверхностей высокой палеве, составляющим основной фон. Отклонения от среднего в сторону отрицательных значений оси связаны с развитием серогумусовых почв на «моренном острове» и перегнойных почв в урочищах низкой палеве с относительно близким положением богатых грунтовых вод (см. раздел 2.1.5). Отклонения в сторону положительных значений оси связаны с развитием альфегумусового 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 азота, создающее местообитания для нитрофильных видов, компенсируется выносом из боровых местообитаний. Параллельно меняются свойства древесного, травяного и мохового ярусов (соотношение боровых и нитрофильных видов).

Сравнение тесноты связей в целом в лесоболотном ландшафте и в группе только лесных урочищ 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 суммарной мощности торфяного и перегнойного горизонтов менее 10 см (рис. 27). Прежде всего, это касается связи строения профиля с видовым составом древесного, травяного и мохово-лишайникового ярусов, а цветовых характеристик почв – с видовым составом кустарничкового яруса. Кустарниковый ярус на этом уровне ландшафтного разнообразия

наоборот становятся более независимым по отношению к почвам и взаимодействует почти исключительно с другими ярусами фитоценоза.

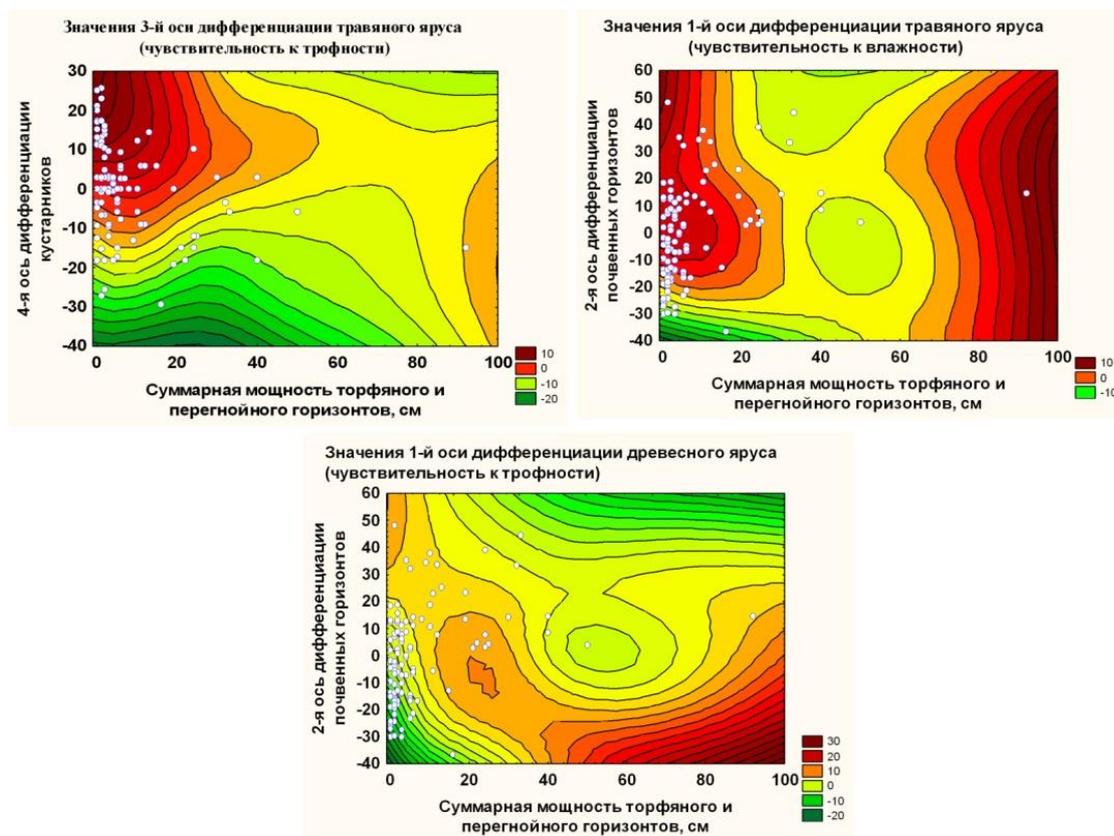


Рис. 27. Снижение тесноты почвенно-фитоценологических связей при нарастании суммарной мощности торфяного и перегнойного горизонтов почв в хвойно-широколиственном ландшафте Куршской косы. При накоплении в почвах неразложившегося органического вещества более 10 см связи ослабляются.

Сравнение ландшафтов Куршской косы и Обской террасы показывает неодинаковую степень интеграции лесоболотного ландшафта.

1. Ослабление связей при переходе с уровня лесоболотного ландшафта на уровень группы лесных урочищ объясняется прогрессирующей дивергенцией лесных и болотных урочищ. Обособление этих групп обязано процессу перераспределения влаги между палеозоловыми положительными и отрицательными формами рельефа.

2. На Обской террасе в суходольных урочищах существенные контрасты почвенно-фитоценологических комбинаций еще не сформировались. Велико пересечение ареалов почвенных и фитоценологических признаков, не выражена специализация фитоценозов по почвенным условиям. Имеет место относительная независимость большинства почвенных и фитоценологических признаков до возрастной стадии около 80 лет.

3. Накопление толщи неразложившегося органического вещества мощностью более 10 см вызывает снижение тесноты почвенно-фитоценологических и внутрифитоценологических связей. Органическое вещество экранирует влияние свойств минеральных горизонтов почв на фитоценоз: фитоценоз одинаков даже при различном строении минеральной части почв.

4.4. Межуровневые связи как индикатор полимасштабности ландшафтной организации

Каждый ПТК (ранга примерно фации при размере ОТЕ 10 или 30 м или примерно 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 *разные комбинации форм рельефа во вмещающей геосистеме более высокого ранга, обуславливают разные характеристики ОТЕ.*

Приведенные ниже рассуждения основаны на результатах сравнительного анализа серии статистических моделей, объясняющих свойства ОТЕ свойствами окрестностей разного размера, то есть гипотетических вмещающих геосистем.

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. 28-32).

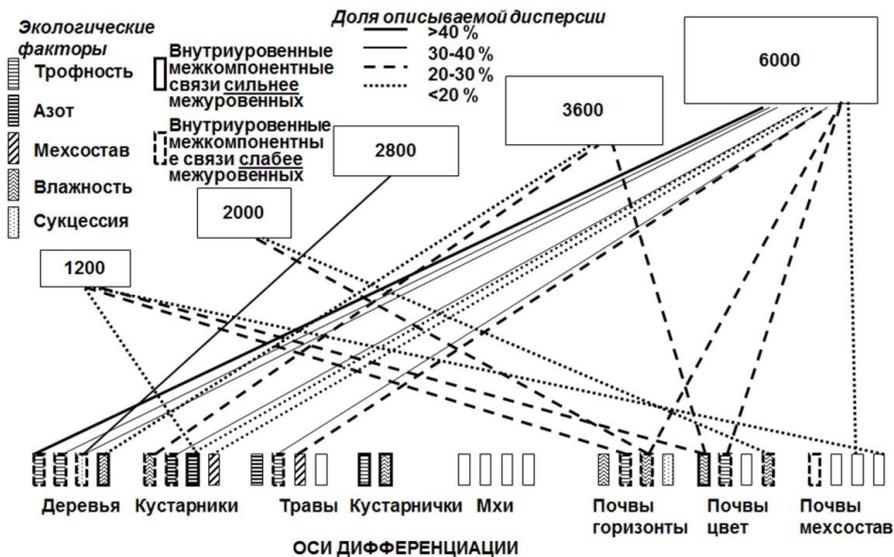


Рис. 28. Межуровневые связи для свойств компонентов хвойно-широколиственного ландшафта в Удмуртии. Линейный размер операционной территориальной единицы (ОТЕ), содержащей описанную в поле фацию, – 400 м. Цифры в прямоугольниках – линейный размер квадратной окрестности для ОТЕ, м. Линии – доля дисперсии оси, описываемой мультирегрессионным уравнением 2-й степени («регрессии поверхности отклика»), в котором зависимая переменная – координата фации на оси (мере чувствительности компонента к экологическому градиенту), независимые переменные – четыре морфометрические характеристики рельефа (вертикальная и горизонтальная расчлененность, вертикальная и горизонтальная кривизна) в квадратной окрестности.

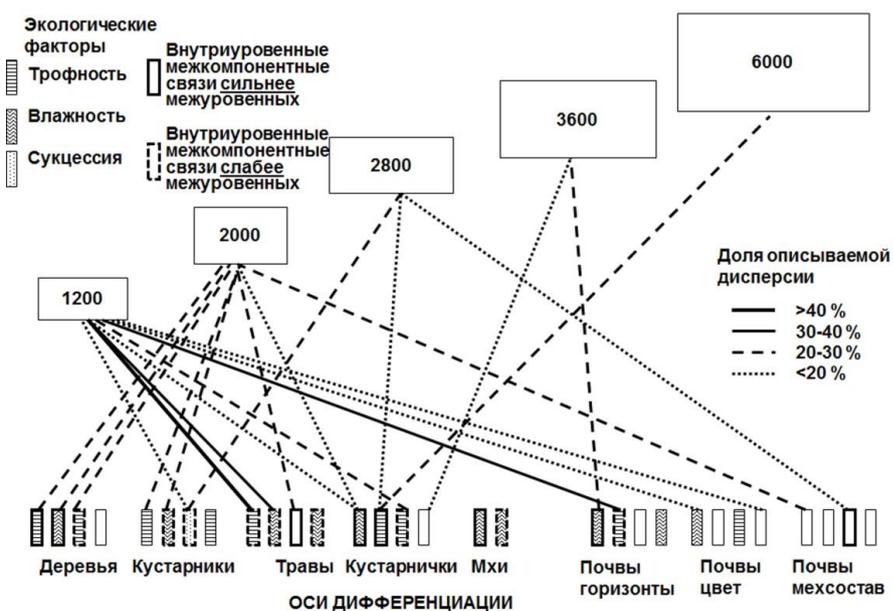


Рис. 29. Межуровневые связи для свойств компонентов среднетаежного ландшафта в Архангельской области (полигон «Заячья»). Размер ОТЕ 400 м. Доля описанной дисперсии – для уравнения «регрессии поверхности отклика». Условные обозначения – см. рис. 28.

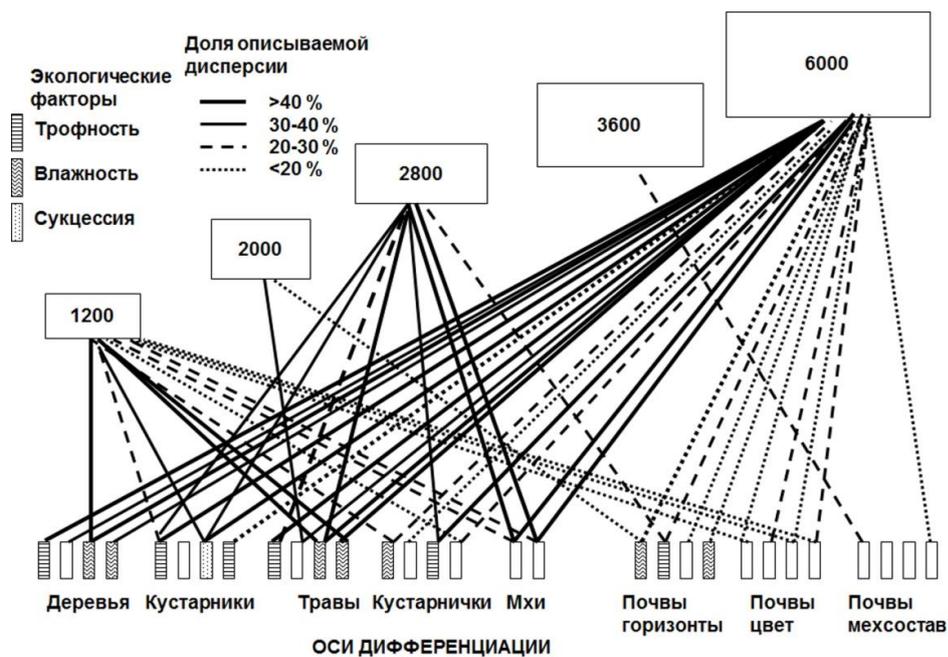


Рис. 30. Межуровневые связи для свойств компонентов Гритинской местности среднетаежного ландшафта в Архангельской области (полигон «Трансект»). Размер ОТЕ 400 м. Доля описанной дисперсии – для уравнения «регрессии поверхности отклика». Условные обозначения – см. рис. 28.

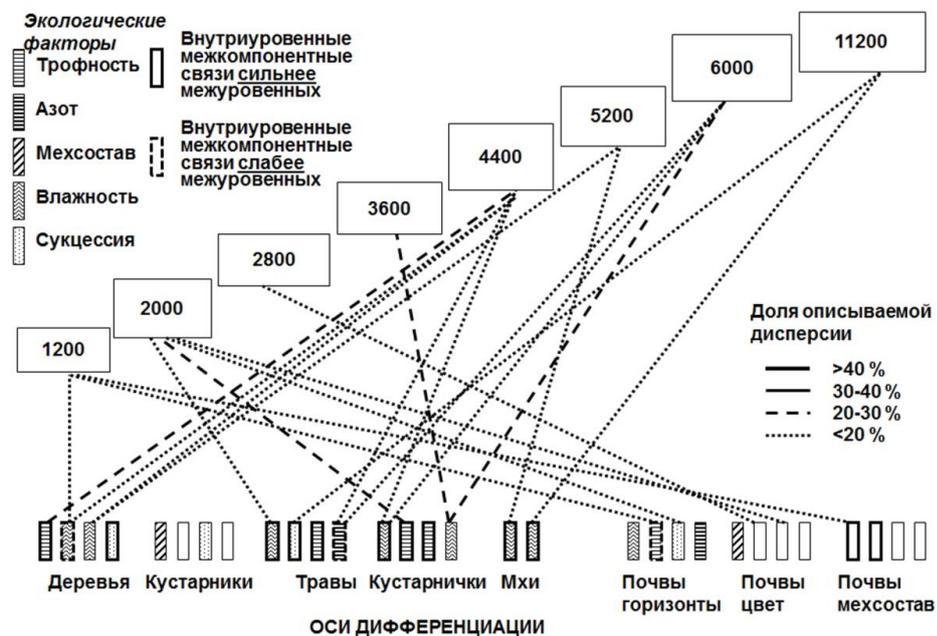


Рис. 31. Межуровневые связи для свойств компонентов южнотаежного ландшафта в Кологривском районе Костромской области. Размер ОТЕ 400 м. Доля описанной дисперсии – для уравнения «регрессии поверхности отклика». Условные обозначения – см. рис. 28.

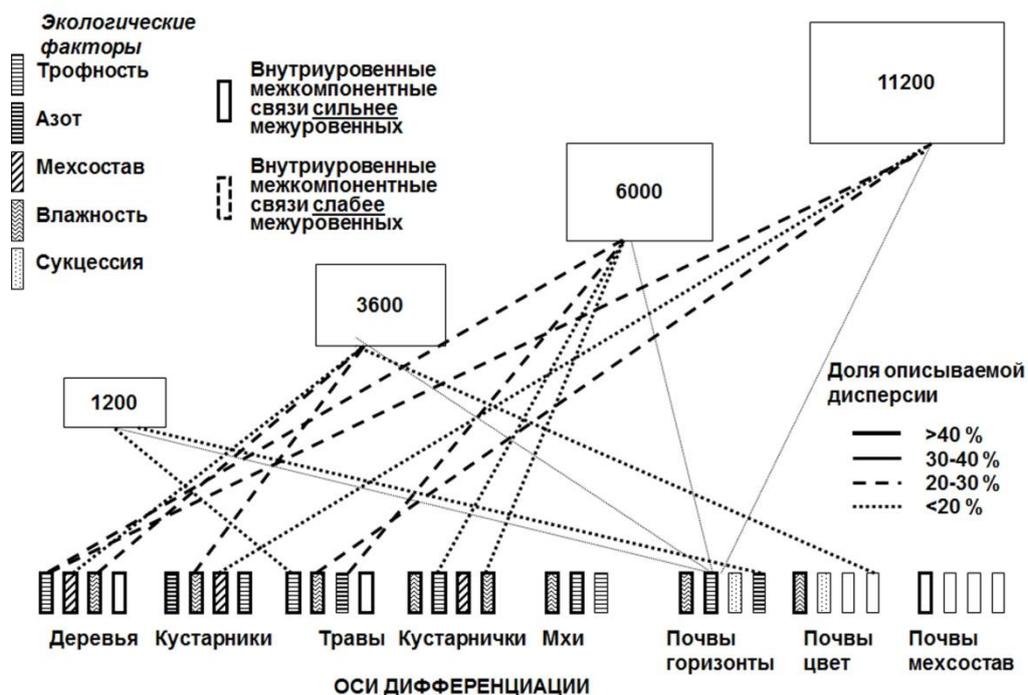


Рис. 32. Межуровневые связи для свойств компонентов южнотаежных ландшафтов в Костромской области. Размер ОТЕ 400 м. Доля описанной дисперсии – для уравнения «регрессии поверхности отклика». Условные обозначения – см. рис. 28.

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» масштабного 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 гранулометрическому составу почв (рис. 28). Соотношение видов травостоя, чувствительных к трофности почвообразующих отложений (богатых покровных суглинков и бедных песков), наилучшим образом описывается морфометрическими характеристиками окрестности со стороны 6000 м (Хорошев, 2010). Коэффициент детерминации монотонно возрастает при подстановке в регрессионное уравнение в качестве независимых переменных характеристик окрестностей возрастающего размера (таблица 12). 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 (см. раздел 2.1.4) (рис. 33, Г). Вообще максимальную чувствительность к структурам рельефа со средними размерами 6000 м имеет большая группа осей (рис. 28). 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 дерново-подзолистых или серогумусовых почвах. Во втором – преимущественно на склонах долин и террасах – доминируют сосняки с можжевельником, жимолостью, шиповником на подзолах. Таким образом, структуры рельефа со средними размерами 6000 м несут не только геоморфологическую, но и существенную почвенно-геохимическую информацию.

3-я ось дифференциации почвенных горизонтов и 4-я ось дифференциации цвета почв отзывчивы к варьированию структур рельефа размером 2000 м. Максимальные значения этих закоорелированных 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. 34). Это означает, что оба свойства достигают максимальных значений при либо минимальной расчлененности (центральные части плоских междуречий шириной не менее 2 км), либо – при максимальной (как правило, крутые склоны увалов, глубоко расчлененные оврагами). 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 междуречных 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. 33, 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 образования дерново-подзолистых почв.

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 (рис. 33, В) – 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 свойств ландшафта, чувствительных к этому уровню, безразличны конкретные эрозионные формы, а важно само положение в пределах расчлененной склоновой местности. Свойства контрастны вблизи перегиба к нижележащей террасе (т.е. в местах разгрузки грунтовых вод) и вблизи перегиба к водораздельной поверхности. Поскольку основная смысловая интерпретация данной группы осей – чувствительность к влажности, признаком единства склоновой местности следует считать глубокое положение 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). Также типична восстановительная среда 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 следует признать, что геосистемы со средними линейными размерами 6000 м создают наиболее жесткие рамочные условия для основной группы свойств операционных территориальных единиц. Крупные структуры увалистого 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.

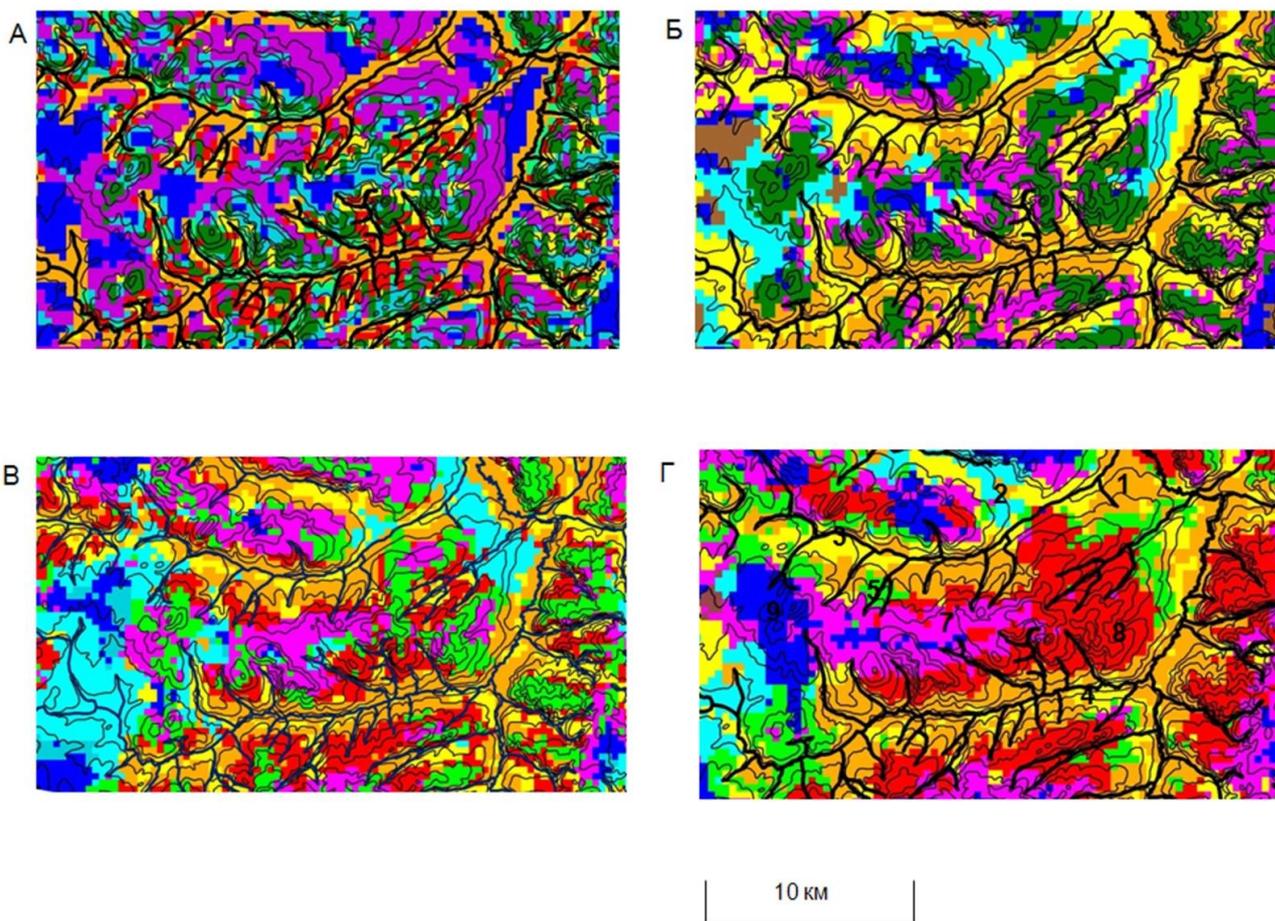


Рис. 33. Классификация рельефа хвойно-широколиственнолесного ландшафта бассейнов р. Ныша и р. Сюга в Удмуртии. Классификация методом k -средних по четырем морфометрическим характеристикам (вертикальная и горизонтальная расчлененность, вертикальная и горизонтальная кривизна) в квадратной окрестности каждого пиксела. Разрешение цифровой модели рельефа 400 м. А – квадратная окрестность со стороной 1200 м, Б – со стороной 2800 м, В – со стороной 3600 м, Г – со стороной 6000 м (цифровые обозначения – см. в тексте, раздел 4.8.2).

Таблица 12. Зависимость осей дифференциации компонентов от морфометрических характеристик рельефа в квадратной окрестности операционной территориальной единицы, обеспеченной полевыми описаниями. Доля объясненной дисперсии (коэффициент детерминации * 100) в уравнении «регрессии поверхности отклика». Разрешение цифровой модели рельефа 400 м. Удмуртия, хвойно-широколиственнолесной ландшафт. Жирным курсивом выделены достоверные уравнения.

Оси дифференциации свойств	Линейный размер квадратной окрестности, м				
	1200	2000	2800	3600	6000
Травы 1	10	8	7	10	9
Травы 2	20	22	22	24	34
Травы 3	10	12	14	20	27
Травы 4	12	13	12	12	9
Травы 5	6	6	6	5	9
Травы 6	11	11	8	6	12
Травы 7	8	9	12	8	5
Травы 8	8	12	9	12	11
Деревья 1	28	28	27	28	48
Деревья 2	18	22	20	20	34
Деревья 3	30	29	35	32	36
Деревья 4	11	14	14	18	14
Деревья 5	15	12	16	13	17
Деревья 6	8	9	9	9	7
Деревья 7	8	8	7	9	15
Деревья 8	17	12	11	11	27
Кустарнички 1	12	11	11	11	12
Кустарнички 2	4	6	9	9	9
Кустарники 1	12	15	18	21	16
Кустарники 2	10	19	22	22	34
Кустарники 3	14	10	10	9	17
Кустарники 4	10	11	10	12	17
Цвет почв 1	20	14	11	22	19
Цвет почв 2	19	19	17	18	21
Цвет почв 3	9	7	9	10	11
Цвет почв 4	7	14	13	9	15
Горизонты почв 1	7	4	3	6	12
Горизонты почв 2	20	11	12	13	10
Горизонты почв 3	19	24	22	18	27
Горизонты почв 4	11	13	13	11	9
Гран. состав 1	6	11	10	12	10
Гран. состав 2	4	8	6	4	5
Гран. состав 3	14	12	8	13	18
Гран. состав 4	16	14	10	5	7

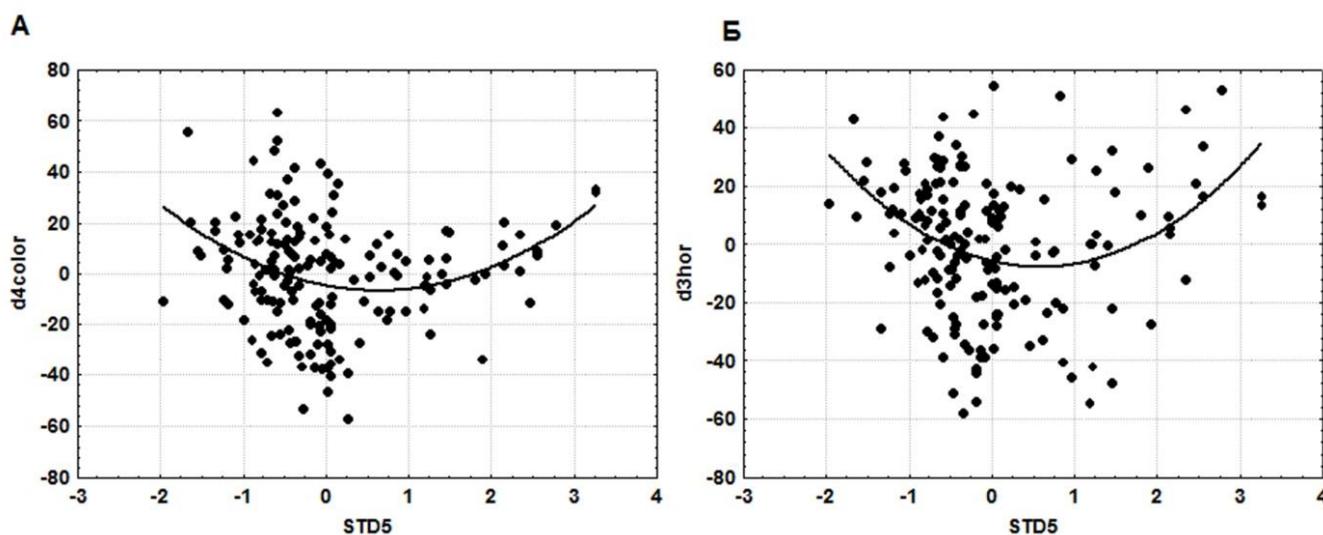


Рис. 34. Параболическая зависимость осей дифференциации цвета почв ($d4\ color$, А) и мощностей почвенных горизонтов ($d3\ hor$, Б) в Удмуртии от вертикальной расчлененности рельефа в окрестности со стороны 2000 м ($STD5$). Линейный размер ОТЕ 400 м.

В *Архангельской области (полигон «Заячья»)* рельеф со средними линейными размерами структур 1200 м является резонансным для группы осей, ответственных за дифференциацию травостоя (1-я, 2-я и 6-я оси), кустарничкового яруса (1-я и 3-я оси), кустарничкового яруса (3-я ось), почв (3-я ось горизонтов, 1-я и 4-я оси дифференциации цветовых характеристик) (рис. 29, таблица 13). 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 (см. раздел 2.1.1). 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, 2003).

Процесс эрозионного расчленения достаточно динамичен, по сравнению со временем формирования неотектонических блоков. Он может вызывать относительно быстрые изменения пространственной структуры ландшафта, следствием которых становятся: рост

дренированности выпуклых форм рельефа, 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, субнеморальных и нитрофильных растительных сообществ. При увеличении окрестности расчета с 1200-2000 до 6000 м связь свойств с вертикальной расчлененностью становится более слабой, но сохраняет достоверность (рис. 35). Антропогенная деятельность довольно четко вписывается в рамочные условия, диктуемые эрозией, так как наиболее глубокорасчлененные дренированные богатые местообитания распахиваются непрерывно с XIV века. В строении почвы это отразилось в росте глубины гумусированности профиля за счет формирования пахотного горизонта. 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. Слаборасчлененные местности с оглеенными почвами в XX веке подвергались осушительным мелиорациям и были заброшены в начале 1990-х гг. (рис. 36).

Вмещающие геосистемы других характерных размеров менее значимы для большинства свойств. Однако обращает на себя внимание подчиненность 1-й главной оси дифференциации почвенных горизонтов геосистемам с линейными размерами 3600 м. Эта ось описывает соотношение мощности горизонтов неразложившегося органического вещества, формирующихся при застойном водном режиме, и горизонтов, характерных для периодически или постоянно промывного водного режима – элювиальных и старопахотных. В уравнении «регрессии поверхности отклика» значимыми являются регрессионные коэффициенты, описывающие влияние вертикальной расчлененности, вертикальной кривизны и их неаддитивный эффект. На рис. 37 показаны контрастные варианты соотношения торфяного и элювиального горизонтов в зависимости от степени дренированности территории, определяемой возможностями латерального оттока влаги с выпуклых поверхностей. Среднее значение вертикальной расчлененности в окрестности со стороны 3600 м маркирует нижний критический порог развития подстильно-торфяных и торфяных горизонтов мощностью более 10 см.

Таблица 13. Зависимость осей дифференциации компонентов от морфометрических характеристик рельефа в квадратной окрестности операционной территориальной единицы (ОТЕ), обеспеченной полевыми описаниями. Доля объясненной дисперсии (коэффициент детерминации * 100) в уравнении «регрессии поверхности отклика». Разрешение цифровой модели рельефа 400 м. Среднетаежный ландшафт в Архангельской области. Полигон «Заячья» Жирным курсивом выделены достоверные уравнения.

Оси дифференциации	Линейный размер квадратной окрестности, м				
	1200	2000	2800	3600	6000
Травы 1	40	34	28	25	26
Травы 2	35	34	33	31	26
Травы 3	19	26	22	17	21
Травы 4	11	11	17	8	11
Травы 5	9	8	11	11	18
Травы 6	22	18	21	16	11
Травы 7	6	14	16	12	12
Травы 8	17	19	16	13	17
Деревья 1	13	20	15	15	14
Деревья 2	21	25	20	21	19
Деревья 3	19	22	16	11	13
Деревья 4	14	13	14	12	13
Кустарнички 1	16	16	13	8	13
Кустарнички 2	7	13	19	13	21
Кустарнички 3	26	24	24	22	20
Кустарнички 4	10	9	8	15	11
Кустарники 1	24	26	26	22	10
Кустарники 2	14	22	22	11	13
Кустарники 3	14	10	11	13	8
Кустарники 4	11	12	15	15	13
Мхи 1	6	7	8	8	10
Мхи 2	7	6	10	11	12
Цвет почв 1	18	14	15	16	9
Цвет почв 2	7	12	7	7	11
Цвет почв 3	12	11	9	6	7
Цвет почв 4	16	8	12	9	9
Цвет почв 5	8	6	6	11	9
Цвет почв 6	9	12	18	15	19
Горизонты почв 1	16	18	19	21	18
Горизонты почв 2	33	23	22	18	23
Горизонты почв 3	10	10	7	7	7
Горизонты почв 4	9	10	8	7	10
Гран. состав 1	10	20	11	12	12
Гран. состав 2	6	4	11	10	9
Гран. состав 3	11	9	15	10	9
Гран. состав 4	5	4	3	8	4

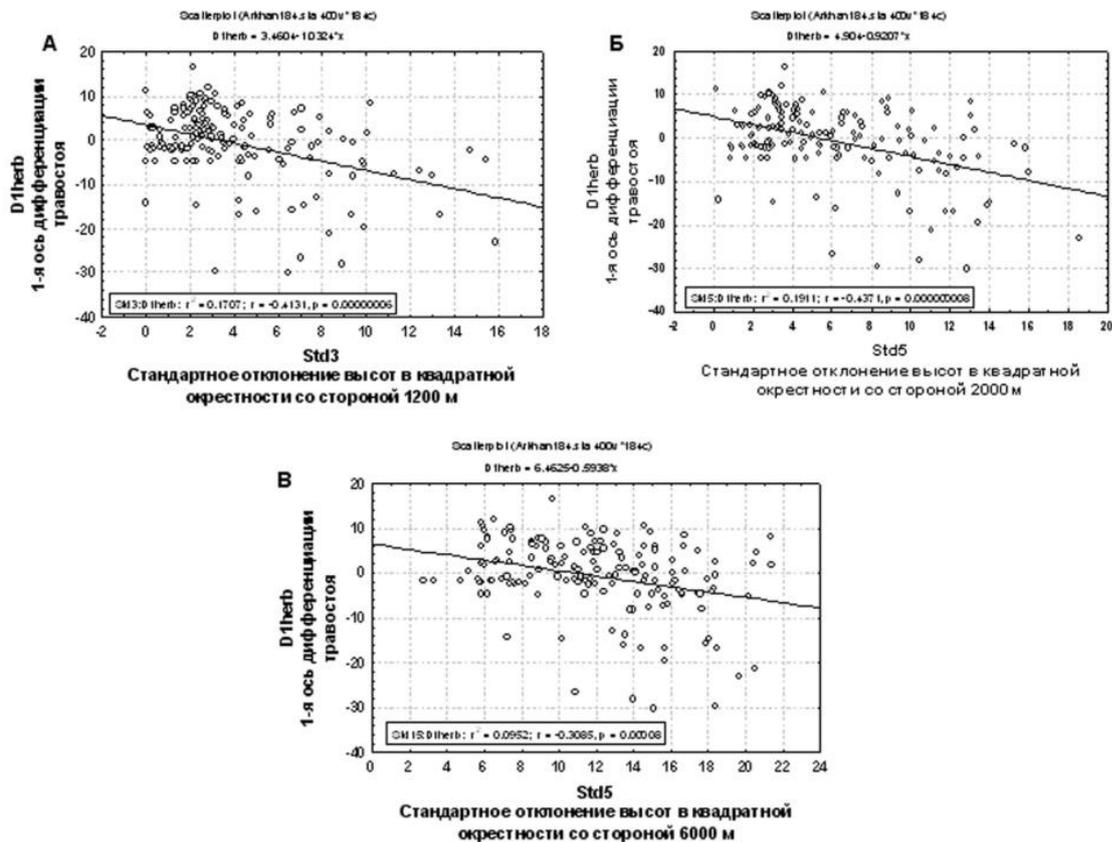


Рис. 35. Варьирование соотношения бореальных (положительные значения) и субнеморально-нигрофильных (отрицательные значения) ассоциаций травяного яруса (1-я ось дифференциации) в зависимости от вертикальной расчлененности рельефа в квадратной окрестности со стороной: А – 1200 м, Б – 2000 м, В – 6000 м. Среднетаежный ландшафт, Архангельская область, полигон «Заячья».

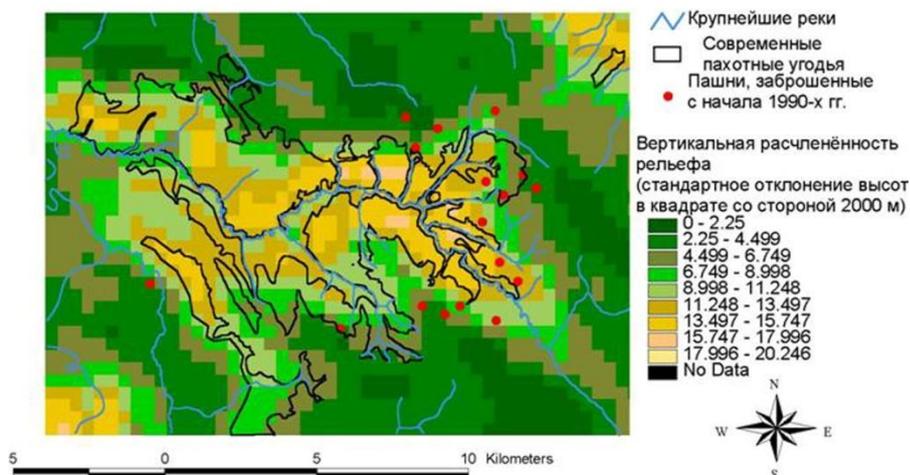


Рис. 36. Расположение заброшенных в 1990-е гг. сельскохозяйственных угодий, зарастающих древесно-кустарниковой растительностью, в связи с вертикальной расчлененностью рельефа в квадратной окрестности со стороной 2000 м. Среднетаежный ландшафт, Архангельская область, полигон «Заячья».

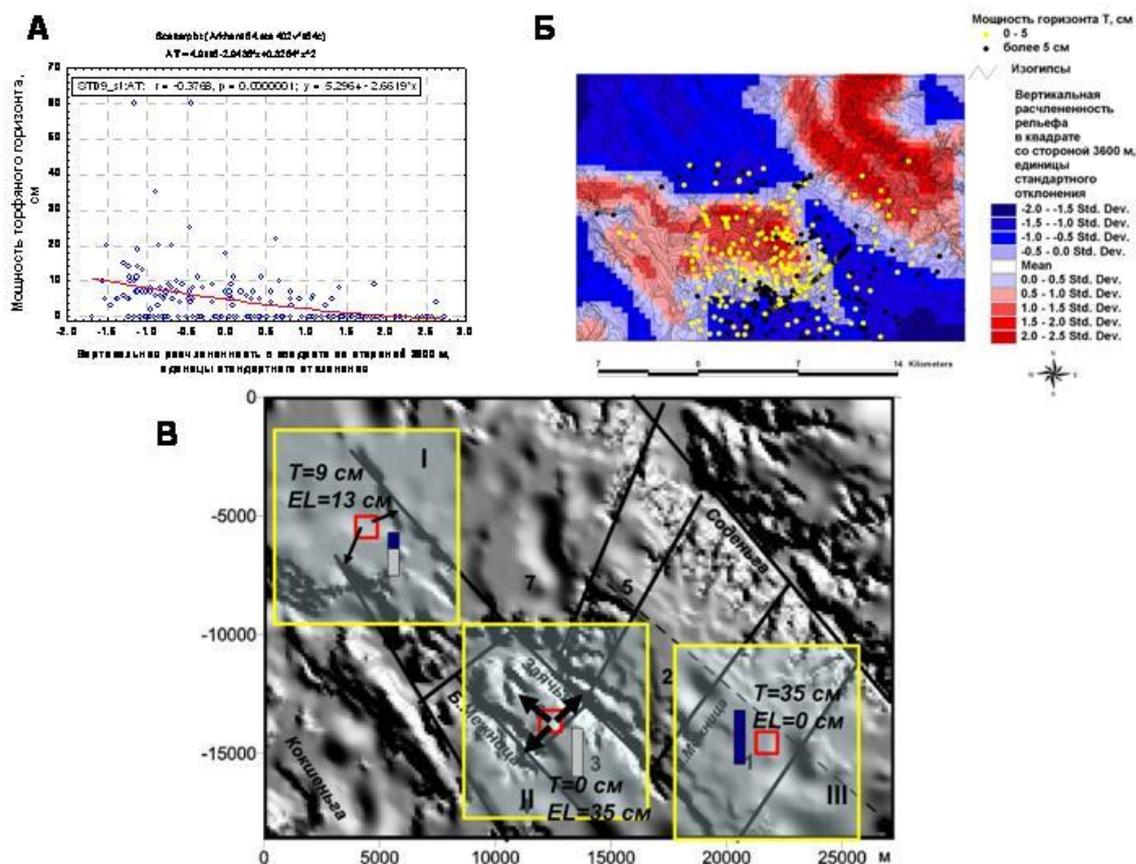


Рис. 37. Варьирование мощности торфяного и элювиального горизонтов почв в зависимости от вертикального расчленения. А – зависимости мощности торфяного горизонта от вертикальной расчлененности рельефа вмещающей геосистемы с линейным размером 3600 м. Б – расположение фаций с мощностью торфяного горизонта до 5 см и более 5 см в зависимости от вертикальной расчлененности рельефа вмещающей геосистемы с линейным размером 3600 м. В – соотношение мощностей торфяного и элювиального горизонтов в репрезентативных ОТЕ (символический красный квадрат) при разных характеристиках рельефа вмещающей геосистемы (желтый квадрат - I, II, III). Стрелками символически показано направление и интенсивность латерального оттока влаги. Цифровая модель рельефа, ОТЕ 400 м. Среднетаежный ландшафт, Архангельская область, полигон «Заячь».

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 (Хорошев, 2016 б). Комбинации форм 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 стороны 4400 м (рис. 31). Классификация по свойствам рельефа в таком квадрате различает генетически различные территории с разной густотой расчленения, зависящей от соотношения моренных, водноледниковых, эрозионных, структурных форм (рис. 38). Хорошо различаются: а) плоские моренно-водноледниковые водораздельные поверхности диаметром около 5–10 км; б) борта долины с выходами коренных пород, густо расчлененные малыми эрозионными формами; в) моренно-водноледниковые неглубоко расчлененные слабонаклонные местности; г) краевые части междуречий с сосредоточением водосборных понижений и верховьев долин.

Четко обособляется группа осей, совершенно нечувствительных к рельефу и одновременно – к гранулометрическому 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). Гранулометрический состав почв в континуальном представлении через четыре оси многомерного шкалирования не дает возможности выявить зависимость от него растительного покрова. Однако после выделения дискретных классов гранулометрического состава метод дисперсионного анализа позволяет легко выявить какой-либо класс гранулометрического состава, при котором формируются специфические свойства растительного покрова 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. 39).

Почвы при 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 использования более дробной ЦМР), либо на значительный вклад саморазвития, либо на антропогенную нарушенность. Последнее вероятно в местах искусственного лесовозобновления с обработкой почвы. При этом два фактора дифференциации цвета (фактор окисленности и фактор иллювиирования гумуса), нечувствительные к рельефу, определяются гранулометрическим составом (рис. 40).

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*

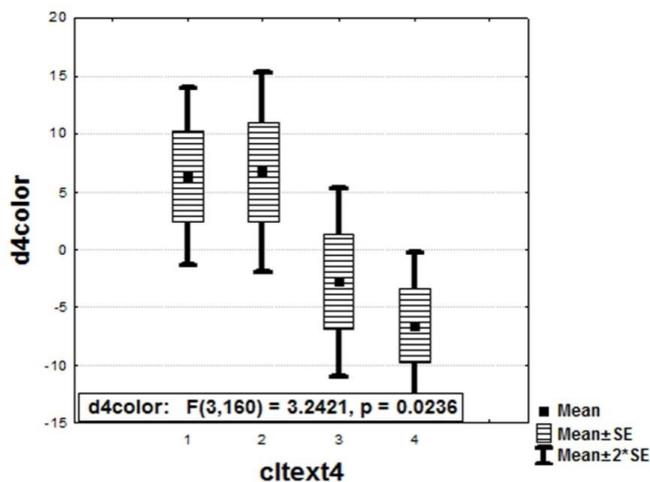


Рис. 40. Чувствительность цветовых характеристик почв Кологривского района Костромской области к классам гранулометрического состава почв. 1 – лёссовидные суглинки, 2 – двуучленные песчано-суглинистые отложения, 3 – суглинки, 4 – пески. А – оглеенные почвы (положительные значения оси $d1color$) встречаются 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)

4.4.2. Подчиненность 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 (второй аспект полимасштабной организации). 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. 28). Характеристики горизонтальной расчлененности влияют на эти процессы в окрестности со стороны 1200 м, а характеристики вертикальной расчлененности – в окрестности со стороны 3600 м. Это иллюстрирует иерархию геосистемных взаимодействий. Процессы оглеения на уровне урочища, во-первых, определяются современным процессом самоорганизации стока, охватывающим ряд пространственно сопряженных урочищ (окрестность 1200 м), а во-вторых – наследием

палеопротекста тектонической дифференциации, сформировавшим разные условия для оглеения в крупных долинах, на склонах и на плоских поверхностях увалов (окрестность 3600 м). Хорошо выделяется группа осей дифференциации древостоя, связанных так или иначе с сукцессионным состоянием (d3tree, d5tree), для 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. 33, Г). 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 природопользования, неадаптированного к геостационарной структуре.

В Кологривском районе Костромской области второй аспект полимасштабности проявляется для оси дифференциации древостоя, отражающей ход сукцессий в зависимости от трофности (5-я ось). Положительные значения оси описывают возобновление требовательной к питанию пихты под пологом осины, что свойственно ландшафтам на лессовидных суглинках. Отрицательные значения оси характерны для ландшафтов с более бедным минеральным питанием, обычно – на двучленных супесчано-суглинистых отложениях моренно-водноледниковых равнин, где характерны вторичные леса с сосной в первом ярусе и елью в подросте. Различия в ходе сукцессии, отражаются классификацией рельефа в окрестности 3600–4400 м (КД 0,19-0,20), т.е. генетическими типами рельефа (рис. 38). Второй максимум отмечен для связи с вмещающими геосистемами очень большого размера 11600 м (29-кратным размеру ОТЕ), которые отражают фактически только отличия слаборасчлененных и густорасчлененных частей физико-географической провинции Северные Увалы. При этом более вторичные осинники с пихтой в подросте получают преимущественное развитие в густорасчлененных возвышенных ландшафтах, сформированных моренными отложениями, по долинам – с выходами коренных карбонатных пород. Возобновление ельников через стадию соснового леса, свойственно ландшафтам со слабым расчленением.

Имеющийся обильный материал полевых исследований в Архангельской тайге позволяет проверить гипотезы о единообразном влиянии вмещающих геосистем на все элементарные ПТК, находящиеся в пределах одной ОТЕ и о равноправном влиянии вмещающих геосистем нескольких масштабных уровней. Для этого проведено специальное исследование на полигоне «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 в пространстве свойства геосистемы группы урочищ, то изменятся ли согласованно все фации внутри урочища, находящегося в центре этой группы урочищ?

Допустим, некоторая фация, обеспеченная полевыми данными, принадлежит ОТЕ (пикселу ЦМР) с линейным размером 400 м, примерно соответствующей по размерам рангу традиционного урочища. Фация может оказаться и не вполне репрезентативной для данной ОТЕ. Тогда есть риск неоправданно объяснить ее свойства свойствами вмещающей геосистемы, в то время как на самом деле она для данной вмещающей геосистемы нетипична в силу мощного действия некоторого узколокального фактора (например, выхода грунтовых вод, небольшого ветровала или вырубки). Если же каждая ОТЕ охарактеризована не единственным, а несколькими описаниями, то легко проверить, 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 же связь будет обнаружена, то подтвердится гипотеза о согласованном варьировании в пространстве фаций в зависимости от варьирования свойств более крупной геосистемы. С одной стороны, повторение морфометрических характеристик в примыкающих друг к другу элементарных геосистемах может влиять на результирующие оценки тесноты 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 контрастные.

При анализе межкомпонентных связей для Архангельского трансекта выявлено несколько особенностей по сравнению с исследованием в ландшафтном масштабе, т.е. в пределах участка «Заячья». Во-первых, в силу низкого разрешения ЦМР морфометрические характеристики повторяются на целых отрезках трансекта. Во-вторых, коэффициенты детерминации уравнения «регрессии поверхности отклика» намного выше, чем в ландшафтном

масштабе и достигают 0,5-0,6. 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. 30). Значимость отдельных морфометрических характеристик меняется при переходе от одной окрестности к другой. Чувствительность большинства осей к вертикальному расчленению наиболее велика при окрестности со стороны либо 6000 м, либо 1200 м. В частности, окрестность 6000 м является резонансной для оси соотношения оподзоленности и гумусированности в почвах ($d2hor$) и оси влажности травостоя ($d3herb$), по которым проводилась верификация модели ландшафтного масштаба. Чувствительность к горизонтальной расчлененности может быть максимальной для разных свойств 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 стороны 2000 и 3600 м. Вертикальная расчлененность оказывает максимальное воздействие в окрестности 6000 м; для ряда факторов характерен также пик чувствительности к окрестностям 2000 и 3600 м. Особое значение приобретают характеристики кривизны в окрестности 3600 м. Для горизонтальной расчлененности это соответствует «полосчатым» структурам, юго-восточного простирания. Они соответствуют чередованию продольных долин и ступенчатых поверхностей междуречий, связанных с неотектоническими блоками. Высотный уровень каждого блока в юго-западном направлении становится ниже предыдущего.

Исходная гипотеза предусматривает, что значения каждого свойства могут контролироваться процессами, происходящих на разных масштабных уровнях. Тогда необъясненная моделью определенного масштаба часть варьирования может быть представлена как результат наложения эффекта другого масштабного уровня. Ход рассуждений следующий: «При 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 другого уровня (например, с размерами 3600 м). Тогда возможно попытаться объяснить варьирование остатков от модели А варьированием свойств геосистемы другого уровня (модель Б). Если модель Б окажется достоверной, это будет означать, что реальные значения свойства зависят от накладывающегося влияния двух масштабных уровней вмещающих геосистем.

Проиллюстрируем сказанное на примере свойств травостоя на трансекте. Ось 3 интерпретируется как чувствительность видов к степени гидроморфности местообитания. Максимальная зависимость выявлена для геосистем с размерами 1200 м (коэффициент

детерминации КД 0,52) и 6000 м (КД 0,61). Остатки от модели для уровня 1200 м никоим образом не объясняются свойствами геосистем более высоких уровней. Однако остатки от модели для окрестности 2800 м (КД 0,46) обнаруживают достоверную связь со свойствами геосистем уровня 6000 м (КД 0,23), 3600 м (КД 0,21), 1200 м (КД 0,17). Следовательно, качество модели 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. 41, А). 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 (рис 41, Г, Д) является частью крупной наклонной дренированной ступени рельефа, примыкающей снизу к основной слабодренированной водораздельной поверхности. Уклон создает менее влажное местообитание, чем прогнозируется моделью «2800 м». Эта модель учитывает положение в долине и предполагает наличие в ней мест разгрузки грунтовых вод, но не учитывает ее принадлежность к более крупной дренированной геоморфологической структуре. Характерно, что заметное отклонение распределения остатков от нормального (рис. 41, Б), указывает на существенный вклад неучтенных факторов. В то же время модель «6000 м» имеет нормальное распределение остатков (рис. 41, В), что свидетельствует о более адекватном описании реальности. Таким образом, качество модели «2800 м» искажается действием рамочных условий, или констант, заданных более широкоохватным фактором – процессом, действующим на более высоком масштабном уровне «6000 м».

Итак, в Архангельском среднетаежном ландшафте 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 масштабного уровня. Модель ландшафтного масштаба может оказаться неприменимой к данным конкретной местности в силу неравнозначности вкладов факторов в разных секторах ландшафта.

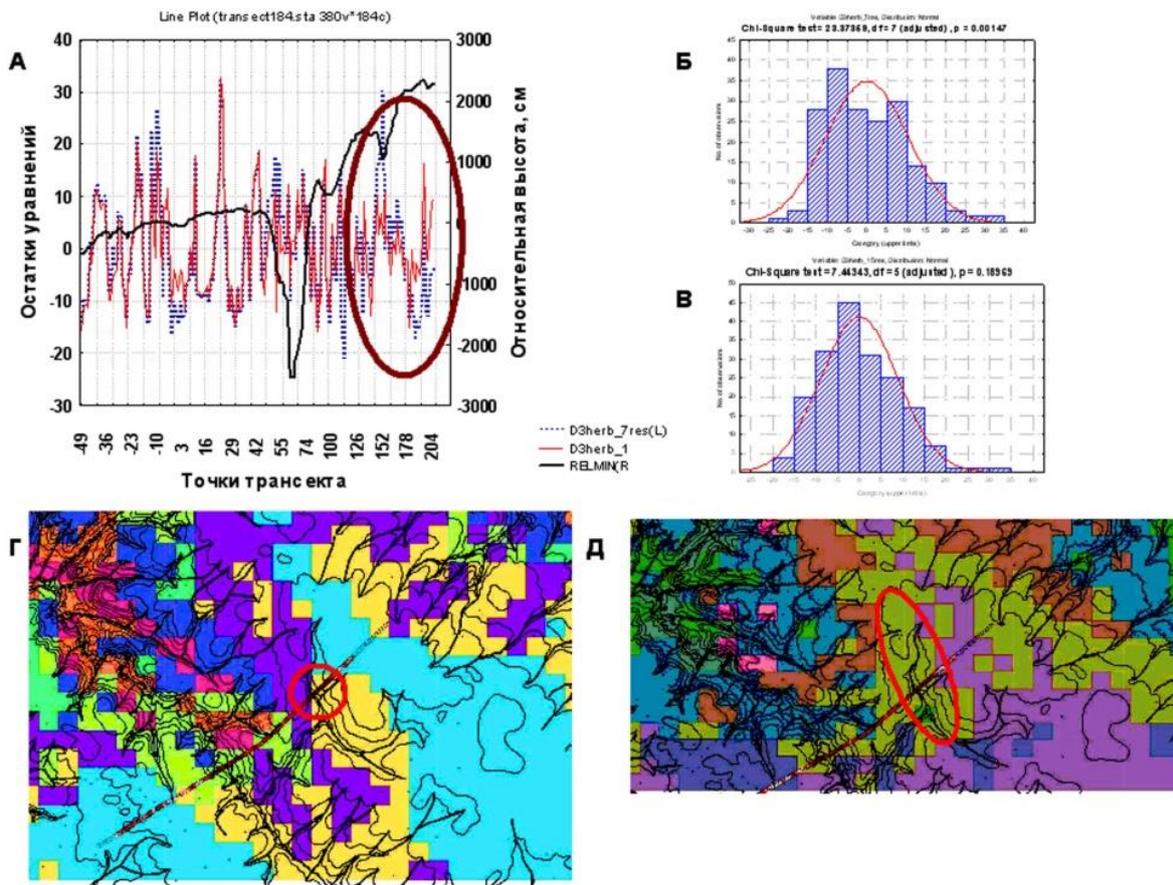


Рис. 41. Ось влажности травостоя ($d3herb$) на полигоне «Трансект» в Архангельской области: влияние структур рельефа разной размерности. На профиле трансекта (А) и картах (Г, Д) обведена зона, с разной точностью описываемая моделями.

А – варьирование остатков уравнений зависимости по трансекту. Синий пунктир ($d3herb_7res$) – остатки уравнения зависимости от рельефа в окрестности со стороной 2800 м. Красная кривая ($d3herb_15res$) – то же со стороной 6000 м. Черная кривая – гипсометрический профиль по трансекту. Б – Распределение остатков модели для окрестности 2800 м, отклоняющееся от нормального. В – Нормальное распределение остатков модели для окрестности 6000 м. Г – Классификация рельефа по морфометрическим характеристикам в окрестности со стороной 2800 м. Цветные точки – трансект: остатки от модели для окрестности 2800 м. Модель предсказывает более сухие местообитания в верховьях ручья Большого, чем наблюдаемые. Модель «2800 м» «видит» долину, но «не видит» принадлежность ее к более крупной структуре. Д – классификация рельефа по морфометрическим характеристикам в окрестности со стороной 6000 м. Цветные точки – трансект: остатки от модели для окрестности 6000 м. 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.

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, которые могли бы адекватно отражать межфациальные и межурочищные взаимодействия. Иными словами, требуется найти размеры адекватной элементарной пространственной единицы. Для этого необходим сравнительный анализ моделей межуровневых взаимодействий, построенных на основе более грубой и более детальной 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; Haining, 2003).

В *Архангельской области* сравнительное исследование межуровневых связей проведено на фациально-урочищном уровне на луговом полигоне «Становская балка» при разрешении цифровой модели рельефа 10 и 30 м на основе топографической карты масштаба 1 : 10 000. Проверялись гипотезы о существовании внутри урочища (в классическом понимании) внутренней иерархии геосистем. В качестве ОТЕ выступают единицы с линейными размерами 10 и 30 м, а как вмещающие – геосистемы с размерами, кратными 10 и 30 м. Наличие иерархии проверяется для каждого свойства отдельно. Виды статистических моделей («регрессия поверхности отклика») и ход рассуждений аналогичны описанным выше для моделей с размером ОТЕ 400 м.

Балка Становская (длиной 500 м и шириной 300 м, площадь 0,04 км², ниже – полигон «Становская балка») расположена в пределах Ростовской местности (см. раздел 2.1.1). 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. Составлено 100 комплексных ландшафтных описаний пропорционально площади, занимаемой элементами мезоформ рельефа с некоторым сгущением в днище (Хорошев и др., 2008). Описания в балке, помимо стандартных для данной работы сведений, снабжены данными химического анализа почв на всех 100 точках: содержания обменных оснований, водорода и алюминия, содержания гумуса, рН, 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 совокупности морфометрических характеристик в окрестности каждого пиксела (ОТЕ), линейный размер которой варьировал от 90 до 330 м: стандартизованным значениям вертикальной расчлененности, горизонтальной расчлененности, вертикальной кривизны и горизонтальной кривизны.

В балочном луговом урочище обособляются две группы свойств, различных по чувствительности к рельефу вмещающих геосистем. В первую группу входят характеристики гранулометрического состава почвообразующих отложений, во вторую – характеристики травяного яруса, цветовых характеристик и мощностей горизонтов почв.

Гранулометрический состав отложений варьирует в балке в наиболее тесной связи с рельефом (КД до 0,45), по сравнению с другими свойствами (таблица 14). Таким образом, в балке отражается сложная структура потоков вещества, формирующих литологические контрасты. Основной контраст противопоставляет верхнюю часть балки, слабо врезанную в моренные суглинки, и нижнюю, глубоко врезанную в пермские мергели (рис. 42, А, Б). Поскольку на протяжении балки глубина вреза, крутизна и выпуклость склонов увеличиваются, сопряженно с результатами эрозии меняется и гранулометрический состав почв. 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 в нижней части склонов в полном смыве песчано-супесчаного чехла и выводе на поверхность глинистой коры выветривания мергелей (рис. 42, В). В верхней части склонов сохраняется исходная двучленная супесчано-суглинистая толща, полностью экранирующая коренную породу (рис. 42, Г). Отсутствует существенная разница между качеством моделей для размера ОТЕ 10 и 30 м. Следовательно, модель более дробного

разрешения, различающая слабовыраженные ложбины (рис. 42, Д) и небольшие перегибы на склонах, не дает новой информации по сравнению с моделью, отражающей подурочищные контрасты.

*Таблица 14. Зависимость осей дифференциации компонентов от морфометрических характеристик рельефа в квадратной окрестности ОТЕ, обеспеченной полевыми описаниями. Доля описанной дисперсии (коэффициент детерминации * 100) в уравнении «регрессии поверхности отклика». Среднетаежный ландшафт в Архангельской области. Полигон «Становская балка». Жирным курсивом выделены достоверные уравнения.*

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
Травы 1	15	21	24	24	22	16	18	19	16	16
Травы 2	19	18	16	17	19	21	21	20	19	20
Травы 3	15	14	10	15	14	17	15	14	15	14
Травы 4	14	11	09	14	13	14	9	8	11	11
Травы 5	11	16	19	19	19	14	16	20	15	14
Гор-ты почв 1	24	24	25	21	29	23	23	18	19	26
Гор-ты почв 2	18	14	13	08	08	28	19	8	9	10
Гор-ты почв 3	23	24	24	22	24	23	21	20	23	27
Гор-ты почв 4	23	28	25	25	24	22	22	23	22	23
Цвет почв 1	20	19	21	21	27	20	16	21	23	23
Цвет почв 2	22	20	20	24	22	19	19	21	30	23
Цвет почв 3	20	15	26	21	14	25	21	24	30	16
Цвет почв 4	14	11	25	16	20	16	9	27	18	13
Цвет почв 5	24	23	30	27	29	25	22	32	32	24
Хим. свойства 1	50	45	48	47	46	48	42	40	38	41
Хим. свойства 2	12	13	11	12	12	10	14	17	16	13
Хим. свойства 3	23	26	25	23	24	21	21	23	20	23
Хим. свойства 4	37	38	41	39	34	36	40	35	42	36
Гран. состав 1	46	48	48	46	43	46	45	44	48	46
Гран. состав 2	39	42	43	42	37	39	42	39	45	41
Гран. состав 3	39	44	43	39	38	39	36	38	39	38
Гран. состав 4	21	23	22	18	21	12	21	19	18	16



Рис. 42. Полигон крупномасштабного исследования «Становская балка». Буквенные обозначения – см. в тексте.

Различия в гранулометрическом составе почв, а точнее – в составе почвообразующих отложений внутри балки, находят яркое отражение в содержании в верхних гумусированных горизонтах обменных Са, Mg, Al, гигроскопической влаги, рН. Эти показатели достаточно жестко коррелируют с морфометрическими свойствами рельефа, особенно вертикальной и горизонтальной расчлененностью (Хорошев, 2016 б). 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 (рис. 42, В) в глубоко врезанном секторе балки характеризуются высокими содержаниями обменных Са, Mg, гигроскопической влаги и щелочным диапазоном рН. Напротив, несмытые почвы на четвертичных отложениях слабоврезанного верхнего сектора и левого склона (рис. 42, Е) имеют кислую реакцию и повышенное содержание обменного Al. Соотношение содержания обменных Mg, H, Al отражается 3-й осью. Он четко выделяет верховья балки с более выраженным песчано-супесчаным чехлом, экранирующим почву от влияния мергелей, обогащенных Mg. ОТЕ с размером 10 м несколько лучше отражают значения 3-й оси, чем ОТЕ 30 м. Это свидетельствует о значимости узколокальных вариаций мощности обедненного основаниями чехла. Как и для гранулометрического 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 гранулометрического 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.

Среди почвенных характеристик более динамичные – цветовые, – прочнее связаны с рельефом (КД до 0,30–0,32), чем мощности горизонтов, при обоих размерах ОТЕ. Для цветовых характеристик характерный размер вмещающей геосистемы по четырем осям из пяти можно оценить в 210–270 м, то есть близко к установленному для гранулометрического состава почв. Для мощностей почвенных горизонтов невозможно выделить единственный приоритетный размер вмещающей геосистемы.

Варьирование свойств травяного яруса подчиняется вмещающим геосистемам нескольких рангов. Соотношение видов разных эколого-ценологических 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 (рис. 42, Ж). Даже небольшое изменение микрорельефа (ложбина на склоне балки, изменение продольного наклона днища), улавливаемое цифровой моделью с разрешением 10 м, отражается на видовом составе травостоя (рис. 42, Д). 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, пересекающего краевую часть Заячерецко-Соденьгского междуречья. Для остальных осей (3-й, 4-й, 5-й) связи с рельефом окрестностей недостоверны, что указывает на внутрифитоценотический характер закономерностей, отражаемых этими осями.

Таким образом, специальное исследование связей, 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 был проведен под руководством автора К.А. Мерекаловой для другого участка в Архангельской тайге (полигон «Медвежий»), а А.П. Еремеевой – для степного ландшафта в Оренбургской области на примере оси влажности травостоя (Хорошев и др., 2013а). Проверялась гипотеза о том, что наибольшие ошибки (разность между наблюдаемыми и предсказанными моделью значениями) модели грубого разрешения могут быть объяснены ландшафтными процессами локального масштаба, которые описываются моделью дробного разрешения. Было 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., 2013 а). На подобную закономерность 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. *Параллельное применение статистических моделей с разными размерами операционных территориальных единиц позволяет сопоставить вклады разномасштабных процессов в варьирование свойств ландшафта и выявить участки, где только детальные микромасштабные исследования позволят избежать некорректной интерполяции информации.*

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 масштабным уровням ландшафтной организации. В среднетаежном ландшафте наиболее дробный фациальный уровень управляет основными свойствами мохового покрова и гранулометрического состава почв. Более высокий урочищный уровень является основным для дифференциации травяного, кустарникового, кустарничкового ярусов, цветковых 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 значениями свойств наблюдаемыми и предсказанными моделью грубого разрешения как в таежном, так и в степном ландшафтах объясняются наложением эффектов узколокальных процессов, которые можно установить посредством моделей дробного разрешения.

Итак, данные, приведенные в разделе 4.4, показывают, что компоненты ландшафта разными свойствами могут одновременно воспринимать сигналы от процессов и явлений разных масштабных уровней, соотношение которых отражается составом плеяд взаимосвязанных свойств. На основе сравнительной количественной оценка вкладов разномасштабных эффектов (раздел 4.5) ниже будет показано, какие дополнительные возможности предоставляет этот результат для повышения корректности ландшафтного картографирования на основе межкомпонентных связей (раздел 4.8).

4.5. Разделение вкладов внутриуровневых и межуровневых связей в варьирование свойств компонентов

До сих пор мы *раздельно* рассматривали внутриуровневые межкомпонентные связи и межуровневые связи между свойствами ОТЕ и свойствами вмещающей геосистем. Однако, совершенно очевидно, что для каждого свойства могут быть одновременно существенны оба типа взаимодействий. По крайней мере, необходимо доказывать, подчиненность исключительно локальным межкомпонентным взаимодействия или, наоборот, исключительно рамочным условиями вмещающей геосистемы. Теперь следует проверить *гипотезу о существовании совокупных эффектов одновременного воздействия вмещающих геосистем нескольких рангов, т.е. суперпозиции разноранговых ландшафтных процессов*. Иначе говоря, необходимо дать количественную *сравнительную оценку вкладов внутриуровневых и межуровневых воздействий на каждое свойство компонента ландшафта*. Для решения этой задачи мы предлагаем «метод суперфакторов», суть которого описана в разделе 3.8.

Продемонстрируем результаты разделения вкладов внутриуровневых и межуровневых воздействий на примерах модельных регионов. Основной смысл описываемых ниже процедур заключается в выявлении и сравнении комбинированных эффектов воздействия группы компонентов и комбинированных эффектов группы вмещающих геосистем разных рангов.

Для среднетаежного ландшафта Архангельской области 8 взаимонезависимых «суперфакторов» в совокупности объясняют 54% варьирования значений осей дифференциации свойств (таблица 15). 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 (со стороны 2800–6000 м), 2-й суперфактор – 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 в непосредственной окрестности (1200 м). Одновременно эти же суперфакторы отражают варьирование некоторых свойств ОТЕ, зависящих 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 15. Доля совокупной дисперсии факторов дифференциации компонентов, объясненная восемью «суперфакторами». Среднетаежный ландшафт, Архангельская область, Полигон «Заячья».

Номер «суперфактора»	% объясненной дисперсии	Накопленная доля объясненной 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 вмещающим геосистемам одного или нескольких рангов. Для того чтобы количественно оценить совокупный вклад вмещающих геосистем, построена модель «регрессии поверхности отклика», в которой каждая

из осей дифференциации компонентов ставится в зависимость от четырех суперфакторов, описывающих рельеф окрестностей наилучшим образом, в данном случае – 1-го, 2-го, 6-го и 7-го суперфакторов. Например, 1-я ось дифференциации травостоя отражает соотношение, с одной стороны, нитрофильных и неморальных видов (*Urtica dioica*, *Aconitum septentrionale*, *Filipendula ulmaria*, *Aegopodium podagraria*, *Pulmonaria officinalis*), с другой – бореальных и борových (*Lycopodium clavatum*, *Luzula pilosa*, *Athyrium filix-femina*, *Trientalis europaeus*, *Gymnocarpium dryopteris*). Для этой оси оказалось, что 59% варьирования объясняется совокупным эффектом контроля со стороны геосистем вышестоящих рангов (таблица 16). Это свойство травостоя варьирует сопряженно со значениями всех четырех «суперфакторов», связанных с разными уровнями организации рельефа. Из отдельного 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) (таблица 13). Для 2-й оси дифференциации травостоя (отношение к влажности) совокупный вклад рельефа в дисперсию составляет 45%, для 3-й оси дифференциации древостоя (отношение к богатству почв) – 39% и так далее (см. таблицу 16).

Другие четыре «суперфактора» (3-й, 4-й, 5-й, 8-й) («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 внутриуровневых 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 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 «геоморфологического» ряда (таблица 16).

В то же время часть осей дифференциации компонентов подчиняется и первому, и второму рядам «суперфакторов». Иначе говоря, для них важны и характеристики рельефа вмещающих 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 источников недообъясненной дисперсии. При этом мы отдаем себе отчет, что полученные результаты основаны на избранной модели «регрессии поверхности отклика» 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 масштабных уровней более крупных геосистем. Иначе говоря, они отражают *трансляцию информации с вышестоящего уровня на нижестоящий*.

Коэффициент детерминации мультирегрессионного уравнения показывает совокупную долю дисперсии свойства, обусловленного вышестоящими геосистемами. Кроме того, мы знаем для каждого свойства, какая часть его дисперсии определяется свойствами рельефа каждой окрестности по отдельности (таблица 13). Например, дисперсия значений 1-й оси дифференциации травостоя на Архангельском среднетаежном полигоне (отношение к трофности местообитания) на 40% объясняется 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. Важно, что при расчете значений суперфакторов методом главных компонент часть морфометрической информации о рельефе каждой из этих окрестностей неизбежно теряется, хотя основная часть сохраняется в значениях суперфакторов (таблица 6). Если даже при этой потере 4 суперфактора вместе объясняют существенно большую долю варьирования исследуемого свойства, чем морфометрия 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) видов определяется *совместным эффектом процессов, связанных с несколькими масштабными 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 3600–6000 м) 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 Заячь-Соденьга, Заячь-Пукома, Заячь-Кокшеньга). Вклад более низких уровней (сторона квадрата 1200–2000 м) состоит в контрастном распределении трофности между локальными междуречьями и долинами малых водотоков (притоков Заячьей, Соденьги, Пукомы). В долинах трофность повышается за счет уменьшения мощности песчано-супесчаного чехла и приближения к поверхности карбонатных моренных суглинков. Некоторый вклад вносит также разгрузка богатыми основаниями грунтовых вод в малых долинах. Аналогичная закономерность свойственна и осям, отражающим чувствительность к трофности 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 комбинированных эффектов в формировании вертикальной структуры ландшафтов.

Противоположный пример «одноуровневой» связи с морфометрией рельефа представляет группа осей дифференциации гранулометрического состава и цветовых характеристик почв. Для них установлено наличие «резонансного уровня» связи с геосистемами с размерами 1200, 2000 или 2800 м (таблица 13). Однако модель совокупного действия нескольких масштабных уровней не дает приращения объясненной дисперсии (таблица 16). Следовательно, рамочные условия могут создавать только геосистемы указанных размеров по отдельности. 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 гранулометрического состава.

Наиболее ярко проявляется «одноуровневая» зависимость от рельефа вышестоящих геосистем в хвойно-широколиственнолесном ландшафте Удмуртии, где ни одна из осей дифференциации ярусов фитоценоза не испытывает комбинированного эффекта нескольких масштабных уровней (Хорошев, 2016 б). Основные контрасты древостоя, кустарников, некоторых свойств травостоя, морфологического строения и цветовой гаммы почв, однозначно объясняются принадлежностью геосистемам с линейными размерами около 6 км (таблица 12). Этот размер соответствует местностям с разной степенью врезанности широких речных долин в

увалистые пластовые равнины (рис. 33, Г). Основные различия 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 «полярность» размещения бореальных и неморальных видов растений, интенсивности накопления лесной подстилки.

Таблица 16. Доля объясненной дисперсии (коэффициенты детерминации $R^2 \cdot 100$) в модели «регрессии поверхности отклика», 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 масштабным уровням рельефа) или для отдельным компонентам (возможен комбинированный эффект взаимодействия компонентов) (принцип сравнения – см. таблицу 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
Травы 1	59	27	86	-30	Свойство подчиняется процессам одной природы, но на нескольких уровнях рельефа
Травы 2	45	20	65	-9	
Травы 3	18	44	62	40	Четко выражена подчиненность единственному уровню рельефа (окрестность со стороны 2000 м), учет других уровней не дает роста доли описываемой дисперсии
Травы 4	24	15	39	-9	
Травы 5	14	21	35	7	

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
Травы 6	23	18	41	-5	Четко выражена подчиненность единственному уровню рельефа (окрестность со стороны 1200 м), учет других уровней не дает роста доли описываемой дисперсии
Травы 7	22	21	43	-1	
Травы 8	13	15	28	2	
Деревья 1	16	34	52	24	Тесная связь со всеми свойствами фации, отражает целостные свойства фации, но не вмещающих геосистем
Деревья 2	31	40	71	9	
Деревья 3	39	20	59	-19	Свойство подчиняется процессам одной природы, но на нескольких уровнях рельефа
Деревья 4	13	9	22	-4	
Кустарнички 1	25	39	64	14	
Кустарнички 2	11	37	48	26	Тесная связь со всеми свойствами фации, отражает целостные свойства фации, но не вмещающих геосистем
Кустарнички 3	32	38	70	6	
Кустарнички 4	12	17	29	5	

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
Кустарники 1	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.
Кустарники 2	29	18	47	-11	Высокая связь с отдельными компонентами фации мнимая – отражает их общую подчиненность рельефу вмещающих геосистем.
Кустарники 3	33	15	48	-18	Высокая связь с отдельными компонентами фации мнимая – отражает их общую подчиненность рельефу вмещающих геосистем.
Кустарники 4	12	28	40	16	
Мхи 1	7	24	31	17	
Мхи 2	27	21	48	-6	
Цвет почв 1	14	21	35	7	
Цвет почв 2	8	19	27	11	
Цвет почв 3	22	9	31	-13	
Цвет почв 4	19	13	32	-6	

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
Цвет почв 5	11	10	21	-1	
Цвет почв 6	20	15	35	-5	
Гор-ты почв 1	17	39	56	22	
Гор-ты почв 2	39	26	65	-13	
Гор-ты почв 3	10	9	19	-1	Процессы чисто почвенные (образование вложенного подзола), не вызывающие реакции фитоценоза. Имеют узколокальный характер, не отражают свойств вмещающих ПТК
Гор-ты почв 4	12	18	30	6	Процессы чисто почвенные, не вызывающие реакции фитоценоза. Имеют узколокальный характер, не отражают свойств вмещающих ПТК
Гран.состав 1	15	13	28	-2	
Гран.состав 2	3	15	18	12	
Гран.состав 3	12	21	33	9	
Гран.состав 4	5	11	16	6	

В пределах южнотаежных ландшафтов Костромской области как на районном, так и на региональном уровнях охвата, комбинированные эффекты влияния нескольких уровней вышестоящих геосистем проявляются для двух видов ландшафтных контрастов (Хорошев, 2016 б). Во-первых, это соотношение признаков борových 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.

Второй ряд суперфакторов выделен с целью оценить вклад внутриуровневых межкомпонентных отношений, не зависящих от вмещающих геосистем. В идеале это вертикальные межкомпонентные отношения в чистом виде. Так, 3-я ось дифференциации травостоя на Архангельском полигоне «Заячья» с высокой достоверностью контролируется группой суперфакторов, нечувствительных к рельефу (таблица 16). Ось наиболее чувствительна к единственному уровню рельефа с линейными размерами около 2 км с коэффициентом детерминации 0,26 (таблица 13). Совокупное воздействие суперфакторов геоморфологического содержания не дает приращения объясненной дисперсии. Ось относится к числу трудноинтерпретируемых, так как нет явных указаний на связь ее значений с условиями местообитания, хотя есть зависимость от сомкнутости крон, диаметров и высоты деревьев. Поэтому при интерпретации приоритет отдается гипотезе о внутрифитоценоотических межъярусных взаимодействиях. Однако данная ось отражает рост обилия ряда видов (кислица, майник, медуница, линнея) в относительно малонарушенных старовозрастных сомкнутых древостоях дренированных склоновых местообитаний. Сохранность подобных лесов от рубок объясняется именно их «неудобным» крутосклонным положением. Таким образом, рост обилия указанной группы видов, скорее всего, объясняется их адаптированностью к старовозрастным состояниям темной хвойного леса на склонах с достаточно обильным минеральным питанием. Важна не принадлежность фации к долине как к комбинации мезоформ, а собственное свойство фации – положение на крутом ее склоне, который в принципе может быть занят этой единственной фацией. Если выразаться точнее, то для формирования указанной ассоциации травяных видов важны даже не свойства склона как такового (например, факт интенсивного поверхностного стока и невозможность накопления торфа). Важна именно его недоступность для рубок и возможность по этой причине сохранения древостоя, создающего благоприятную среду для этой ассоциации. Принципиален 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 формирования указанной ассоциации. Но

в реальности на пологих склонах и плоских поверхностях древостои часто относительно молоды (20-40 лет) и имеют под пологом другие ассоциации.

Отметим, что и для второй группы суперфакторов свойственна потеря части информации о почвенных и фитоценологических характеристиках. Но тем более ценной представляется превышение коэффициента детерминации уравнения второй степени, 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 эффектом четырех не связанных с рельефом суперфакторов (коэффициент детерминации КД 0,31), 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 специфического диапазона свойств в системе компонентов: каждый из компонентов по отдельности не может создать необходимых условий преобладания сфагновых или зеленых мхов.

Таким образом, применение метода «суперфакторов» позволило прийти к следующим выводам о причинах пространственного варьирования свойств ландшафта:

1. Вмещающие геосистемы разных рангов могут создавать совокупный эффект влияния на большинство свойств ландшафта.
2. 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 геосистем и внутриуровневых межкомпонентных связей.
5. Совокупный вклад контролируемых рельефом процессов и явлений разных масштабных уровней в пространственное варьирование свойств компонентов ландшафта может составлять для разных свойства от 20 до 60% дисперсии. От 15 до 50% дисперсии может объясняться локальными внутрифитоценотическими и почвенно-фитоценотическими взаимодействиями в ходе саморазвития компонентной структуры.

4.6. Пространственные рамки действия межкомпонентных связей

Имея оценки соотношения вкладов значимых внутриуровневых 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). 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*) уравнения, в котором зависимой переменной является та или иная ось дифференциации одного компонента, а независимыми – совокупность осей дифференциации другого компонента или свойств рельефа (см. разделы 3.6.2, 3.7.2). Предмет анализа – поиск причин наиболее сильных отклонений значений, предсказанных моделью, 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 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), нетипичную для данных условий мощность почвенного горизонта и т. п. В более общем смысле выявляется геохора с единым видом зависимости, т.е. с относительно жесткой адаптацией компонентов друг к другу.

Эта задача может иметь два варианта. Первый вариант – когда континуальные данные имеются только для рельефа в виде ЦМР, а почвы и растительный покров описаны только в репрезентативных фациях. Со вторым вариантом мы сталкиваемся, 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).

4.6.1. Выявление ареала действия межуровневых и внутриуровневых связей с использованием ограниченной выборки полевых данных

Первый вариант решения задачи покажем на примере сначала межуровневой, затем - внутриуровневой связи. Для репрезентативных фаций имеются полевые данные, свойства вмещающего пространства описаны континуальными данными цифровой модели рельефа.

Для локализации ареалов проявления межуровневой связи между свойствами фитоценоза и рельефом вмещающих геосистем был проведен анализ пространственного распределения остатков уравнений «регрессии поверхности отклика». Продемонстрируем результаты на примере уравнения, связывающего первую по значимости ось дифференциации видового состава древостоя с характеристиками рельефа в некоторой окрестности. Ось соответствует соотношению древесных пород с противоположной чувствительностью к тропности (богатству) местообитания. В хвойно-широколиственных лесах Удмуртии это – соотношение широколиственных и хвойных пород, в средней тайге Архангельской области – соотношение обилия ели и сосны.

На примере ландшафтов пластовых равнин Удмуртии установлены следующие генетически обусловленные уровни организации рельефа (рис. 33).

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 пикселей) уже не вполне четко выделяет индивидуальные эрозионные мезоформы рельефа, но хорошо отражает асимметрию рельефа, связанную с моноклиальным 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. 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 детализированы, чем при классификации в окрестности со стороной 1200 м. Хорошо различаются участки междуречий разной ширины и морфологии (плоские, холмистые,

увалистые), что характеризует наследие геологических процессов прошлого.

3) Классификация по характеристикам в квадрате со стороной 2800 м (7 пикселей) отражает уже не индивидуальные урочища, а их группы с сочетанием положительных и отрицательных, выпуклых и вогнутых форм, различные по дробности морфологической структуры. Последняя ассоциируется с трещиноватостью коренных пород, которая определяет густоту и конфигурацию эрозионной сети. 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 пикселей) отражает в целом увалистое строение территории с различием некоторых контрастов морфологии речных долин, склонов и поверхностей увалов.

5) Классификация по характеристикам в квадрате со стороной 6000 м (15 пикселей) 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 валлообразными деформациями осадочного чехла.

Сопоставив величины остатков от уравнений, составленных для окрестностей разного размера, можно выделить три категории свойств:

Категория 1. Исследуемое свойство не объясняется рельефом и контролируемыми им процессами ни для одной окрестности. Численная характеристика свойства определяется процессами принципиально другой природы, возникшими вне связи с рельефом (отображаемым ЦМР с разрешением 400 м), в том числе в результате саморазвития фации. Такой результат, например, получен для видового состава древесного яруса в Архангельской области и Удмуртии при условии принадлежности к категории заболоченных территорий с накоплением торфа.

Категория 2. Исследуемое свойство подчиняется правилу, действительному только для одного масштабного уровня (рельеф в некоторой окрестности). При этом малы коэффициенты детерминации и велики остатки от уравнений, построенных для других окрестностей. Это интерпретируется как наличие какого-то одного ведущего процесса, контролируемого контрастами рельефа данной окрестности. Такой результат получен, например, для видового состава древесного яруса, но действителен он только для плоских водораздельных поверхностей, сложенных двучленными отложениями. Состав древостоя в южной Удмуртии 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).

Категория 3. Исследуемое свойство подчиняется процессу в каком-либо «узком» масштабе, индифферентно к «среднему» масштабу и подчиняется некоторому процессу в «широком» масштабе. 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. На масштабном уровне, соответствующем окрестности со стороной 1200 м, состав древостоя определяется вертикальной расчлененностью: наиболее расчлененные территории соответствуют наиболее богатым местообитаниям с выходами коренных карбонатных глин пермского возраста. На масштабном уровне, 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. Последние представлены в основном сосной, в силу песчаного выполнения долин и нижних частей придолинных склонов. В то же время выявлен масштабный уровень, на котором зависимость от рельефа пропадает. Он соответствует окрестности со стороной 2800 м и отражает гидрогеологические контрасты, связанные с разной трещиноватостью коренных пород, которая отражается в густоте гидрографической сети. Следовательно, этот масштабный уровень для соотношения широколиственных и хвойных пород незначим.

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. Наиболее удобным полигоном для демонстрации решения задачи представляется степной заповедный ландшафт по двум причинам: а) единый тип растительности; б) отсутствие антропогенных модификаций. Таким условиям отвечает участок «Айтуарская степь» государственного заповедника «Оренбургский» (см. раздел 2.1.6). Важное преимущество заповедной степи, по сравнению с нарушенным лесным ландшафтом, – возможность использования цифровой модели рельефа 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 вмещающих геосистем, основанный на статистической оценке связей между уровнями организации ландшафтного пространства (Хорошев, Алещенко, 2005, 2008). Метод позволяет определить для каждой ОТЕ размеры вмещающей геосистемы и размеры геохоры с единым типом межкомпонентных отношений, а также конкретные ареалы существования таких геохор.

По данным оптической плотности спектральных каналов снимка Landsat от 23.09.2001 методом главных компонент выделены некоррелированные латентные переменные – факторы дифференциации растительного покрова. Они использовались как зависимые переменные в линейных мультирегрессионных уравнениях. По цифровой модели рельефа SRTM с разрешением 90 м рассчитаны морфометрические характеристики рельефа в скользящем квадрате: вертикальная расчлененность, горизонтальная расчлененность, вертикальная кривизна, горизонтальная кривизна. Исходные характеристики стандартизованы. Рассчитанная характеристика отнесена к центральному пикселу квадрата. Морфометрические характеристики рельефа служили в уравнениях независимыми переменными. Метод выделения ареалов действия межуровневых связей для континуальных данных обоснован в разделе 3.7.2. Поясним реализацию метода на простом примере из рассматриваемого региона на Южном Урале.

В пределах горного склона с преобладанием степных ксерофитов есть серия ложбин. Каждая ложбина 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 вмещающей геосистемы – ложбины. Чем глубже врезан участок ложбины в склон, тем больше в ее днище концентрируется влага и тем больше мезофитов в фитоценозе. Это правило справедливо для всех ложбин и выдерживается в пределах всего склона. Поэтому мозаичный склон в целом может быть назван геохорой. Ранг выявляется на основании наличия межкомпонентной связи и выражается через установленный размер геохоры.

Линейные размеры гипотетической геохоры варьировали от 270 (3 пиксела по 90 м) до 1890 м (21 пиксел по 90 м) с шагом 180 м. Для каждого пиксела геохоры реализованы процедуры, приведенные на рис. 19. Методом информационных мер, предложенным Г.М. Алещенко и реализованным им в программе FRACDIM, 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 (Хорошев, Алещенко, 2008). Метод позволяет также определить оптимальную дробность разбиения на интервалы области значений абсолютных высот. Для дальнейшего анализа выбраны гипотетические геосистемы с линейными размерами 450, 990 и

1890 м как наиболее близкие к выявленным уровням. Таким образом, мы выявляли, *существует ли в пределах геохоры единый вид зависимости свойств ОТЕ (со стороной 90 м) от свойств вмещающей геосистемы (со стороной 450, 990 или 1890 м), а также – каков размер такой геохоры*. Для исследуемого степного ландшафта мы ограничивались только той частью процедуры, описанной на рис. 19, которая предусматривает выявление ареалов существования *какой-либо* зависимости на основании коэффициентов детерминации. Классификация видов зависимости по регрессионным коэффициентам не проводилась.

Если коэффициент детерминации уравнения достаточно велик и достоверен (нами принят критерий – описание более 40% варьирования при $p < 0,05$), то считалось возможным говорить о существовании геохоры, объединяющей ОТЕ, которые одинаковым образом зависят от вмещающих геосистем. Если при увеличении размера квадрата до некоторой величины происходит резкое снижение коэффициента детерминации до недостоверных значений («растворение связи»), то считалось, что в данном квадрате не существует единого правила, транслирующего информацию от вмещающих геосистем к подчиненным им ОТЕ. Тогда квадрат предшествующего размера можно считать максимальным размером геохоры. Интерпретация предлагается следующая: за пределами геохоры рельеф окрестности не создает каких-либо рамочных условий для растительного покрова ОТЕ, то есть невозможно говорить о существовании вмещающей геосистемы. Тогда делается предположение, что свойства фитоценоза ОТЕ зависит каким-либо образом от рельефа другой вмещающей геосистемы, которую мы ищем, повторяя расчет для другого размера квадратной окрестности.

Обработка данных космоснимка методом главных компонент показала, что пространственная дифференциация растительного покрова на 98% определяется четырьмя некоррелированными ортогональными факторами. 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 Айтуарской степи ареалы повышенной продуктивности связаны с днищами балок и лощин и местами склоновой разгрузки подземных вод. Фактор 2 интерпретируется как степень петрофитности фитоценоза в зависимости от меры влияния каменистого субстрата. 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,

сколько с различием растительного покрова на структурных (менее крутых, в основном восточных) и аструктурных (более крутых, в основном западных) склонов.

Окрестность 450 м выбрана для проверки гипотезы об узколокальном характере зависимости фитоценоза от процессов, которые контролируются комбинацией форм рельефа, сопоставимых с размерами локальных междуречий между лощинами на склонах гряд. Согласно информационной мере, эта окрестность оптимальна для выделения форм рельефа, отличающихся по абсолютной высоте не менее чем на 6 м. Это позволяет различать лощины и ложбины практически на любом их отрезке, начиная от водосборного понижения. Окрестность со стороны 450 м оказалась оптимальной для описания варьирования свойств растительного покрова, чувствительных к каменистости и экспозиции (2-й и 3-й факторы). Окрестность 990 м оптимальна для выделения форм рельефа, отличающихся по абсолютной высоте не менее чем на 20 м, что сопоставимо с глубиной тектонически обусловленных наиболее глубоковрезанных участков лоцин. Отражается ярусность грядово-балочного рельефа по соотношению рассеяния и аккумуляции вещества. Окрестность 1890 м представляет гипотетически максимальный размер геосистемы, сопоставимой с размерами цикла чередования крупнейших шести балок и увалов. Повышенной чувствительностью к этому уровню обладает 1-й фактор «влажности». Геосистемы такого размера соответствуют секторам с преобладанием склонов одинаковой крутизны, что объясняется разной интенсивностью эрозионно-денудационного расчленения исходной эоценовой поверхности выравнивания.

Далее был получен ответ на следующий вопрос: в ареале (геохоре) какого размера может проявляться закономерная связь растительного покрова ОТЕ с рельефом вмещающих геосистем? Критерием считалась доля площади ландшафта, для которой существуют геохоры с высоким значением коэффициента детерминации мультирегрессионного уравнения. При решении этой задачи используются модели для различных комбинаций двух параметров: 1) окрестности, свойства которой приняты как характеристики вмещающей геосистемы (со стороны 450, 990 или 1890 м), контролирующей состояние ОТЕ, 2) ареала, в котором производится расчет уравнения – размеры геохоры с единым типом отношений между растительностью и рельефом вмещающей геосистемы (линейные размеры квадрата от 270 до 1890 м с шагом 180 м). На рис. 43 для вмещающих геосистем трех размеров (со стороны 450, 990 и 1890 м) демонстрируются кривые, показывающие долю территории от площади ландшафта (в %), на которой существует зависимость фитоценоза ОТЕ от рельефа вмещающих геосистем с коэффициентами детерминации (КД) более 0,2, более 0,4 и более 0,5. По мере роста окрестности расчета (гипотетической геохоры) от 3-х кратной до 21-кратной по отношению к размеру ОТЕ эта доля заметно уменьшается. При превышении некоторого размера окрестности расчета доля уменьшается особенно резко (наблюдается вогнутый перегиб кривой). Такая

окрестность принималась за предельный размер геохор при которой в ландшафте существуют единообразные виды зависимости ОТЕ от рельефа вмещающих геосистем. Эти виды зависимости необязательно одинаковые. Чтобы получить наилучшую комбинацию размеров вмещающих геосистем и размеров геохор сравнивались доли территории, на которых существуют исследуемые зависимости, при разных размерах вмещающих геосистем (рис. 43, серии А1-А2-А3; В1-В2-В3, В1-В2-В3).

На графиках (рис. 43), прежде всего, бросается в глаза, что наиболее распространены в ландшафте геохоры, размеры которых превышают размер ОТЕ не более чем в 3-5 раз. Если принять за критерий коэффициент детерминации не менее 0,4, то такие геохоры могут занимать более 30% территории. Геохоры более крупного размера с единым видом межуровневой зависимости могут занимать не более 10-15% территории.

Максимальная площадь геохор при разных размерах вмещающих геосистем характерна для свойств фитоценоза, чувствительных к экспозиции (3-й фактор), по сравнению со свойствами, чувствительными к 1-му и 2-му факторам. При размере вмещающей геосистемы 990 м свойства, контролируемые 3-м фактором, варьируют согласованно с рельефом на существенно большей территории, чем при гипотетических размерах вмещающих вмещающей геосистемы 450 и 1890 м. 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. На территории существуют геохоры с размерами до 1530 м, в которых более 50% дисперсии значений 3-го фактора описывается морфометрическими характеристиками рельефа вмещающих геосистем с линейными размерами 450 и 990 м.

Наиболее значимый 1-й фактор дифференциации растительного покрова (фактор влажности) связан с рельефом на меньшей площади, по сравнению с 2-м и 3-м по значимости факторами. Однотипная зависимость между значениями фактора влажности и рельефом вмещающих геосистем может выдерживаться на основной части территории в ареале, как правило, не более 630-810 м (7-9-кратные размеру ОТЕ) в поперечнике. Геохоры таких предельных размеров могут охватывать 8-15% территории, если за нижний предел принимать коэффициенты детерминации более 0,4. Если принять менее жесткий критерий (КД более 0,2), то суммарная площадь геохор таких размеров может достигать 45-55%. Случаи, когда геохоры достигают более крупных размеров, представлены на территории, составляющих всего лишь первые проценты от площади ландшафта. Следовательно, можно констатировать частую смену в пространстве видов зависимости увлажнения от рельефа. Это объясняется чередованием синклинальных и антиклинальных складок, частым чередованием пластов осадочных пород и вариациями их падения, асимметрией увалов, разнонаправленными

разрывными нарушениями. Однако в восточном секторе ландшафта геохоры имеют более крупные размеры. Система миграции влаги здесь 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. Иначе говоря, геохоры имеют малые размеры.

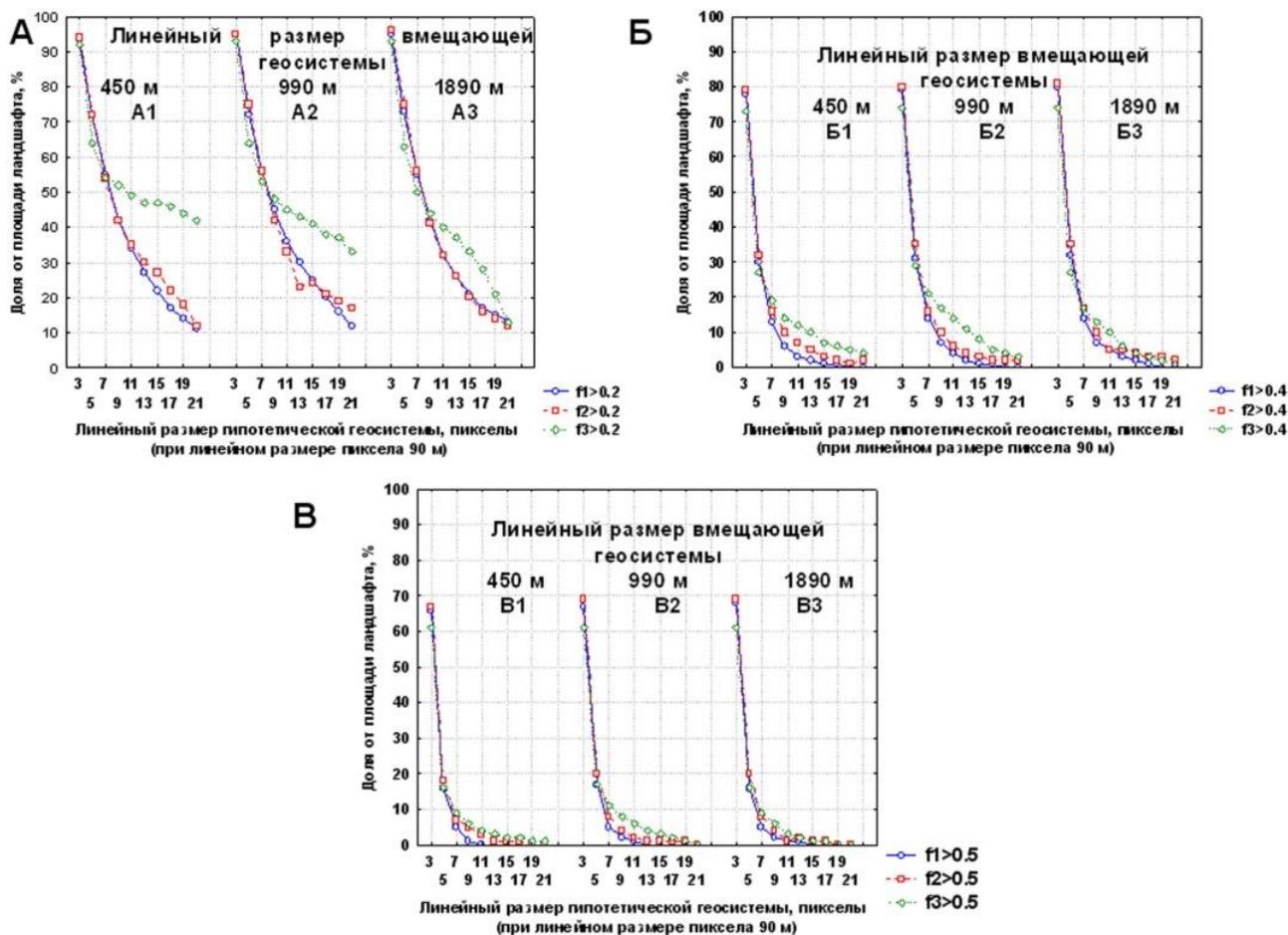


Рис. 43. Доля от площади ландшафта Айтуарской степи (%), для которой существуют геохоры с единым правилом связи между свойствами фитоценоза и рельефа геомера: фактор дифференциации растительности по космическому снимку Landsat 23.09.2001 достоверно описывается морфометрическими характеристиками рельефа вмещающей геосистемы. А – коэффициент детерминации мультирегрессионного уравнения более 0,2. Б – то же, более 0,4. В – то же, более 0,5. F1 – фактор влажности, F2 – фактор каменистости, F3 – фактор экспозиции.

Установлено, что для 1-го фактора ОТЕ, зависящие от вмещающей геосистемы с линейными размерами 990 м, обычно включены в квадратный ареал со стороной до 450 м. В таком ареале все ОТЕ зависят от вмещающих геосистем по единому правилу («закону композиции»). Если же ОТЕ зависят от вмещающей геосистемы с линейными размерами 1890 м, то они могут быть включены в квадратный ареал со стороной не более 630 м.

Для 2-го фактора установлены две комбинации параметров геосистем: 1) ОТЕ, контролируемые вмещающими геосистемами с линейным размером 450 м, объединяются в геохоры с линейными размерами до 810 м; 2) ОТЕ, контролируемые вмещающими геосистемами с линейным размером 990 м, объединяются в геохоры с линейными размерами до 1890 м.

Для 3-го фактора установлены следующие комбинации параметров геосистем: 1) ОТЕ, контролируемые вмещающими геосистемами с линейным размером 990 м, включены в геохоры с линейными размерами до 1350 м; 2) ОТЕ, контролируемые вмещающими геосистемами с линейным размером 450 м, объединяются в геохоры с линейными размерами до 1890 м.

Поскольку растительный покров адаптирован к рельефу (равновесен по отношению к рельефу) по единому правилу только в локальной окрестности, вызывает интерес распределение в ландшафте остатков от регрессионной модели. Рассмотрим остатки модели, построенной для фактора влажности (1-й фактор) для линейных размеров вмещающей геосистемы 270 и 450 м (рис. 44). 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 вмещающих геосистем со стороной 270 м, так и со стороной 450 м, достаточно четко локализованы в нескольких видах урочищ.

Во-первых, большие (по модулю) остатки локализуются в глубоковрезанных отрезках лощин по склонам 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 – одного 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 свойственна осыпным участкам крутых склонов. Осыпи занимают меньшее пространство, чем аналогичные по морфометрическим свойствам крутые склоны с сомкнутым растительным покровом. По этой причине там нарушается типичная для ландшафта

зависимость. В-третьих, 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 ложин, изогнутостью эрозионных форм, увеличенными размерами боковых гребней. Участок расположен в пределах осевой зоны синклинали складки, заключенной между балками Камысай и Шинбутак, но в приподнятой и глубоко расчлененной ее южной части.

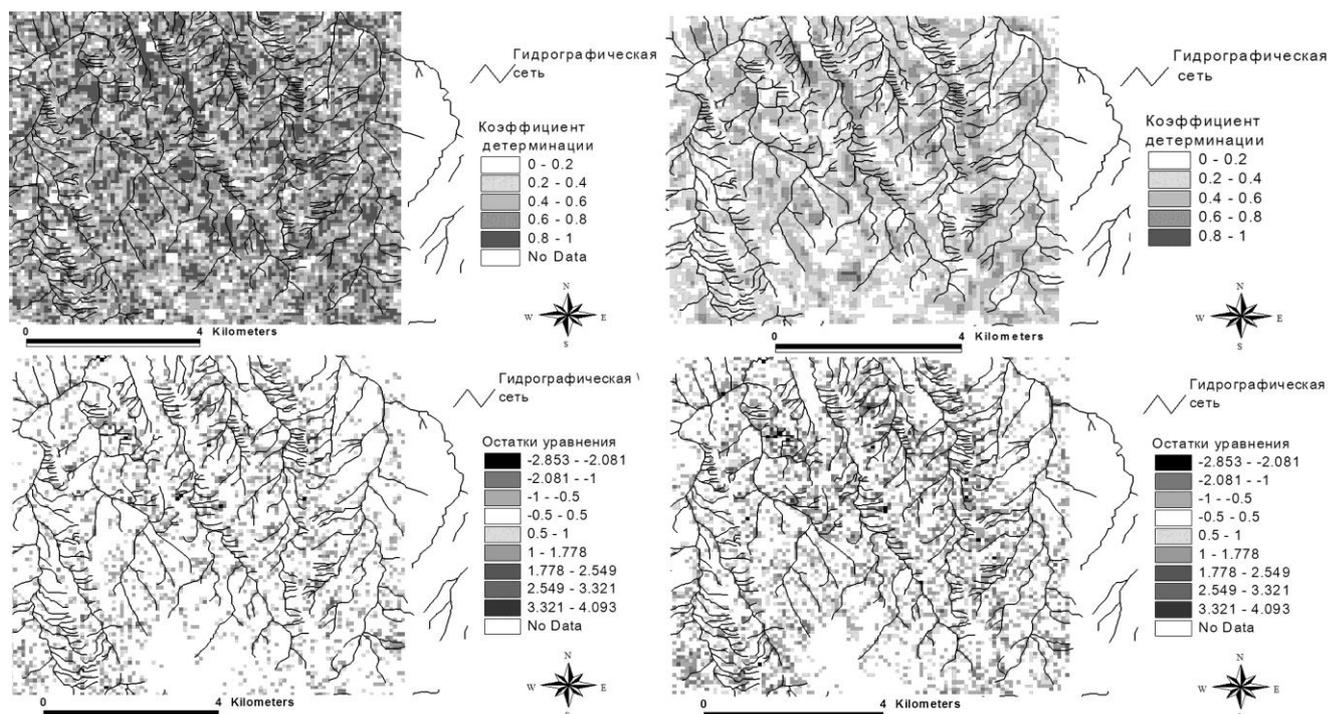


Рис. 44. Коэффициенты детерминации (А, Б) и остатки (В, Г) линейного мультирегрессионного уравнения, описывающего зависимость свойств фитоценоза Айтуарской степи от рельефа вмещающей геосистемы. Зависимая переменная – 1-й фактор дифференциации растительного покрова (сухость/влажность), независимые переменные – 4 морфометрические показателя рельефа (вертикальная и горизонтальная расчлененность, вертикальная и горизонтальная кривизна) в квадратной окрестности с линейным размером 450 м. Сторона ОТЕ – 90 м. Окрестность расчета: 270 м (А, В), 450 м (Б, Г).

Таким образом, для степного ландшафта получены следующие основные результаты.

1. Основной фактор дифференциации растительного покрова – перераспределение влаги.
2. Локально сильные межуровневые связи на основной части территории выдерживаются в пространстве обычно в 3-5 раз превышающем размер операционной

территориальной единицы. Это свидетельствует о сильном варьировании в пространстве типов межкомпонентных отношений.

3. Характер залегания складок осадочных пород существенно влияет на степень равновесности растительного покрова по отношению к морфолитогенной основе.

4. Максимальные размеры парагенетических геохор с единым типом межкомпонентных отношений характерны для связи фактора экспозиционной петрофитности с рельефом в квадратной окрестности со стороны 990 м.

Теперь рассмотрим процедуру выделения ареалов единообразных межкомпонентных отношений в системе «рельеф – растительный покров» на примере того же среднетаежного полигона «Заячья» в Архангельской области и ландшафтно-планировочную интерпретацию полученных ареалов. Задачи диссертации не подразумевают глубокого погружения в суть и проблемы 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 (Хорошев, 2011, 2012 б; Кошечева, Хорошев, 2008; Дьяконов, Хорошев, 2011; Bastian et al., 2015). Суть ландшафтно-планировочной идеологии, на наш взгляд состоит, прежде всего, в корректном применении информации об иерархии межкомпонентных связей в ландшафте и 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 (Хорошев, 2012 б). Ниже показано, как применить к задачам ландшафтного планирования информацию о разных типах связей между влажностью местообитания, индицируемой по растительному покрову, и характеристиками морфолитогенной основы, а именно – рельефа вмещающих геосистем.

Как и в примере для степного ландшафта, инструментом анализа были линейные мультирегрессионные модели. В качестве независимых переменных использованы характеристики собственного рельефа операционной территориальной единицы с линейным размером 400 м (уклон, расстояние до водотока) и рельефа ее окрестностей, т.е. вмещающих геосистем. В качестве зависимой переменной выступала мера чувствительности растительного покрова к влажности местообитания (ниже – «фактор влажности»). Она рассчитана, как и в примере Айтуарской степи, 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 антропогенное воздействие и потому малоинтересны для рассматриваемого сюжета.)

Проведена серия расчетов в скользящем квадрате для линейных размеров 5, 9, 13, 17 пикселей (соответственно, 2000, 3600, 5200 и 6800 м). Результат расчета отнесен к центральному пикселу квадрата. В отличие от предыдущего примера (степного ландшафта), проведен не только расчет коэффициента детерминации, но и классификация ОТЕ по регрессионным коэффициентам (рис. 19). Это позволяет выделить на территории разные классы межуровневых отношений.

Продемонстрируем интерпретацию классов отношений фактора влажности с рельефом вмещающих геосистем с линейным размером 2000 м (рис. 45):

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 малой суммарной длиной водотоков во вмещающих геосистемах. Возрастает влажность при росте уклонов и количества водотоков, но уменьшающейся вертикальной расчленённости, т.е. в секторах с многочисленными слабоврезанными лощинами. 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 реки. Это происходит при уменьшении мощности четвертичных отложений и врезании в коренные породы по мере приближения к основным рекам. 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. 45 (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 вышеописанному правилу. 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 лишь в XX веке произошло земледельческое освоение территорий, удаленных от бровки склона долины Заячьей более чем на 1000 м, и то с обязательным применением осушительных мелиораций. 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 сенокосение к земледелию. Примерно к границе зон животноводства и земледелия приурочено и большинство населенных пунктов. При принятии технологических решений (являющихся компетенцией отраслевого специалиста) 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. Такие ситуации соответствуют: а) зонам формирования стока при выклинивании грунтовых вод на поверхность или слиянии слабоврезанных водотоков, б) перегибу от плоской нерасчлененной поверхности к эрозионной форме, в) 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. 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. 45, В) (Хорошев, Алешенко, 2007). Соответствующие местности обособлены под влиянием неотектонических движений, в результате которых либо сохраняется моренный чехол, либо он почти полностью смывается эрозией, выводящей на поверхность коренные карбонатные породы. 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 бесполезными 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 богатыми основаниями грунтовых вод может получить положительную оценку благодаря росту продуктивности по сравнению с лучше дренированными, но бедными местообитаниями. В то же время при принятии технологических решений может возникнуть потребность в сложной мозаике способов адаптации: выбора сезона и способа рубок, способа сохранения напочвенного покрова.

3-й класс характеризуется отрицательной связью между «фактором влажности» и горизонтальной расчлененностью рельефа, уклонами, расстоянием до водотока, положительной связью – с вертикальным расчленением. 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 неглубоковрезанных водотоков. В отличие от первых двух классов отношений, наиболее влажными оказываются не плоские поверхности и не отдельные участки склонов, а днища долин; водораздельные поверхности при этом невелики по размерам и хорошо дренированы. 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 со склонов. Заболоченные широкие поймы могут оказаться непригодными даже для сенокосения. 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 отсутствием избытка влаги и оглеения. Однако небольшая ширина водораздельных пространств 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 рекреации или охоты высокое разнообразие рельефа и мозаичность растительного покрова создает преимущества по сравнению с монотонными пространствами.

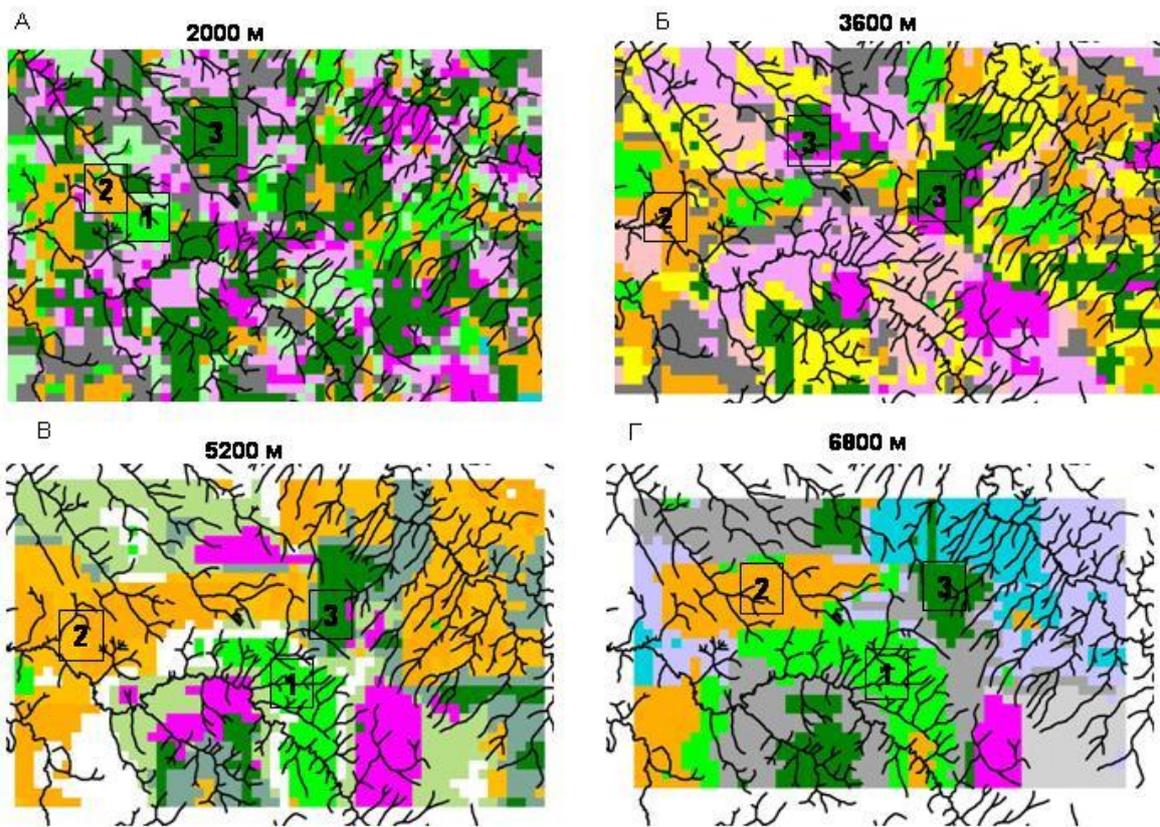


Рис. 45. Ареалы реализации зависимости фактора влажности растительного покрова от рельефа ОТЕ и рельефа вмещающих геосистем. А – при линейных размерах вмещающих геосистем 2000 м, Б – то же при размерах 3600 м, В – то же при размерах 5200 м, Б – то же при размерах 6800 м. Линейный размер ОТЕ – 400 м. Линейная мультирегрессионная модель. Цветовой фон – виды зависимости. 1-3 – пояснения см. в тексте. Среднетаежный ландшафт, Архангельская область, полигон «Заячья».

4.7. Временные рамки действия межкомпонентных связей

Получив знание о пространственных рамках действия межкомпонентных связей, перейдем к определению их временных рамок и оценке их устойчивости во времени.

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. Теоретически в ландшафте как сложной адаптивной системе нелинейность отношений должна приводить в смене правил взаимодействий по мере развития (Levin, 1998). Наиболее интересен вопрос: *существуют ли стадии развития ландшафта, для которых характерно усиление или ослабление взаимозависимости компонентов на том или*

ином масштабном уровне и между масштабными 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 (Викторов, Ремезова, 1988), корректная оценка которых необходима для определения целевой породы, технологий лесозаготовок и лесовосстановления. Например, 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 транспирации и разболачивание на стадии максимальной транспирации вторичных мелколиственных пород в возрасте 30–40 лет.

Автор поставил задачу установить степень зависимости тесноты межкомпонентных связей от стадии развития ландшафта на примере восстановительных сукцессий 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 (гранулометрический 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 группами свойств почв

(по четыре оси для каждой группы) (см. раздел 3.5.2). Во-вторых, для каждой из трех стадий рассчитывались непараметрические коэффициенты корреляции Спирмена попарно между конкретными осями дифференциации и сравнивалось количество достоверных связей (см. раздел 3.5.2). В-третьих, для каждой оси дифференциации свойств строилась серия моделей «регрессии поверхности отклика», отражающих связи со свойствами рельефа гипотетических вмещающих геосистем (см. раздел 3.7.2). В-четвертых, для первостепенных (вносящих наибольший вклад в дисперсию) осей дифференциации древостоя строились модели «регрессии поверхности отклика», описывающие их связи с группами свойств почвенного профиля (мощности горизонтов, цвет горизонтов, гранулометрический состав отложений), чтобы оценить изменения чувствительности древесного яруса к группам почвенных процессов в ходе сукцессии (см. раздел 3.5.2). В-пятых, строились схемы плеяд связей между свойствами по коэффициентам корреляции Спирмена. Из всей совокупности значимых для данного свойства связей на схему наносилась наибольшая по модулю. В случае, когда связи с двумя или более свойствами характеризовались очень близкими по модулю коэффициентами (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.

Для среднетаежного ландшафта в Архангельской области гипотеза об устойчивости плеяд во времени проверялась на примере полигона «Заячья» (ландшафтный масштаб, доля заболоченных фаций с мощностью органогенного горизонта более 25 см – 5%) и полигона «Трансект» (Гридинская заболоченная местность; доля заболоченных фаций с мощностью органогенного горизонта более 25 см – 13%). Общая тенденция изменения взаимoadaptации компонентов оценивалась по количеству достоверных связей, выраженных коэффициентами Спирмена отдельно для внутрифитоценотических и почвенно-фитоценотических связей между свойствами, т.е. координатами на осях дифференциации, полученных методом многомерного шкалирования. Анализировались парные корреляции между 36 свойствами.

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 гранулометрическим 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 на этой стадии в силу инертности еще носит следы почвообразования, предшествовавшего сведению леса (как правило, – в условиях распашки или существования коренного темнохвойного леса), что неоднократно подчеркивалось в индикационной геоботанике (Викторов, Ремезова, 1988).

На стадии старовозрастных лесов, напротив, связи с гранулометрическим составом ослабевают, но более совершенной становится адаптация к морфологическому строению почвенного профиля, выраженному мощностями горизонтов. 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 размывания признаков старопашотного горизонта и роста мощности торфяного или перегнойного горизонтов. Достоверного роста мощности элювиального горизонта по мере восстановления хвойного леса при этом не обнаружено. Травяной 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 «Трансект, 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 гранулометрического состава почвообразующих отложений, то на поздних – путем ослабления зависимости от отложений и возрастания взаимoadaptации 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). Затем связи в этой геосистеме ослабевают, и подчиненные ярусы развиваются более независимо от древостоя, за исключением группы видов, чувствительных к трюфности. 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 в заболоченной местности большей однородности фитоценоза (монотонные ельники чернично-долгомошные по сравнению с почвами. Ранее (Хорошев, 2002) на примере сравнения межкомпонентных связей на разных участках трансекта 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 внутрифитоценологических, так и почвенно-фитоценологических) 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 корреляций 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-фитоценологических связей в ряду возрастных стадий составляет, соответственно 23, 14, 22. В областном масштабе количество достоверных парных внутрифитоценологических 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-фитоценологических 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 гранулометрического

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 травяной 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 хвойно-широколиственнолесной 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. 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 (таблица 17).

Таблица 17. Зависимость наиболее значимых осей дифференциации древостоя от рельефа вмещающих геосистем и морфологического строения почв при разном возрасте древостоя. Доля описываемой дисперсии (коэффициенты детерминации * 100) уравнения «регрессии поверхности отклика», 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.

Ось дифференциации	Возраст древостоя	Независимые переменные – 4 морфометрические характеристики рельефа квадратной окрестности							Независимые переменные – 4 оси дифференциации мощности горизонтов почв
		Сторона квадратной окрестности, м							
		1200	2000	2800	3600	4400	5200	6000	
Архангельская область, среднетаежный ландшафт, полигон «Заячья»									
Деревья 1	<50	24	46	28	27	-	-	42	28
	50-70	30	34	30	40	-	-	18	13
	>70	19	31	25	36	-	-	28	17
Деревья 3	<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									
Деревья 1	<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
Деревья 2	<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, хвойно-широколиственнолесной ландшафт									
Деревья 1	<40	43	50	50	40	-	-	65	67
	40-60	29	21	28	27	-	-	54	41
	>60	52	48	46	51	-	-	58	47
Деревья 2	<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. Для соотношения хвойных и широколиственных пород древостоя (1-я ось дифференциации древостоя) оказалось, что зависимость от почв максимальна на ранней стадии сукцессии (до 40 лет), а затем ослабевает на стадиях 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. 1-я ось дифференциации почвенных горизонтов, ответственная за соотношение интенсивности элювиально-глеевого процесса и торфонакопления, вносит наиболее существенный нелинейный вклад в соотношение хвойных и широколиственных пород. Глубина оподзоливания 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 элювиально-глеевого процесса) 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 элювиально-глеевый процесс. 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.

Южнотаежный ландшафт в Кологривском районе Костромской области. Анализировалась 1-я ось дифференциации древостоя, в наилучшей степени отражающая чувствительность пород к минеральному питанию. 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). Поэтому в южной тайге *судить о почвенных условиях по соотношению широколиственных пород, сосны, березы, ольхи до возраста 60 лет некорректно.* Чувствительность фактора хвойных и широколиственных пород к рельефу достаточно уверенно возрастает в старовозрастной стадии (таблица 17). При этом в целом выдерживается резонансный уровень отношений с рельефом: рамочные условия

создаются вмещающими геосистемами со средним размером 4400 м. Та же закономерность свойственна 2-й оси дифференциации древостоя (соотношение сосново-березовых древостоев и древостоев с участием ольхи серой. Связи как с рельефом, так и с почвами отсутствуют на ранней и средней стадиях сукцессии.

Среднетаежный ландшафт в Архангельской области. Однозначной тенденции изменения плотности связей с возрастом не обнаружено. Основные резонансные уровни отношений древостоя с рельефом сильно различаются в зависимости от возрастной стадии, что приходится связывать с неравномерным распределением возрастных стадий по территории. Для 1-й оси дифференциации древостоя, ответственной за соотношение бореальных и боровых элементов, основной резонансный уровень (2000 м) наиболее хорошо выражен для «молодняков» (до 50 лет), хотя в то же время равноценен и уровень 6000 м (для полного массива данных по полигону – недостоверный). Основной резонансный уровень 2000 м не проявляется в более старых древостоях, для которых возникает другой резонансный уровень 3600 м. Видимо это отражает изменение условий рельефа в восточном направлении параллельно с увеличением среднего возраста древостоев.

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. Задача решалась на примере сравнения трех схем плеяд 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. 46). 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. 46, А) обращает на себя внимание, что лишь для двух свойств фитоценоза (причем не первостепенных) характеристики 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 фитоценоза – 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 гранулометрического 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 травяной и кустарниковый ярусы. Эта плеяда устойчиво сохраняется на всех стадиях сукцессии, однако чувствительность травостоя к гранулометрическому 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 орштейновым горизонтом на глубине 15–20 см и контактно-элювиальным на глубине 20–40 см. При этом может возрасти 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, ситников, ятрышников.

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 гранулометрического состава почв, 2-я и 3-я оси дифференциации мощностей почвенных горизонтов). На ранних этапах 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 травяной 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 мощностей почвенных горизонтов). При этом на средней стадии к этой плеяде присоединяются свойства кустарничкового яруса (все оси), а на поздней из них в составе плеяды остаются только свойства, чувствительные к гумусонакоплению (4-я ось дифференциации кустарников).

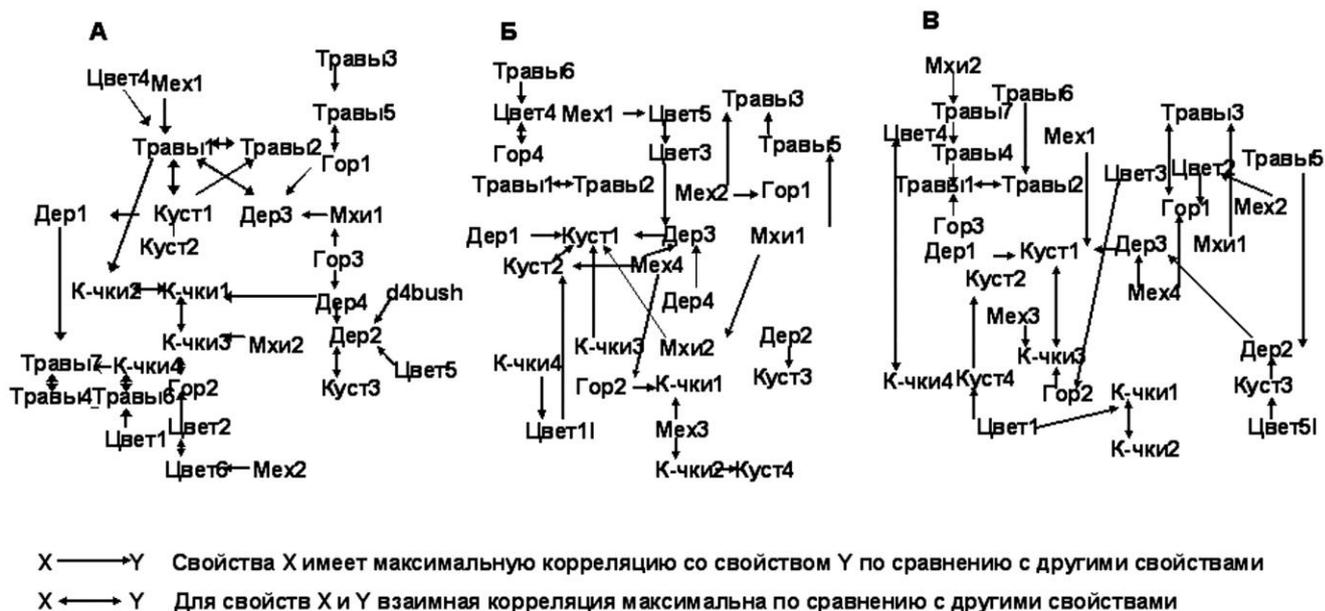


Рис. 46. Плеяды межкомпонентных связей на разных стадиях постантропогенного восстановления структуры ландшафта в ходе сукцессий (Архангельская область, среднетаежный полигон «Заячья»). Достоверные коэффициенты корреляции Спирмена. А – возраст древостоя менее 50 лет. Б – то же, 50–70 лет. В – то же, более 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 – гранулометрический состав почвенных горизонтов.

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). При этом травяной 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 травяной ярусы теряют специфичность для фаций с присутствием ольхи, малины, смородины, черемухи (рис. 47). 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 кустарничкового ярусов – например, в елово-осиновых лесах с жимолостью, шиповником, можжевельником на крутых склонах долин. В молодых лесах такие комбинации на полигоне не встречаются.

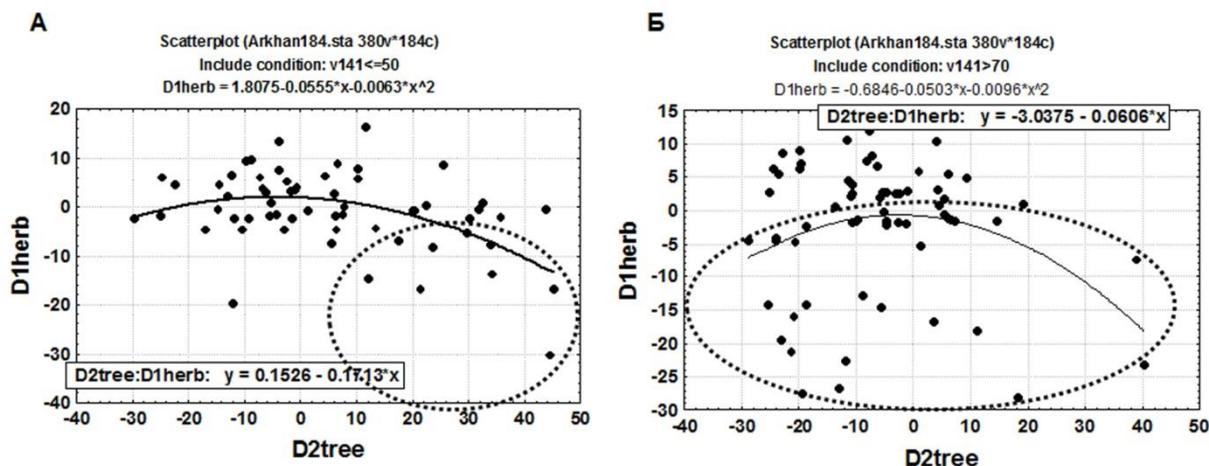


Рис. 47. Различия диапазона возможных обилий нитрофильных видов травостоя ($d1herb$, отрицательные значения) в молодых (А) и старовозрастных (Б) лесах в зависимости от соотношения ольхи серой и осины ($d2tree$). Высокое обилие нитрофильных видов (в молодых лесах возможно только в присутствии серой ольхи (положительные значения $d2tree$), а в старовозрастных – также при низком обилии ольхи и высоком обилии осины (отрицательные значения $d2tree$).

Сохраняет устойчивость на всех трех возрастных стадиях плейста, связывающая чувствительные к трофности свойства кустарничкового яруса (1-я ось) и древесного (1-я ось) яруса. При этом кустарничковый ярус устойчиво связан со строением двучлена (1-я ось дифференциации гранулометрического 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, при развитии лесного фитоценоза древостой и кустарничковый ярус пластичны и могут иметь похожий состав на разных почвах, а кустарники (рябина, можжевельник, ива и, с другой стороны, малина, смородина, жимолость, волчегодник) строго адаптируются к почвам в зависимости от их обеспеченности минеральными веществами.

Итак, анализ временных рамок действия межкомпонентных связей показал следующее.

1) Теснота и вид связей между биотическими и абиотическими компонентами меняется в ходе восстановительных сукцессий лесной растительности. Этим подтверждается теоретическое положение о смене правил взаимодействий в ходе развития ландшафта как сложной адаптивной системы. Формирование адаптивной почвенно-фитоценотической системы протекает по-разному в средней тайге и в более южных ландшафтах южной тайги и хвойно-широколиственных лесов.

2) В средней тайге с приближением к стадии старовозрастных лесов взаимоадаптированность почв и фитоценоза возрастает, а зависимость фитоценоза от гранулометрического состава 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.

3) 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. Хвойно-широколиственные фитоценозы на ранних стадиях развиваются сопряженно со свойствами почв, но при приближении к старовозрастной стадии усиливают независимость от внешней среды и внутрифитоценотические (межъярусные) связи.

4) В ландшафтном масштабе количество достоверных межкомпонентных связей по мере приближения к старовозрастной стадии уменьшается, а в местностном – увеличивается. Повышение пространственного разнообразия на ландшафтном уровне приводит к росту разнообразия стратегий развития вертикальной структуры геосистем.

5) Состав плеяд свойств фитоценоза и почв в ходе сукцессии претерпевает изменения, но сохраняет ядро наиболее тесно взаимосвязанных свойств.

6) На поздних стадиях сукцессии в средней тайге возрастает чувствительность фитоценоза к водному режиму почв и окислительно-восстановительным условиям.

7) Внутрифитоценотическая межъярусная сопряженность в ходе восстановительной сукцессии возрастает, особенно среди нижних ярусов фитоценоза.

8) Резонансный уровень отношений между древостоем и рельефом, как правило, не меняется при переходе от всего массива данных к возрастным группам.

9) Чувствительность древостоя к рельефу и устойчивым морфологическими признакам почв (набор и мощности горизонтов) меняется одинаково при смене возрастных стадий.

4.8. Синтез геосистем на основе иерархии межкомпонентных отношений

Итак, на основании вышеизложенного мы знаем следующие признаки полимасштабной организации географического ландшафта.

1) Свойства компонентов ландшафта объединяются в несколько взаимонезависимых или слабо связанных друг с другом плеяд, и с разным характерным пространством. Каждая из плеяд варьирует в пространстве согласованно как единое целое под действием того или иного ландшафтоформирующего процесса и поэтому может быть считаться системой 2-й группы (см. раздел 3.1.2).

2) Разные свойства одного и того же компонента ландшафта могут контролироваться рамочными условиями разных взаимонезависимых вмещающих геосистем либо влиянию вмещающих геосистем одновременно нескольких масштабных уровней.

3) Свойства компонентов можно сгруппировать по соотношению вкладов в пространственное варьирование: а) процессов, действующих в масштабах геосистем более высокого ранга и косвенно описываемых их рельефом; б) радиальных межкомпонентных взаимодействий.

4) 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 может маскировать влияние морфолитогенной основы.

5) Вид зависимости между свойствами компонентов варьирует в пространстве ландшафта, что может создавать впечатление слабости межкомпонентных связей, если нечетко определен масштабный уровень проявления анализируемой зависимости.

6) Часть дисперсии, необъясняемой внутриуровневыми связями и рамочными условиями вмещающих геосистем, может быть обусловлена пространственным варьированием на более низком масштабном уровне.

7) Теснота межкомпонентных связей и состав плеяд взаимосвязанных свойств могут меняться в ходе саморазвития вертикальной структуры природного комплекса, в том числе в ходе сукцессионных изменений.

Теперь перейдем к реализации программы синтеза парциальных геосистем, которая описана в разделе 3.9.

4.8.1. Двухуровневая картографическая модель парциальных геосистем

Рассмотрим процедуру построения *двухуровневой картографической модели парциальных геосистем*. Она основана на классификации ОТЕ по морфометрическим

свойствам рельефа вмещающих геосистем, которые могут создавать рамочные условия для ряда свойств почвенно-растительного покрова (ПРП). 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 геоморфологически однородных территорий, которые однородны и по почвенно-растительному покрову. Выявление резонансного пространства межуровневых связей позволяет установить характеристики ландшафта, наиболее отзывчивые к пространственным изменениям свойств рельефа на том или ином масштабном уровне.

Во-вторых, зависимость свойств ПРП от того или иного уровня организации рельефа позволяет выявить в первом приближении основные современные и палео- процессы, ответственные за пространственные различия ПРП.

Представим результаты применения процедуры построения серии двухуровневых моделей парциальных геосистем для модельных регионов.

Для **хвойно-широколиственнолесного ландшафта юго-западной Удмуртии** установлена следующая схема масштабных уровней геосистем.

Крупные макроформы рельефа, различаемые классификацией ОТЕ по морфометрическим свойствам рельефа окрестности со стороной 6000 м (рис. 33, Г), контролируют основную часть дисперсии свойств древесного и кустарникового ярусов и значительную (вторую по значимости) часть дисперсии свойств травяного яруса и гумусонакопления в почвах. Таким образом, выделяются две группы ПТК, одна из которых более близка к бореальным, а другая – к неморальным условиям. В первом приближении это местности: 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, которые ставит в центр внимания теории геосистем А.Н. Ласточкин (2011), практически не выражены. Поэтому примененный метод позволяет найти ландшафтные границы при нечетких геоморфологических границах.

На фоне этих крупных местностей существуют геосистемы с примерными линейными размерами 3600 м (рис. 33, В), 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).

В условиях нечетких геоморфологических границ представляет интерес сравнение эффективности применения традиционной структурно-генетической и морфометрической классификаций рельефа для выделения целостных ландшафтных геосистем. В таблице 18 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, кустарничкового ярусов и мощностей горизонтов – генетической.

Для южнотаежного ландшафта **Кологривского района Костромской области** установлена следующий набор масштабных уровней геосистем при размерах ОТЕ 400 м.

Наиболее широкоохватные факторы имеют резонансные отношения с рельефом окрестностей размером около 12000 м (рис. 31). К ним относятся вторые по значимости оси дифференциации трав (ось возраста древостоя, т.е. соответствия трав стадии восстановительной сукцессии) и мхов (ось дренированности). Различаются заболоченные ПТК с господством сфагнома, характерные для внутренних частей наименее расчлененных междуречий, и преобладающие дренированные зеленомошные 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 по этим информативным признакам разделить: а) геосистемы закустаренные, с богатыми нитрофильными или неморальными местообитаниями зеленомошные; б) геосистемы без кустарников – боровые с можжевельником или болотные.

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 лесами (обычно по

песчаными террасами и моренно-водноледниковыми междуречными равнинами) 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, контролируемые составом кустарникового и кустарничкового ярусов. Более влажные слаборасчлененные территории, в том числе волнистые террасы, характеризуются появлением в лесах болотных кустарничков, а дренированные – черники. На этом же уровне разделяются сухие боры террас Унжи и влажные сероольшаники малых долин.

Таблица 18. Распознавание групп свойств компонентов классами рельефа, выделенными: а) по морфометрическим свойствам рельефа в квадратной окрестности 6 км, б) по генетическому принципу. Дискриминантный анализ. Коэффициент Wilks-Lambda (чем ближе к 0, тем лучше дискриминация). Хвойно-широколиственнолесной 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			
	3	6	9	3	5	6	7
4 оси дифференциации трав	0,92	0,76	0,53	0,78	0,75	0,74	0,71
4 оси дифференциации деревьев	0,65	0,44	0,48	0,79	0,52	0,52	0,38
4 оси дифференциации кустарников	0,84	0,73	0,58	0,86	0,74	0,69	0,68
2 оси дифференциации кустарничков	0,96	0,88	0,83	0,98	0,96	0,95	0,93
4 оси дифференциации мощности почвенных горизонтов	0,82	0,68	0,76	0,86	0,70	0,68	0,67
4 оси дифференциации цвета почв	0,80	0,76	0,70	0,85	0,82	0,78	0,77
4 оси дифференциации механического состава почва	0,94	0,83	0,83	0,98	0,90	0,88	0,82
Все 26 осей дифференциации	0,44	0,18	0,08	0,38	0,15	0,12	0,08

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 на

гривах 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 морфометрические показатели рельефа по этой окрестности (рис. 48) как основание для классификации рельефа, а классификацию рельефа – как каркас карты геосистем (рис. 49), как это продемонстрировано выше для Удмуртии. 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.

Карта на рис. 49 демонстрирует следующую логику рассуждений: «Принадлежность к данному классу рельефа *определяет* такое-то сочетание свойств почвенно-растительного покрова, чувствительных к данному масштабному 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, исключая субъективизм в проведении границ. Во-вторых, критерием однородности выступает сходство комбинации пространственных единиц и отклик свойств компонентов на это сходство, а не усредненная характеристика индивидуальных единиц. Реализуется критерий наличия эмерджентного эффекта, что считается необходимым условием выделения ландшафта (King, 1999).

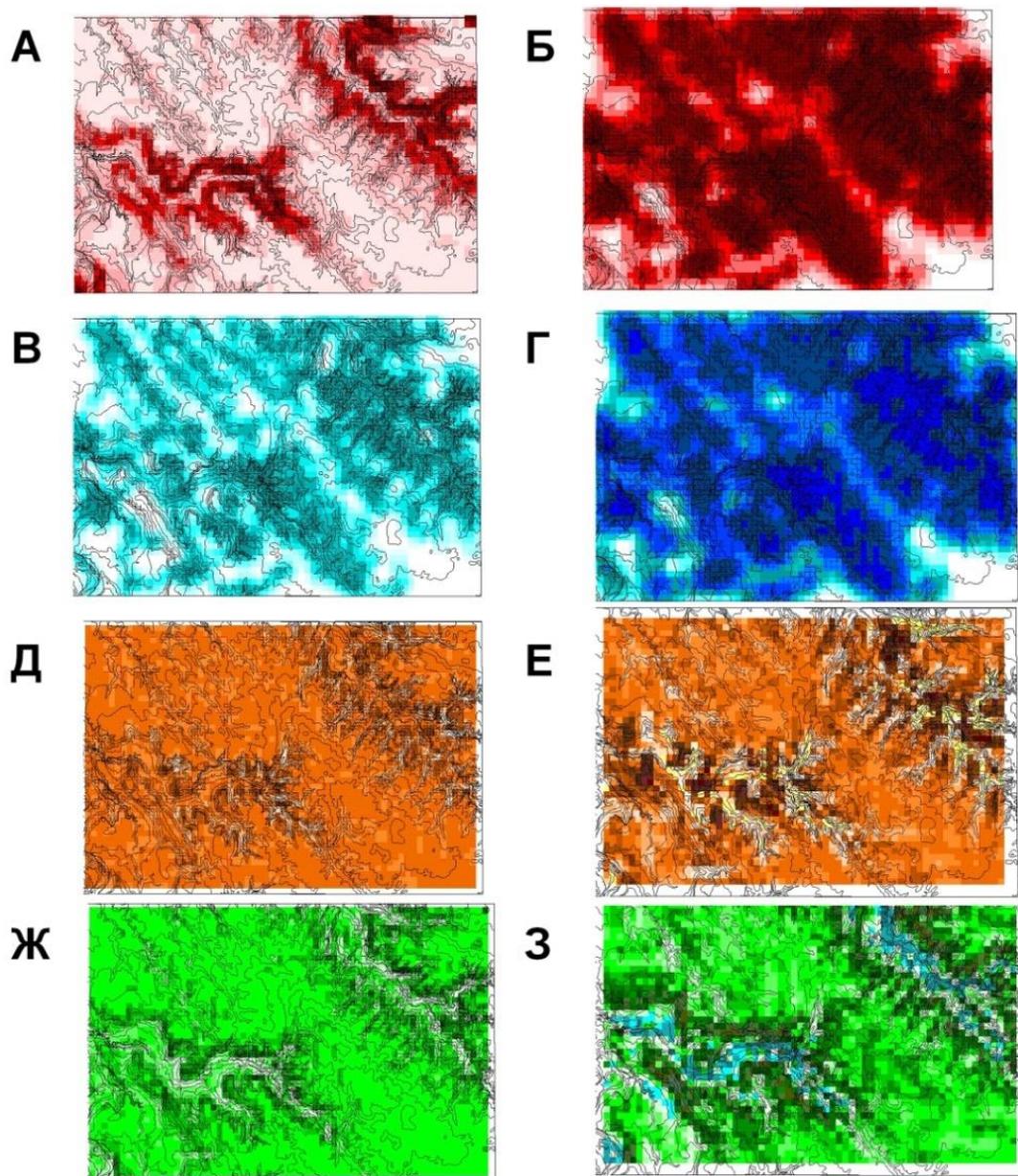


Рис. 48. Морфометрические характеристики рельефа. Вертикальная расчлененность (стандартное отклонение высот): А – в квадратной окрестности со стороной 1200 м, Б – то же со стороной 2000 м. Горизонтальная расчлененность (сумма длин тальвегов): В - в квадратной окрестности со стороной 1200 м, Г – то же со стороной 2000 м. Горизонтальная кривизна: Д - в квадратной окрестности со стороной 1200 м, Е – то же со стороной 2000 м. Вертикальная кривизна: Ж - в квадратной окрестности со стороной 1200 м, З – то же со стороной 2000 м.

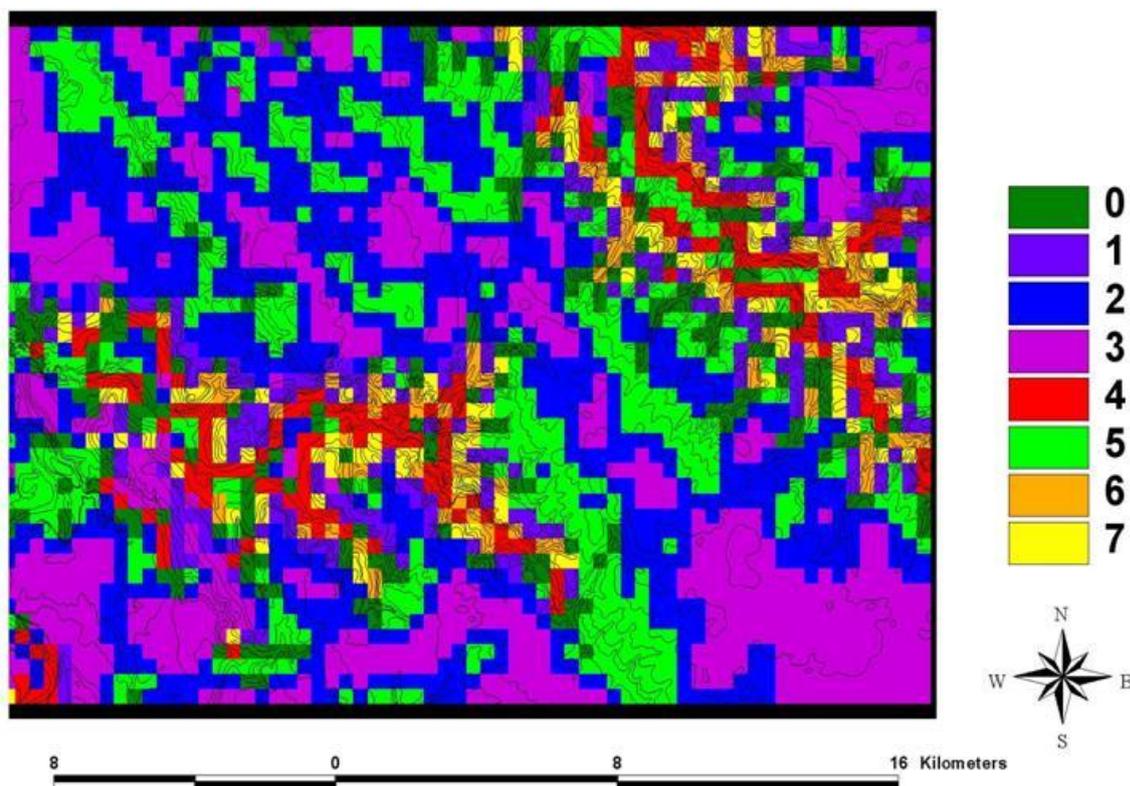


Рис. 49. Классы геосистем, выделенные на основе классификации операционных территориальных единиц по морфометрическим свойствам рельефа (вертикальная и горизонтальная расчлененность, вертикальная и горизонтальная кривизна) в квадратной окрестности со стороной 1200 м. Классификация методом *k*-средних. Разрешение цифровой модели рельефа 400 м. Среднетаежный ландшафт, Архангельская область (полигон «Заячья»).

Сформулируем задачу иначе – так, чтобы карта отражала следующую логику: «При такой-то комбинации форм рельефа в данной окрестности *наиболее вероятен* такой-то класс свойств почвенно-растительного покрова чувствительных к данному масштабному уровню». При такой формулировке мы допускаем, что *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 класс ПРП, с наибольшей вероятностью встречающийся в подобных геоморфологических условиях (рис. 50).

Для создания такой *двухурвневой картографической модели* на примере среднетаежного ландшафта в Архангельской области выполнены следующие операции, которые рассматриваются ниже на примере модели отношений ПРП с вмещающими геосистемами со стороной 1200 м (рис. 50, А).

Методом *k*-средних на материале 184 полевых описаний выделены 8 классов ПРП по совокупности значений осей дифференциации, наиболее чувствительных к комбинированному эффекту форм рельефа в окрестности с линейным размером 1200 м. 184 ПТК с известной принадлежностью к классу ПРП составляют обучающую выборку. Методом дискриминантного анализа определена корректность распознавания (дискриминации) 8-ми классов ПРП морфометрическими характеристиками рельефа в окрестности 1200 м. Корректность составила 26%. Лучше всего распознаются рельефом 3, 5, 6, 8 классы ПРП. На основе обучающей выборки рассчитаны вероятности существования 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. 50, А). Карта отражает наиболее вероятный класс ПРП (точнее группы его свойств, чувствительных к тропности и влажности) в пределах ОТЕ при данных морфометрических условиях рельефа в окрестности со стороны 1200 м. Эта карта более корректно учитывает варианты приуроченности полевых данных к формам рельефа данного масштабного уровня, чем карта на рис. 49. Следует сделать оговорку, что класс ПРП тоже определяется с некоторой ошибкой, которая измеряется в статистических программах дистанцией от центра класса. В принципе на этом основании можно выделить «подклассы».

В густорасчлененных вогнутых позициях, соответствующих малым долинам, глубоким ложбинам, некоторым участкам днища долины Заячьей, формируются хорошо дренированные геосистемы 6 класса с сочетанием гумусовых и элювиальных (часто и 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 распаханна, но по растительности на оставшихся под лесом краевых участках ареала можно судить о естественном их состоянии. Для этих геосистем характерно: максимальная гумусированность серогумусовых или дерново-подзолистых почв при минимальной или вообще отсутствующей оподзоленности, кислично-снытевые с костяникой и малиной сообщества, слабое развитие или отсутствие бореальных кустарничков черники и брусники.

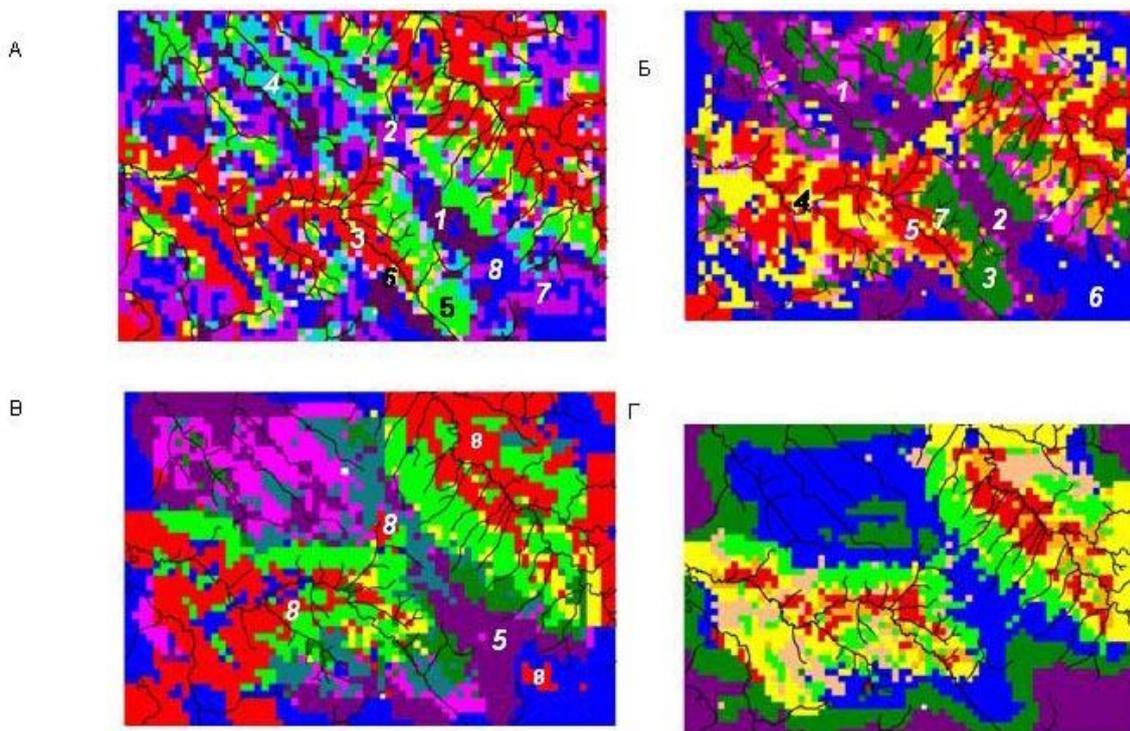


Рис. 50. Двухуровневые картографические модели наиболее вероятных парциальных геосистем среднетаежного ландшафта в Архангельской области (полигон «Заячья»). Наиболее вероятные классы почвенно-растительного покрова для комбинации морфометрических характеристик рельефа в квадратной окрестности пиксела. Классы выделены по свойствам, чувствительным к характеристикам рельефа данной окрестности. Расчет постериорных вероятностей на основе обучающей выборки методом дискриминантного анализа. Разрешение цифровой модели рельефа 400 м. А – классы по чувствительности трав, кустарничков, почв, окрестность со стороной 1200 м. Б – классы по чувствительности деревьев, кустарников, гранулометрического состава отложений, окрестность со стороной 2000 м;. В – классы по чувствительности почвенных горизонтов и малозначительных факторов кустарников и кустарничков, окрестность со стороной 3600 м;. 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.

Менее дренированные и богатые, но без накопления неразложившегося органического вещества, 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, геосистемы поднимаются к придолинным

склонам междуречий. 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.

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 фрагментации малыми долинами. Старопахотные горизонты здесь встречаются, но поля были заброшены в первую очередь в силу явных признаков нарастающего переувлажнения. Об этом свидетельствуют постоянно присутствующие 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. 36).

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 гигрофильными и болотными, а неморальные практически отсутствуют. Классы 7 и 8 отличаются пониженной мощностью песчано-супесчаного чехла, что способствует более высокому положению водоупорного суглинистого слоя.

Сравнивая карту наиболее вероятных классов ПРП (рис. 50, А) с картой классов геосистем на основе классов рельефа (рис. 49) обращаем внимание на ряд отличий. Карта наиболее вероятных классов ПРП показывает большее разнообразие на водораздельных поверхностях и меньшее – в глубоковрезанных долинах. Следовательно, в густорасчлененных секторах постепенные переходы между геосистемами с размерами 1200 м 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. Террасы не везде на всю ширину перекрыты делювиальным чехлом, материал которого обогащен основаниями, смытыми с крутых коренных склонов. На приводораздельных поверхностях при пологом 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. 50, Б) (корректность 26%) 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, 2 и 5 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. 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. 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. 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 палео-процессы, чем современные процессы перераспределения элементов минерального питания и влаги, действующие на уровне 1200 м.

4.8.2. Многоуровневая индуктивная картографическая модель парциальных геосистем

Теперь продемонстрируем процедуру построения *многоуровневой 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 масштабных уровней, наиболее вероятен такой-то класс комбинаций свойств почвенно-растительного покрова, чувствительных к данному экологическому фактору»*.

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. 51).

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. *Плеяда* образует парциальную геосистему, для которой надо выявить ареал существования. Построена серия уравнений «регрессии поверхности отклика», 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 (осина, ольха серая) пород. Коэффициент детерминации составляет 0,52.

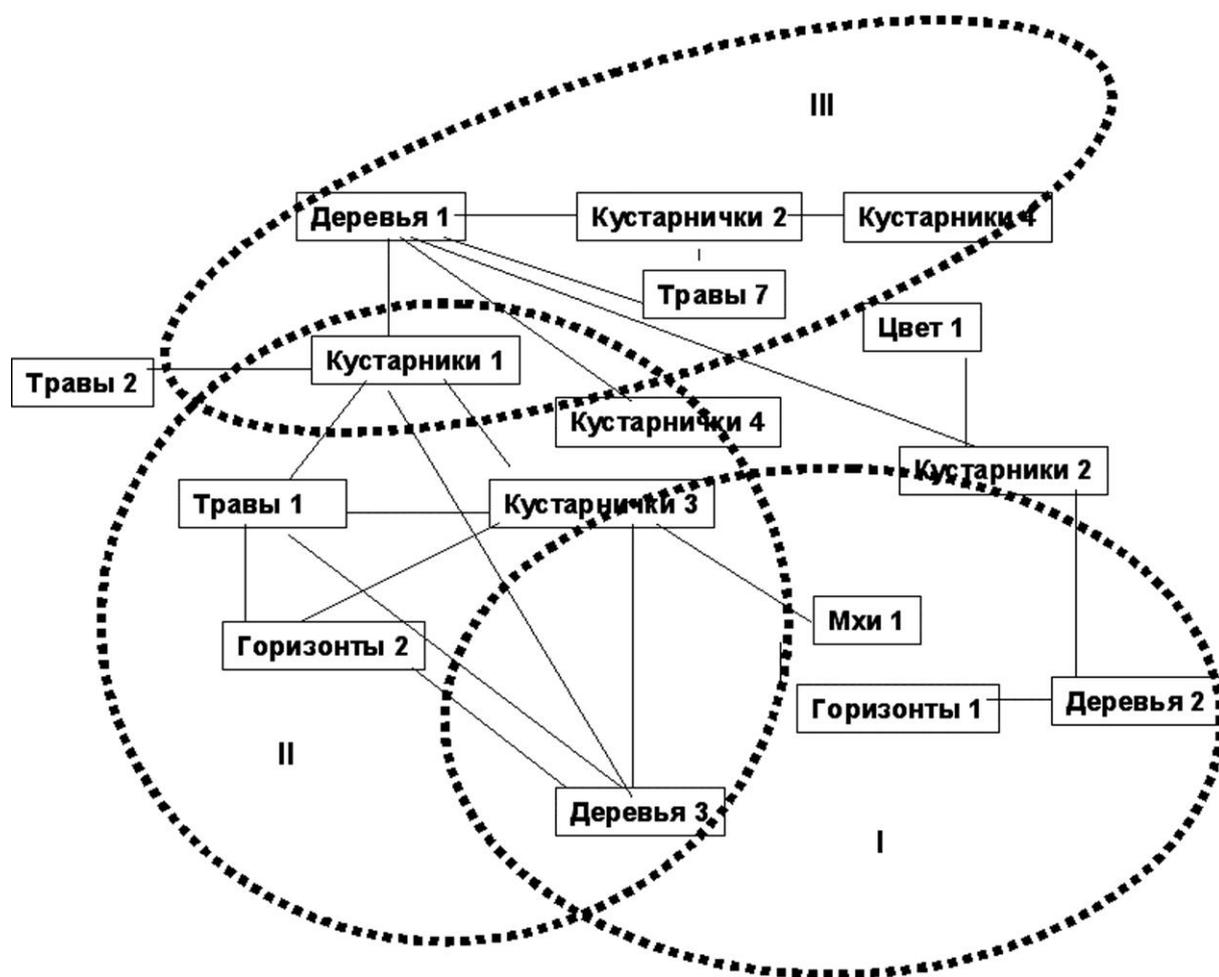


Рис. 51. Плеяды свойств компонентов среднетаежного ландшафта в Архангельской области (полигон «Заячья») по коэффициентам корреляции Спирмена. Плеяды свойств: I – чувствительных к влажности, II – чувствительных к трофности, III – чувствительных к сукцессионному статусу. Пояснения см. в тексте.

Остатки уравнения (отклонения наблюдаемых значений от рассчитанных) подчиняются нормальному распределению ($\text{Chi-Square test} = 3.60423$, $p = 0.30749$). Отобрано 50% наблюдений с наименьшим отклонением остатков уравнения от 0. Проведен дисперсионный анализ, где остатки выступали как зависимая переменная-отклик, а дискретные категории ландшафтных условий – как группирующая переменная. Анализ показал, что минимальные остатки характерны для следующих ландшафтных условий: неглубокозаселенные местности с двучленными супесчано-суглинистыми отложениями, с типичным для средней тайги торфянистым горизонтом мощностью не более 25 см, с суммарной мощностью гумусированных горизонтов не более 20 см. В этих условиях можно говорить о существовании геохоры. Основанием ее целостности служит единый вид взаимозависимости водного режима почв, свойств древостоя, мхов, кустарничков и соотношения торфонакопления и суходольного таежного почвообразования. Правило выражается набором регрессионных коэффициентов.

Коэффициент детерминации уравнения для 3-й оси дифференциации древостоя для данных условий (50% массива наблюдений, т.е. около 90 «точек» комплексного описания) повышается до 0,92 (таблица 19). По мере снижения дренированности в силу нарастания длительности стояния верховодки и приближения грунтовых вод к поверхности в пределах этой геохоры происходят следующие изменения. Элювиально-глеевый и элювиально-гумусовый процессы в почвах замещается торфонакоплением, зеленомошный покров – сфагново-долгомошным с черникой, елово-березово-осиновые леса с подростом ели и серой ольхи – березово-елово-сосновыми с подростом ели и березы. В пределах геохоры свойства древесного, кустарничкового, мохового яруса и почв весьма контрастны, но варьирование контролируется уровнем грунтовых вод. Для старовозрастных лесов наличие единого системообразующего 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. Разрушается данная парциальная геосистема (и вступают в действие иные процессы) при глубокорасчлененном рельефе, на суглинистых (не двучленных!) глубокогумусированных либо торфяно-глеевых почвах.

На рис. 52 показан ареал действия межкомпонентной связи, формирующей 1-ю плеяду, в пределах которого может использоваться единая схема индикации свойств почв по свойствам фитоценозов. Ареал этой геохоры получен путем интерполяции значений остатков мультирегрессионного уравнения методом обратно взвешенных расстояний Inverse Distance Weghted (IDW) по 12 ближайшим соседним точкам. В качестве парагенетической геохоры, объединяющей серию индивидуальных парциальных геосистем, выделены территории, где отклонения остатков от 0 заключены в интервале между нижним и верхним квартилями. Иначе говоря, к геохоре отнесены территории, где расположены 50% наблюдений, подчиняющихся единому виду зависимости между свойствами-членами первой плеяды, а также наиболее близко к ним расположенные территории со сходными ландшафтными условиями

Среди членов 1-й плеяды есть свойства (древесного и кустарничкового ярусов), для которых вклад варьирования рельефа вмещающих геосистем перевешивает вклад внутриуровневых межкомпонентных взаимодействий (см. таблицу 16). В связи с этим появляется возможность, пользуясь цифровой моделью рельефа, разграничить индивидуальные монотонные парциальные геосистемы. Внутри таких геосистем сочетание свойств однотипно, что позволяет рассматривать их как геомеры по данному набору свойств. Различны же монотонные геосистемы по силе действия главного фактора формирования мозаичной парагенетической геохоры – перераспределения влаги.

Теперь можно создать *многоуровневую 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 рельефа сразу нескольких окрестностей, а группирующей – класс свойств ПРП по чувствительности к одному экологическому фактору.

Таблица 19. Параметры уравнения «регрессии поверхности отклика» для первой пляды 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	T-критерий	p
Свободный член	-3.56	1.73	-2.06	0.04
D2tree	-0.52	0.05	-10.41	0.00
D2tree²	0.02	0.00	11.84	0.00
D3low	-0.50	0.04	-14.22	0.00
D3low²	0.00	0.00	1.97	0.05
D1moss	0.07	0.04	1.87	0.06
D1moss²	-0.01	0.00	-5.34	0.00
D1hor	-0.11	0.04	-2.92	0.00
D1hor²	-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

Свойства, образующие первую плеяду положены в основу классификации почвенно-растительного покрова с выделением 8 классов. Принадлежность к классу каждой из 184 ОТЕ, снабженных полевыми описаниями, использована как обучающая выборка. В результате определен наиболее вероятный класс ПРП для каждого индивидуального пиксела (ОТЕ) при данной комбинации форм рельефа окрестности. В отличие от описанного выше варианта двухуровневого картографирования парциальных геосистем, мы теперь исходим из гипотезы *полимасштабности геосистемных взаимодействий*: каждая ОТЕ (пиксел) находится в рамочных условиях, создаваемых вмещающими геосистемами *нескольких* масштабных уровней. 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 (таблица 20). Как известно, пошаговый выбор является одним из методов устранения мультиколлинеарности, т.е. взаимозависимости переменных-предикторов (Айвазян, 2001).

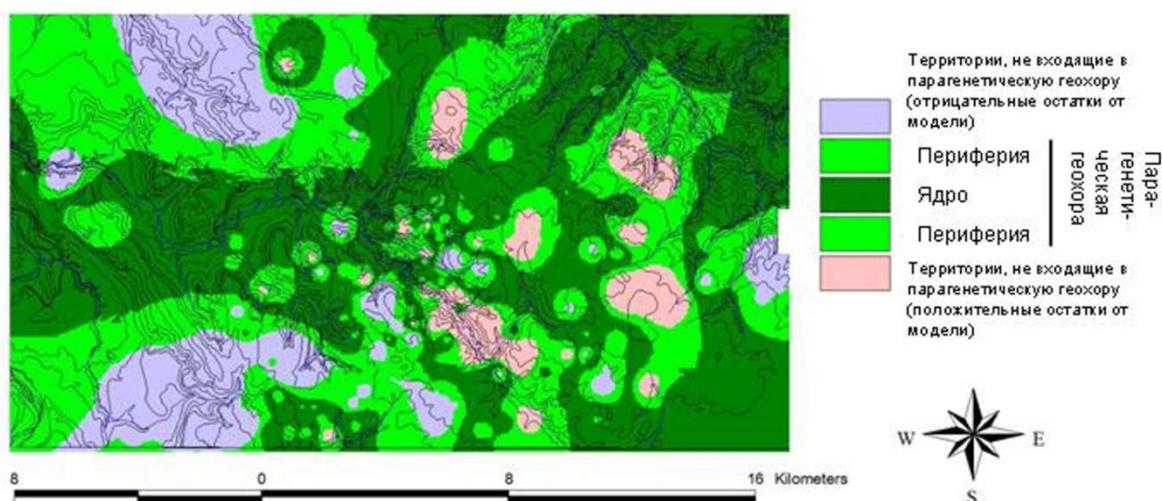


Рис. 52. Карта геохоры, образованной I плеядой свойств ландшафта, чувствительных к варьированию режима влажности почв (среднетаежный ландшафт, Архангельская область, полигон «Заячья»). Цветовой фон – значения остатков уравнения «регрессии поверхности отклика», связывающего свойства-члены I плеяды. Территории с небольшим отклонением остатков от 0 (зеленые тона) соответствуют ареалу наилучшего проявления межкомпонентной связи в плеяде. Территории с большими отрицательными (лиловый фон) и большими положительными (розовый тон) значениями остатков соответствуют ареалу, где данный тип межкомпонентной связи не проявляется.

Для первой плеяды в модель с наибольшим уровнем достоверности вошли показатели

вертикальной расчлененности в окрестностях со стороны 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 ПРП. Иными словами, для этих классов существуют специфичные для них характеристики рельефа. Для каждой ОТЕ, в том числе не снабженной полевыми наблюдениями, рассчитана вероятность принадлежности к каждому классу ПРП, а точнее – сочетания свойств первой плейды его свойств. На карте (рис. 53) показан наиболее вероятный класс парциальных геосистем, различных по увлажненности, образованных свойствами первой плейды при данном сочетании собственных свойств рельефа ОТЕ и рельефа вмещающих геосистем. Обратим внимание, что достоверно существующими могут считаться только те индивидуальные парциальные геосистемы, которые заключены в ареале парагенетической геохоры, показанной на рис. 52.

Представим содержание каждого из классов этих индивидуальных парциальных геосистем

Для 1-го класса парциальных геосистем-геомеров 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 лесах) осины и березы, черники, что индицирует наличие элювиальных горизонтов при маломощности органогенных, т.е. переменный окислительно-восстановительный режим.

Для 2-го класса парциальных геосистем-геомеров 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, что индицирует глубокую гумусированность и слабую оподзоленность хорошо дренированных почв

3-й класс парциальных геосистем-геомеров 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-геомеров приурочен к краевым частям плоских междуречий, где возможно временное переувлажнение при высоком стоянии верховодки, но 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, что соответствует максимальной глубине оподзоливания, наличие маломощных органогенных и гумусовых горизонтов, иногда – старопашотных.

Таблица 20. Прямой пошаговый выбор (Forward stepwise) морфометрических характеристик рельефа, значимых для распознавания 8 классов ОТЕ, выделенных по группе осей, составляющих 1-ю плеяду (чувствительность к влажности). Среднетаежный ландшафт в Архангельской области, полигон «Заячья».

Морфометрическая характеристика рельефа и сторона квадратной окрестности	Wilks Lambda	Partial	F-remove	p-level
Вертикальная расчлененность 1200 м	0.44	0.95	1.24	0.28
Уклон	0.44	0.95	1.25	0.28
Вертикальная расчлененность 6000 м	0.46	0.90	2.63	0.01
Вертикальная кривизна, 1200 м	0.44	0.94	1.45	0.19
Горизонтальная кривизна, 2000 м	0.46	0.91	2.30	0.03
Вертикальная расчлененность 3600 м	0.46	0.90	2.47	0.02
Вертикальная расчлененность 2800 м	0.45	0.92	2.11	0.04
Вертикальная расчлененность 2000 м	0.43	0.95	1.14	0.34

5-й класс парциальных геосистем-геомеров 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, в прирвовочных частях – наличие старопашотных горизонтов почв.

Для 6-го класса парциальных геосистем-геомеров характерна высокая, но не максимальная, расчлененность рельефа в полосе приближения коренных пород к поверхности и нарастания уклонов. Повышено обилие серой ольхи, характерно отсутствие мохового покрова, что соответствует высокой встречаемости старопашотных горизонтов почв.

Для 7-го класса парциальных геосистем-геомеров характерна минимальная расчлененность рельефа, удаленность от дренирующих эрозионных форм, высокое обилие сфагновых мхов, которые являются индикаторами развития торфяных, перегнойных и оглеенных горизонтов почв.

Для 8-го класса парциальных геосистем-геомеров 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.

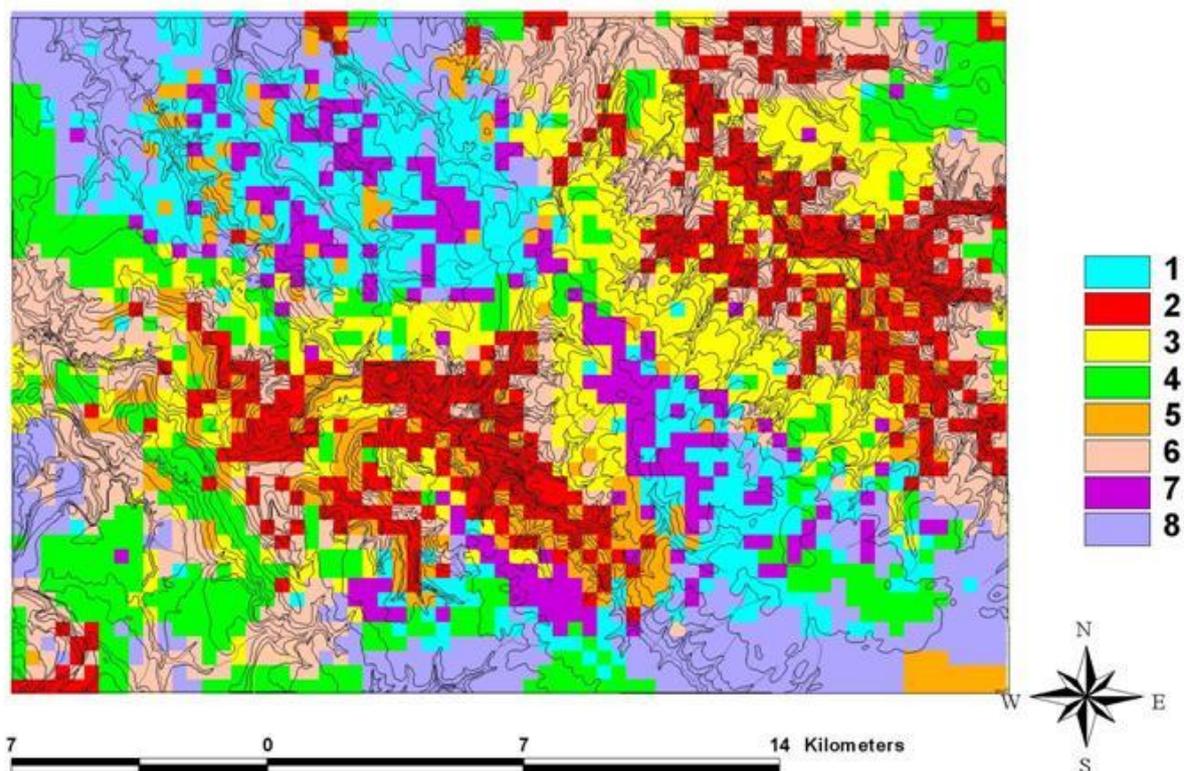


Рис. 53. Многоуровневая картографическая модель парциальных геосистем-геомеров 1-й плеяды свойств, чувствительных к влажности почв (среднетаежный ландшафт, Архангельская область, полигон «Заячья»). Наиболее вероятные классы свойств 1-й плеяды при данных характеристиках рельефа вмещающих геосистем, установленные методом дискриминантного анализа. Классы 1...8 – пояснения см. в тексте.

Вторая плеяда (рис. 51) отражает взаимосвязимость 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 уравнения «регрессии поверхности отклика», где эта ось – зависимая переменная, составляет 0,55. Остатки уравнения подчиняются нормальному

распределению (Chi-Square test = 5.73742, $p = 0.12511$). 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 практически отсутствует: коэффициенты корреляции Спирмена с вертикальной расчлененностью рельефа в окрестностях разных размеров хотя и достоверны, но очень низки (0,16-0,17).

Сущность парциальной геосистемы, образуемой 2-й плеядой, заключается в сопряженной реакции древесного, кустарникового, кустарничкового и травяного яруса на эффекты перераспределения элементов минерального питания в почвах, отражающееся 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 глубокогогумусированными (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. Эта группа ярусов обладает большей толерантностью и может иметь в таких местообитаниях состав хотя и своеобразный, но не столь радикально отличный от других местообитаний, как травяной ярус. Во-вторых, недостаточная точность модели в области крайних значений может индцировать 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 при *одновременном* присутствии гумусовых горизонтов в почве и кустарников с высокой и средней потребностью в почвенном азоте и основаниях (смородина, малина, жимолость, вольчьеягодник) (рис. 54, А). При этом наличие глубокогумусированных почв само по себе не означает высокого обилия неморальных и нитрофильных видов трав, 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. 54, 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.). Это в полной мере относится к нитрофильным травам, но нитрофильные деревья и кустарники (ольха, смородина, малина) могут присутствовать и в суходольных местобитаниях, часто в нетривиальном сочетании с сосновым лесом. Это может быть объяснено только наследием внесения удобрений в почвах, ныне покрытых лесом. Поэтому при повышенном обилии ольхи во многих урочищах обилие неморальных и нитрофильных видов становится меньше ожидаемого.

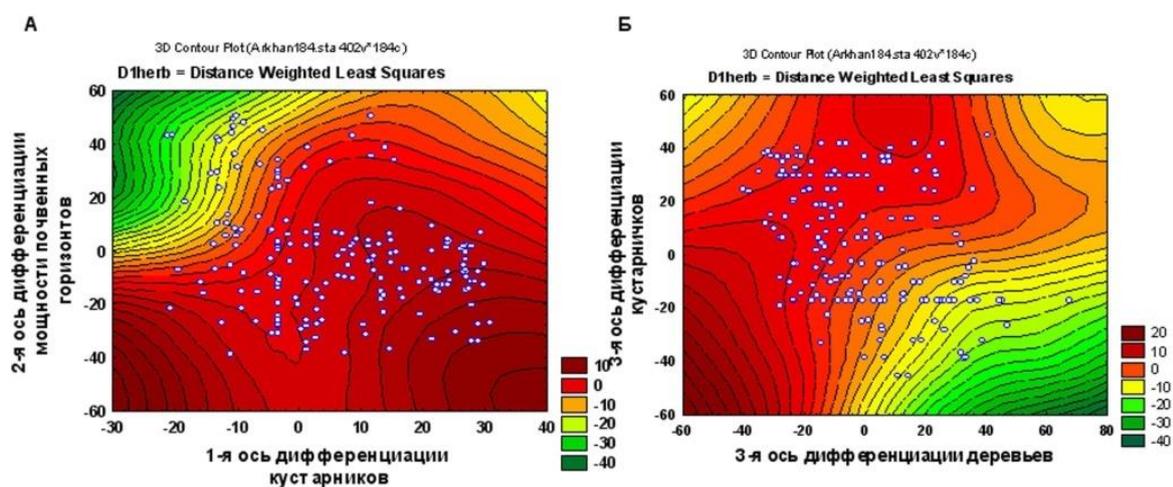


Рис. 54. Неаддитивные эффекты формирования травяного яруса (1-я ось дифференциации, $d1herb$). Среднетаежный ландшафт, Архангельская область, полигон «Заячья». А – в зависимости от состава кустарничкового яруса (1-я ось, $D1bush$) и строения почвенного профиля (2-я ось, $D2hor$). Б – в зависимости от состава древесного яруса (3-я ось, $d3tree$) и кустарничкового яруса (3-я ось, $d3low$).

На карте парагенетической геохоры, соответствующей 2-й плеяде свойств ландшафта (рис. 55), хорошо заметно, что крупный ареал, не вписывающийся в модель (с большими по

модулю остатками), приурочен к глубокорасчлененной и глубоковрезанной средней части долины Заячьей. Там происходит активная разгрузка щелочных грунтовых вод, и травяной 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.

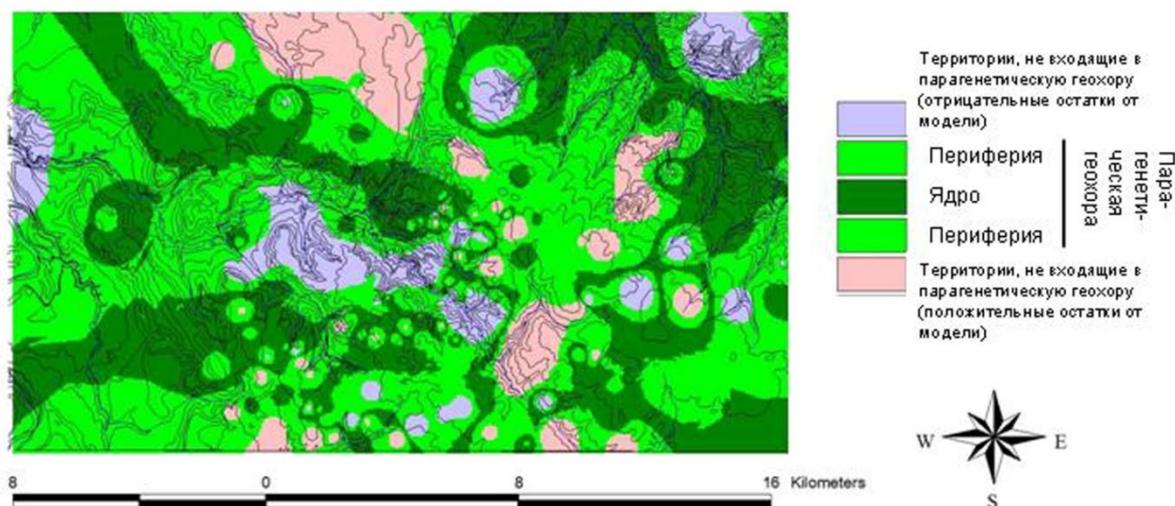


Рис. 55. Карта парagenетической геохоры, образованной 2-й плеядой, отражающей сопряженную реакцию древесного, кустарникового, кустарничкового и травяного яруса на перераспределение элементов минерального питания в почвах (среднетаежный ландшафт, Архангельская область). Цветовой фон – значения остатков уравнения «регрессии поверхности отклика», связывающего свойства-члены 2-й плеяды. Территории с небольшим отклонением остатков от 0 (зеленые тона) соответствуют ареалу наилучшего проявления межкомпонентной связи в плеяде. Территории с большими отрицательными (лиловый фон) и большими положительными (розовый тон) значениями остатков соответствуют ареалу, где данный тип межкомпонентной связи не проявляется.

Представляет особый интерес вопрос: бывает ли так, что свойства травостоя варьируют независимо и от внутриуровневых 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. 56, такой вариант возможен. Если остатки близки к 0 в модели внутриуровневых связей, то они близки к 0 и в наилучшей из моделей межуровневых связей. Таковой для 1-й оси травостоя является модель для окрестности с линейным размером 1200 м, для 3-й оси древесного – размером 2000 м. Если же соотношение мегатрофных и олиготрофных видов травостоя в каких-либо фациях нетипично для

зафиксированного сочетания 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*. 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. 56) основная часть точек концентрируется вблизи нулевых значений обеих осей, а на графике для древостоя (рис. 57) 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 внутриуровневых межкомпонентных связей и межуровневых связей методом суперфакторов (раздел 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 (таблица 16). Напротив, члены 1-й плеяды, отражающие реакцию на влажность почвы и не входящие одновременно во 2-ю плеяду, отличаются превышением вклада внутриуровневых межкомпонентных связей. *Поэтому для ландшафта Архангельского среднетаежного полигона многоуровневое картографирование рельефа дает больше ландшафтной информации о трофотопях и соответствующих фитоценозах, чем о гигротопях*.

На рис. 58 показаны индивидуальные парциальные геосистемы-геомеры, выделенные на основании многоуровневой модели для 2-й плеяды свойств. Как и для 1-й плеяды, необходима оговорка, что достоверны только те парциальные геосистемы-геомеры, которые входят в ареал геохоры, отраженной на рис. 55. На рис. 59 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 и индикационные правила почвенно-фитоценологических отношений.

1-й класс парциальных геосистем-геомеров приурочен к наиболее глубококоврезанным густорасчлененным частям долин с выходами коренных пород, обуславливающим высокую обеспеченность основаниями, нейтральную или слабощелочную среду в почвах. Занимающий похожие позиции 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, волчегодника 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-геомеров характерно повышенное обилие видов травостоя неморальной и нитрофильной групп, осины и ольхи, хотя и меньше, чем в классе 1, повышенная встречаемость жимолости, волчегодника и смородины в кустарниковом ярусе.

3-й класс парциальных геосистем-геомеров формируется в краевых частях плоских междуречий с характерным относительно мощным чехлом обедненных песчано-супесчаных отложений, часто с оглееными почвами. Характерно повышенное обилие сосны в древостое, преобладание бореальных или боровых мезофильных и гигрофильных видов травостоя (седмичник, линнея, плауны, ожика, грушанка, осоки, марьянник лесной, ятрышники), бореальных кустарников (ивы, можжевельник) и кустарничков (брусника, черника).

4-й класс парциальных геосистем-геомеров 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 гигрофильных видов травостоя; повышенная встречаемость жимолости и смородины в кустарниковом ярусе, костяники. Степень дренированности достаточна для оподзоливания и выноса минеральных веществ; влияние грунтовых вод не проявляется.

5-й класс парциальных геосистем-геомеров встречается в неглубококорасчлененной полосе формирования эрозионных врезов и водотоков в приводораздельной части пологих склонов с выклиниванием грунтовых вод. Характерно преобладание бореальных мезофильных и гигрофильных видов травостоя. При этом, по сравнению со всеми классами, кроме 1-го, повышена мощность гумусовых горизонтов, часто встречаются перегнойные почвы в зонах склоновой разгрузки обогащенных грунтовых вод, оподзоливание ослаблено за счет нейтрализации органических кислот основаниями грунтовых вод.

6-й класс парциальных геосистем-геомеров формируется на плоских или пологонаклонных расширенных междуречьях, не захватывая 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 гигрофильных видов травостоя, бореальных кустарничков

(черника), торфянисто-подзолистых почв без гумусовых горизонтов, иногда с перегнойным горизонтом.

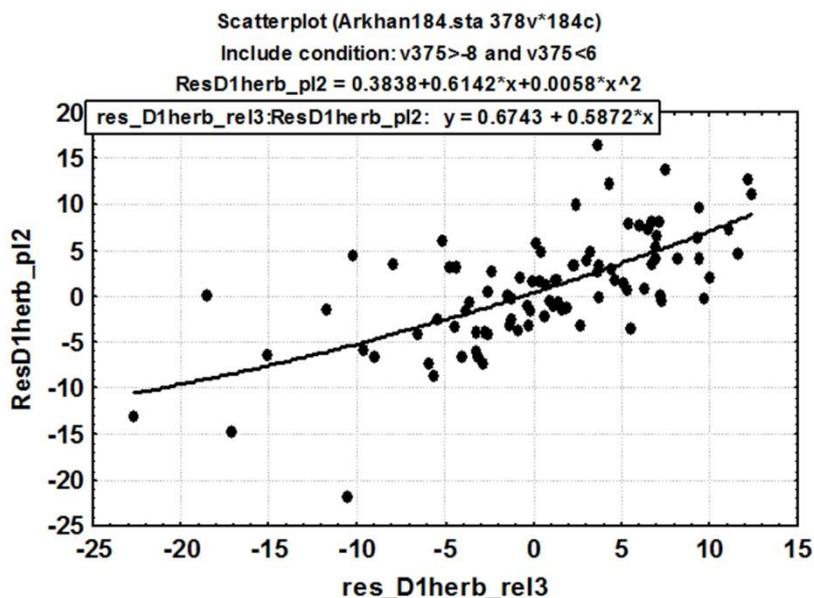


Рис. 56. Прямая связь остатков моделей внутриуровневых и межуровневых связей для 1-й оси дифференциации травостоя (чувствительность к трофности) для среднетаежного ландшафта, Архангельская область, полигон «Заячья». Res_D1herb_rel3 – остатки мультирегрессионной модели 2-й степени, связывающей значения 1-й оси дифференциации травостоя с морфометрическими характеристиками рельефа в квадратной окрестности со стороной 1200 м. $ResD1herb_pl2$ – остатки модели «регрессии поверхности отклика», связывающей значения 1-й оси дифференциации травостоя со свойствами компонентов, входящими во 2-ю плейду.

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 признаки повышенной трофности (повышенное обилие осины), но характерно преобладание бореальных видов травостоя, бореальных кустарничков (черника).

8-й класс парциальных геосистем-геомеров 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 гигрофильных видов травостоя, бореальных кустарничков (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).

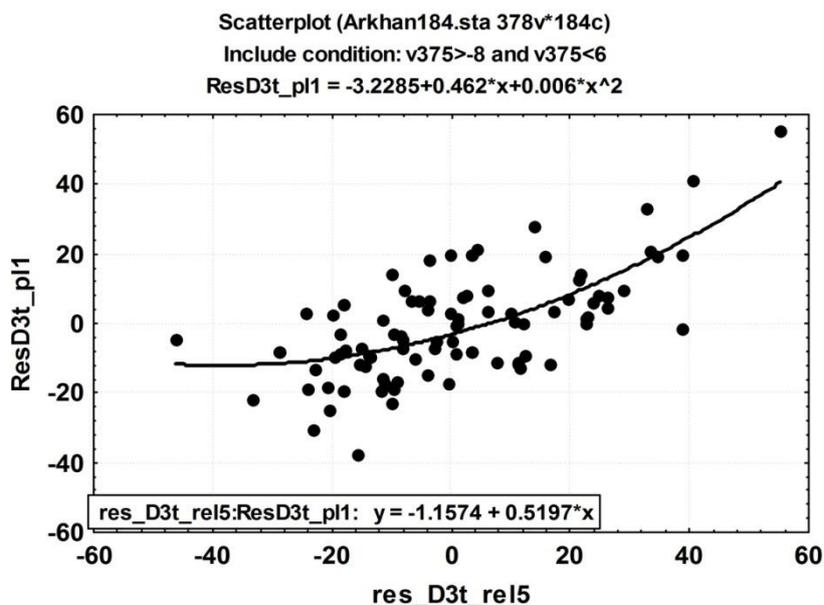


Рис. 57. Прямая связь остатков моделей внутриуровневых и межуровневых связей для 3-й оси дифференциации древостоя (чувствительность к трофности) для среднетаежного ландшафта, Архангельская область, полигон «Заячья». Res_D3t_rel5 – остатки мультирегрессионной модели 2-й степени, связывающей значения 3-й оси дифференциации древостоя с морфометрическими характеристиками рельефа в квадратной окрестности со стороной 2000 м. $ResD3t_pl1$ – остатки модели «регрессии поверхности отклика», связывающей значения 3-й оси дифференциации древостоя со свойствами компонентов, входящими в 1-ю плеяду.

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 (рис. 51), 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 плеяду входят свойства, имеющие самые разные (в отличие от 2-й плеяды) резонансные уровни

отношений с рельефом вмещающих геосистем – от 1200 до 6000 м (таблица 16). Нет и единого соотношения вкладов внутриуровневых и межуровневых связей. Для 2-й оси дифференциации кустарничков и 4-й – кустарников обе модели зависимости от суперфакторов недостоверны (таблица 16). Все члены плеяды (за исключением 1-й оси дифференциации кустарников, входящей одновременно во 2-ю плеяду) не имеют также достоверных связей со свойствами почв. Недостоверны модели «регрессии поверхности отклика» для зависимости каждой из них от совокупности осей дифференциации мощностей почвенных горизонтов, цветовых характеристик почв и гранулометрического состава отложений. Отсутствие в 3-й плеяде свойств почв заставляет проверять наличие чисто внутрифитоценоотических 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. Модель «регрессии поверхности отклика», в которой 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).

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 мелко мозаичного 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. 60 оценена неопределенность классификационной принадлежности (НКП) операционных территориальных единиц для каждой плеяды свойств почвенно-растительного покрова. Очевидно, что многоуровневая 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 как недостаточность данного уровня и необходимость учета контрастов микрорельефа, так и реальную континуальность гигротопов.

Разумеется, наибольший интерес представляет многоуровневая 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 всем свойствам, входящим в 1-ю или 2-ю плеяду. Дискриминантной моделью при критерии Фишера $F \geq 1$ 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. 61, А. Хорошо заметна компактность ареалов классов ПРП, по сравнению с моделями отдельно для 1-й и 2-й плеяд. В структуре почвенного покрова такие классы примерно соответствуют контрастным бесфоновым мезоструктурам со слабовыраженной генетической связью между элементарными почвенными ареалами или микроструктурами, т.е. мозаикам (по В.М. Фридланду, 1977).

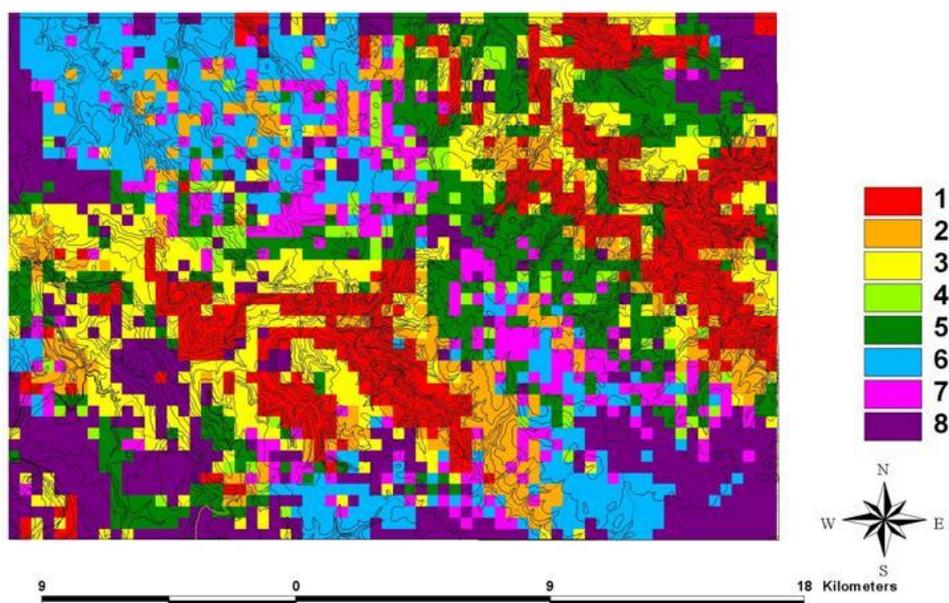


Рис. 58. Многоуровневая картографическая модель парциальных геосистем 2-й плеяды свойств, чувствительных к трофности почв (среднетаежный ландшафт, Архангельская область, полигон «Заячья»). Классы 1...8 – пояснения см. в тексте.

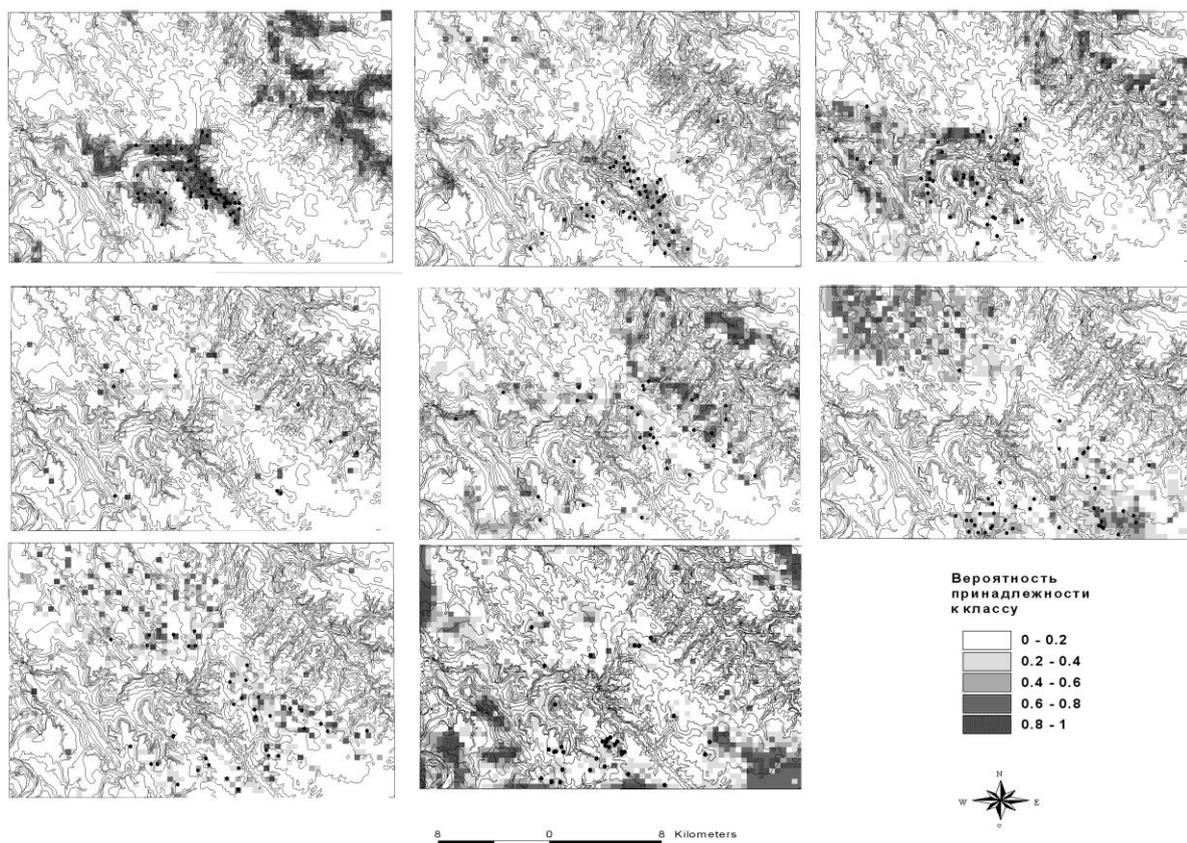


Рис. 59. Вероятность соответствия рельефа операционных территориальных единиц типичным значениям свойств почвенно-растительного покрова для классов, выделенных на основании чувствительности к трофности (2-я плеяда) (среднетаежный ландшафт, Архангельская область, полигон «Заячья»). Разрешение цифровой модели рельефа 400 м. 1...8 – классы почвенно-растительного покрова. Черные точки – ОТЕ, обеспеченные полевыми описаниями соответствующего класса почвенно-растительного покрова.

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) с высокой степенью заболоченности. Характерны сосново-березовые хвощово-черничные сфагновые леса на почвах с повышенной мощностью торфяного или перегнойного горизонта, часто без оподзоливания. Здесь же распространены наиболее крупные олиготрофные сосново-кустарничково-пушице-сфагновые болота на торфяно-глееземах и торфяниках.

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 искусственного 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.

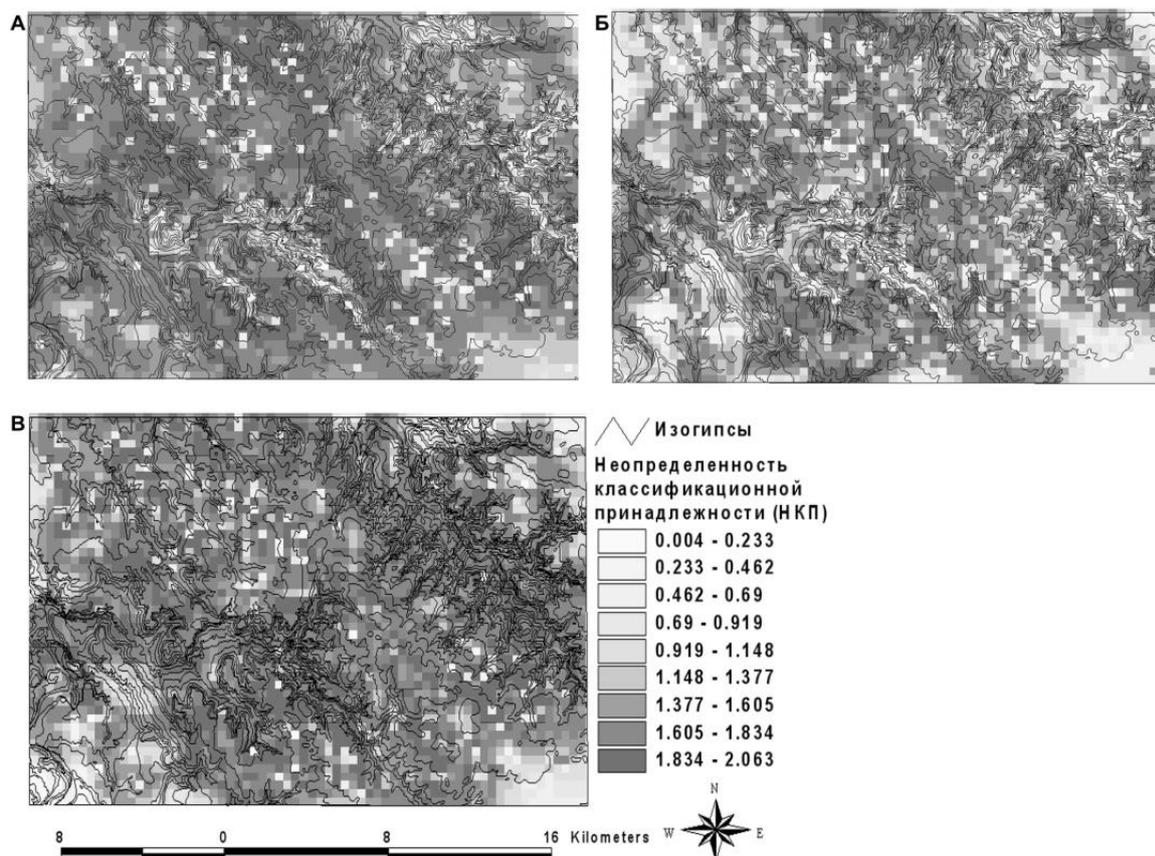


Рис. 60. Неопределенность классификационной принадлежности операционных территориальных единиц к классам почвенно-растительного покрова на основании морфометрических характеристик рельефа (среднетаежный ландшафт, Архангельская область, полигон «Заячья»). А – плейда 1 (чувствительность к влажности). Б – плейда 2 (чувствительность к трофности). В – плейда 3 (положение в сукцессионном ряду).

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.

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 оснований из карбонатных 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 (в основном до 10 см). Преобладают елово-осиново-березовые леса черничные бореально-мелкотравные зеленомошно-долгомошные на торфянисто-подзолистых глееватых почвах, местами присутствуют сосново-кустарничково-сфагновые болота на торфяно-глееземах.

6-й класс отличается наиболее густо- и глубокорасчлененным рельефом, что связано с расположением в зоне максимального неотектонического дробления, дренированности и влияния богатыми основаниями коренных пород. Характерны елово-березово-осиновые леса субнеморальные кислично-снытевые на дерново-подзолистых и агродерново-подзолистых почвах, серогумусовых почвах. 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. Особенностью класса является наличие еловых чернично-зеленомошных и долгомошных лесов с хорошим возобновлением, формирование торфянистого горизонта мощностью до 10–20 см, глубокое оподзоливание при повышенной мощности песчано-супесчаного чехла.

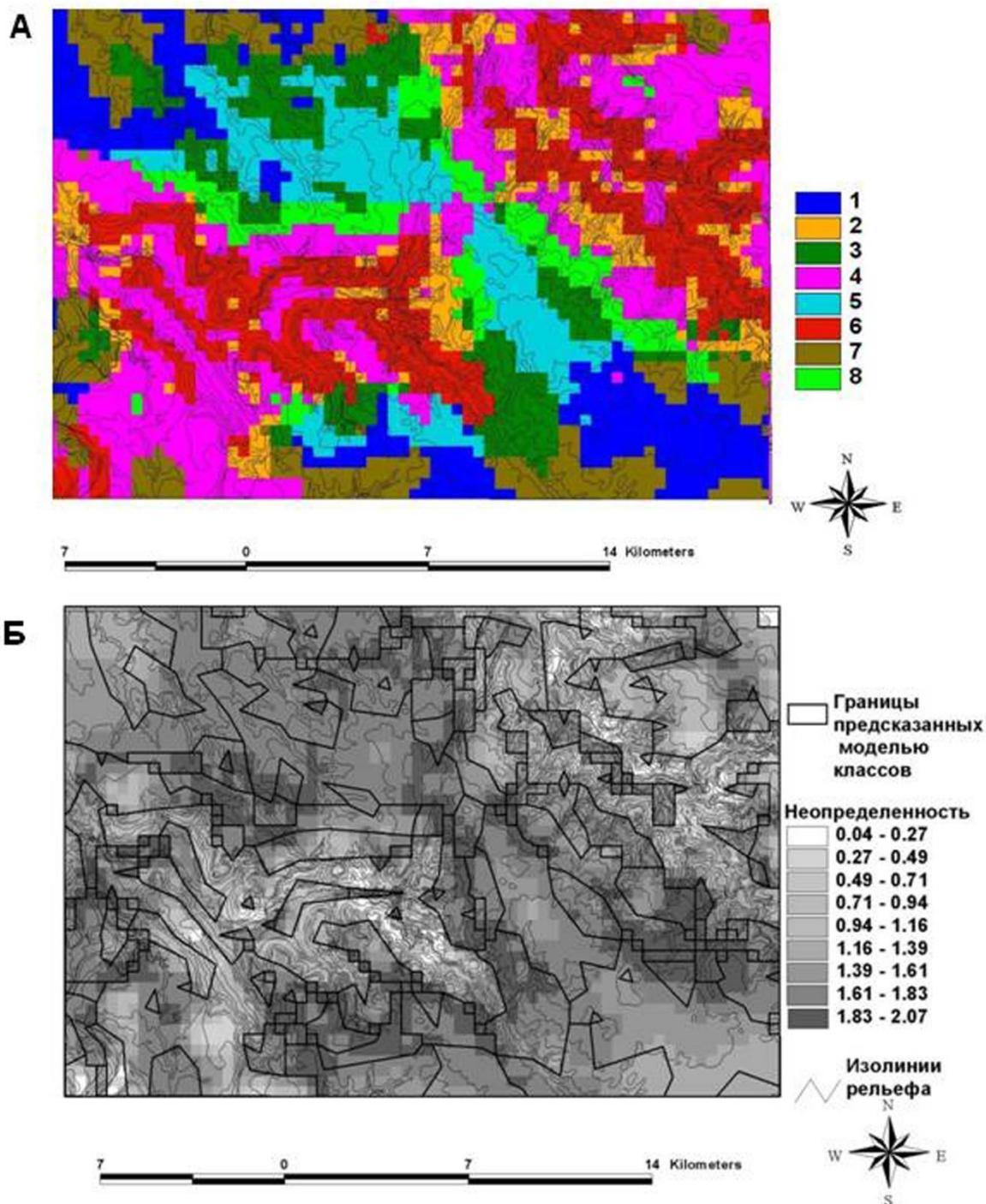


Рис. 61. Многоуровневая модель парциальных геосистем-геоморфов, выделенных по чувствительности свойств почв и фитоценозов к влажности и трофности (1-я и 2-я пляды), и свойствам рельефа значимых уровней вмещающих геосистем (среднетаежный ландшафт, Архангельская область, полигон «Заячья»). А – наиболее вероятные классы почвенно-растительного покрова (пояснения см. в тексте). Б – неопределенность классификационной принадлежности; полигоны детального исследования: К – «Козловка», С – «Становская балка».

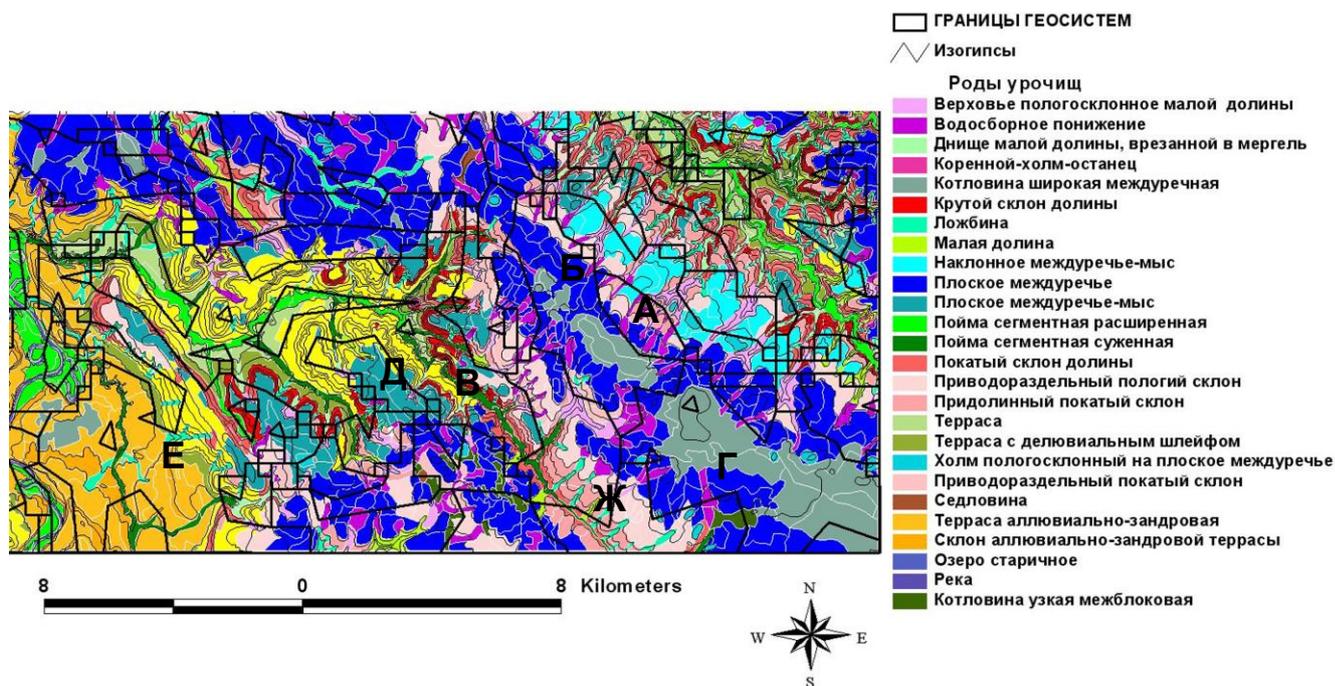


Рис. 62. Парциальные геосистемы-геомеры, выделенные по многоуровневой модели (рис. 61) (контуры с границами черного цвета), на цветном фоне геоморфологического содержания ландшафтной карты масштаба 1:50000 (Хорошев, 2005 а). Среднетаежный ландшафт, Архангельская область, полигон «Заячья».

Сопоставим многоуровневую картографическую модель и геоморфологическое содержание традиционной ландшафтной карты, составленной для уровня урочищ (Хорошев, 2005а) (рис. 62). Детальность границ многоуровневой модели, очевидно, более низкая, чем на ландшафтной карте. Местами границы выглядят достаточно грубыми и не различающими контуры большинства эрозионных форм, что связано с изначально заложенным в модель крупным размером операционной территориальной единицы – 400 м. Однако многоуровневая модель показывает целесообразность различать особый уровень ландшафтной организации. Фитоценозы и почвы обладают общностью на уровне выше урочища и ниже местности. Многоуровневая модель предоставляет возможность объединения урочищ в группы, сходные по отклику почвенно-растительного покрова на характер расчлененности рельефа. Например, объединяется в самостоятельные геосистемы группы урочищ: а) чередующихся неглубоковрезанных лощин и узких локальных водораздельных поверхностей с мезотрофными бореальными сообществами на почвах со слабокислой реакцией (рис. 62, А); б) слабодренированных плоских широких водораздельных поверхностей и заболоченных котловин с олиготрофными сообществами на кислых почвах (рис. 62, Б); в) крутых склонов, расчлененных глубоковрезанными эрозионными формами, с выходами мергелей, с

мезотрофными и мегатрофными субнеморальными сообществами на нейтральных или слабощелочных почвах (рис. 62, В) и др. Обращает на себя внимание, что многоуровневая модель показывает почвенно-фитоценотическую общность достаточно удаленных и генетически неодинаковых территорий (рис. 62, А, класс 4): широких плоских водораздельных поверхностей на междуречье Заячьей и Соденьги (рис. 62, Г), узких водораздельных поверхностей между глубоковрезанными долинами Заячьей и Межницы (рис. 62, Д), широких цокольных террас Заячьей и Кокшеньги и (рис. 62, Е). Комбинируя в модели сведения о включенности ОТЕ в геосистемы разных масштабных уровней, удается отразить сходство территории по доминированию лесов бореального облика на подзолистых почвах. Это обусловлено хорошо выраженной экранирующей ролью песчано-супесчаного чехла и/или торфа по отношению к карбонатным моренным суглинкам: почвенно-растительный покров изолирован от источника оснований. Все подобные территории или исключались из хозяйственного использования, или обрабатывались только с условием интенсивных химических и водных мелиораций. Геосистемы этого класса частично подвергаются распашке, но качество почв низкое, реакция слабокислая, в почвенном поглощающем комплексе преобладают водород и алюминий, в краевых частях водораздельных поверхностей проявляется оглеение (Хорошев, 2005 а). Большинство таких участков в 1990-е гг. было заброшено и ныне зарастает ивой, сосной и березой. В некоторых случаях многоуровневая модель, наоборот, детализирует роды урочищ, выделенные на геоморфологической основе. Так, ареал урочищ приводораздельных и придолинных склонов (рис. 62, Ж) делится границей, которая подчеркивает различия почвенно-растительного покрова в зависимости от глубины вреза основной долины.

Приведенные примеры показывают *неочевидность или неповсеместность приоритета генетического принципа разделения природно-территориальных комплексов*. Таким образом, предложенная методология позволяет *распознать «скрытые» ландшафтные структуры, неочевидные по геоморфологическим границам, но имеющие отражение в почвенно-растительном покрове и характере планировочных решений*. Такие «скрытые», или «латентные», структуры в большой степени определяются ландшафтно-геохимическим фоном, а именно – доступностью элементов минерального питания в зависимости от степени близости карбонатных отложений к поверхности и зон разгрузки щелочных грунтовых вод. Надежным индикатором контрастов ландшафтно-геохимического фона служит комбинация морфометрических характеристик рельефа геосистем нескольких масштабных уровней. Если детальные технологические решения разрабатываются для конкретных урочищ, то ландшафтно-адаптивное распределение видов угодий и набор принципиальных ограничений на землепользование реально определяется именно в границах геосистем, показанных на

многоуровневой модели.

Карта неопределенности классификационной принадлежности (рис. 61, Б) показывает достаточно обширные области высокой неопределенности, которая соответствует широким континуальным переходам между классами геосистем. В таких полосах с близкой вероятностью могут существовать разные сообщества и почвы. Основная их часть сконцентрирована на плоских и пологосклонных приводораздельных пространствах (Мостницкая, Гридинская, Болванская местности), где нет резких геолого-геоморфологических границ и наблюдается очень постепенное, без резких рубежей, нарастание уклонов, улучшение дренированности и уменьшение степени изолированности поверхности супесчаным плащом и торфом от богатых моренных карбонатных суглинков. При изменении внешних условий (например, атмосферного увлажнения) может произойти относительно быстрый сдвиг, например, от березово-сосновых бореальных лесов (2 класс) к осиново-еловым субнеморальным лесам (3 класс), т.е. проявится низкая устойчивость-инертность. С другой стороны, в полосах континуальных переходов возможны несколько устойчивых состояний, т.е. повышенная устойчивость-пластичность. Карту неопределенности классификационной принадлежности можно рассматривать в качестве карты ядер типичности и экотонов, возникающих по мере ослабления основного системообразующего процесса. Например, для 1-го и 5-го классов таковым является заболачивание.

На основе оценки неопределенности классификационной принадлежности удастся различать дискретные и континуальные границы геосистем и определять ширину переходных полос с неравновесными отношениями компонентов. В большинстве случаев широкая переходная полоса свидетельствует о пониженной напряженности экологических градиентов (Burnett, Blaschke, 2003). Для таких случаев в литературе рекомендуется, прежде всего, проверять гипотезу о необходимости привлечения дополнительных данных или сведений о неучтенных экологических процессах (Guisan, Zimmermann, 2000). Полоса, определенная как переходная между геосистемами некоторого масштабного уровня, может состоять из мозаики геосистем более низкого уровня с вполне дискретными границами. В ландшафтоведении выделены несколько типов экотонов: а) континуальные с постепенным вытеснением признаков одной геосистемы признаками другой, б) синергетичные с обособлением геосистем с особыми свойствами, в) стримальные, состоящие из нескольких самостоятельных полос (Гродзинский, 2014). Поэтому, выявляя переходные полосы с высокой НКП, мы тем самым можем наметить участки, где необходимы детальные микромасштабные исследования. Они позволят определить причины возможного сосуществования признаков нескольких классов геосистем, повысить корректность разграничения геосистем, определить тип экотона, распознать редкие и уникальные ландшафтные единицы. Последнее особенно важно при территориальном

планировании и природоохранных мероприятиях. В нашем случае, безусловно, в качестве очевидной гипотезы о причинах высокой НКП следует рассматривать большую чувствительность свойств биотических и биокосных компонентов к дробным форм рельефа, чем к формам, улавливаемых ЦМР с разрешением 400 м, т.е. вклад дисперсии подсистем (рис. 8 – цифра 5). Вторым направлением поиска может быть перебор гипотез об адекватной дробности классификации геосистем. Поэтому продемонстрируем *значимость узколокальных эффектов* и способ определения адекватной детальности классификации на примере двух секторов повышенной неопределенности классификационной принадлежности, обозначенных на рис. 61, Б.

Один из секторов повышенной НКП («Козловка») соответствует выпуклой форме – узкой водораздельной поверхности между бассейнами малых рек Козловка и Стругница, второй – вогнутой форме мезорельефа «Становской балке». Оба участка находятся в пределах 2-го и 6-го классов (рис. 61, А). Они 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». В разделе 4.4.3 для одного из этих участков уже было показано, что в континуальном представлении значительная часть дисперсии свойств растительного и почвенного покрова (до 30-48% для разных осей) описывается в моделях «регрессии поверхности отклика» рельефом ближайшей окрестности при высоком разрешении ЦМР 10 и 30 м (таблица 14), т.е. взаимодействиями примерно фациального уровня. Теперь продемонстрируем, какую количественную оценку получает вклад взаимодействий фациального уровня при дискретном описании почвенно-растительного покрова для разных уровней дробности описания рельефа.

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 ПРП при разных сочетаниях размера ОТЕ и размера вмещающей геосистемы. Для 4-х, 6-ти, 8-ми, 10-ти, 12-ти классов ПРП рассчитывались (таблица 21):

а) доля классов ПРП, корректно распознанных четырьмя морфометрическими характеристиками рельефа (вертикальная и горизонтальная расчлененность, вертикальная и горизонтальная кривизна) при линейном размере ОТЕ 10 м и линейных размерах вмещающей геосистемы 30, 70, 110 м;

б) доля классов ПРП, корректно распознанных четырьмя морфометрическими характеристиками рельефа при линейном размере ОТЕ 30 м и линейных размерах вмещающей геосистемы 90, 270, 330 м;

в) доля классов ПРП, корректно распознанных совокупностью морфометрических характеристик рельефа в окрестностях со стороной 30, 70 и 110 м при линейном размере ОТЕ 10 м (метод прямого пошагового выбора с критическим значением критерия Фишера $F \geq 1$);

г) доля классов ПРП, корректно распознанных совокупностью морфометрических характеристик рельефа в окрестностях со стороной 90, 270 и 330 м при линейном размере ОТЕ 30 м (метод прямого пошагового выбора с критическим значением критерия Фишера $F \geq 1$);

д) доля классов ПРП, корректно распознанных совокупностью морфометрических характеристик рельефа в окрестностях со стороной 1200, 2000, 2800, 3600 и 6000 м при линейном размере ОТЕ 400 м (метод прямого пошагового выбора с критическим значением критерия Фишера $F \geq 1$).

Для последнего случая морфометрическая характеристика определялась для точки описания, наиболее близкой к центру пиксела с размером 400 м, для остальных точек значения интерполировались методом обратно взвешенных расстояний *Inverse Distance Weighted (IDW)* по 12 ближайшим соседним точкам, 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 дифференциацию 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.

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 чернично-долгомошно-зеленомошные на торфянисто-подзолистых глееватых почвах.

2-й класс формируется в присклонных позициях без эрозионного расчленения при соседстве с плоскими и крутосклонными фациями. Преобладают осиново-елово-березово-сосновые леса субнеморальные снытево-кисличные на дерново-подзолистых и серогумусовых почвах.

Таблица 21. 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, м	Количество классов по свойствам почвенно-растительного покрова (совокупности всех осей дифференциации)				
		4	6	8	10	12
<i>Двухуровневые модели</i>						
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
<i>Многоуровневые модели</i>						
10	30, 70, 110 одновременно – (прямой пошаговый выбор, $F=1$)	49	49	38	28	27
30	90, 270, 330 одновременно (прямой пошаговый выбор, $F=1$)	55	39	43	37	33
400	1200, 2000, 2800, 3600, 6000 одновременно (прямой пошаговый выбор, $F=1$)	53	39	46	36	33

3-й класс формируется в неглубоко-, но густо расчлененных приводораздельных позициях, где начинает формироваться поверхностный сток по водосборным понижениям и неглубоким ложбинам. Преобладают березово-осиново-еловые леса кисличные на дерново-подзолистых и агродерново-подзолистых почвах.

4-й класс формируется в притальвеговых позициях в верховьях эрозионных форм. Преобладают осиново-березово-елово-сосновые леса, местами с серой ольхой, таволгово-разнотравные или кислично-щитовниковые на дерново-подзолистых, местами перегнойных или серогумусовых почвах.

Из описания классов можно увидеть, что их содержание, по сути, детализирует содержание 2-го и 6-го классов, выделенных в мелком масштабе (при размере ОТЕ 400 м) на рис. 61 А, которые с равной вероятностью могут формироваться при данном наборе условий рельефа. Однако более дробный размер ОТЕ (10 или 30 м) позволяет конкретизировать условия микрорельефа, характерные для фитоценозов с отличающимся соотношением бореальных и неморальных признаков. Классификация данного уровня позволяет различать микроструктуры почвенного покрова. Оба класса ОТЕ, предсказанные грубой моделью, не только могут развиваться при данных условиях рельефа (узкая водораздельная поверхность между двумя глубоковрезанными долинами), но и действительно существуют на данной территории. При этом фитоценозы с наибольшим участием субнеморальных видов (с кислично-снытевым напочвенным покровом) предпочитают присклоновые позиции с наименее глубоким залеганием пермских мергелей, а более бореальные варианты (кисличные, кислично-щитовниковые, бореально-мелкотравные) – в более возвышенных приводораздельных позициях с большей мощностью песчано-супесчаного чехла или с торфяным горизонтом. В принципе можно допустить и другие толкования высокой НКП, отраженной на рис. 61 Б, например: возможность триггерного эффекта между двумя классами, постепенное вытеснение ПРП одного класса другим.

При возрастании количества классов ПРП больше 4 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.

Многоуровневая модель межкомпонентных отношений оказывается более адекватной, чем двухуровневая, либо при размере ОТЕ 10 м и выделении 6 классов ПРП, либо при размере ОТЕ 30 м и выделении 8 классов ПРП, либо при размере ОТЕ 400 м и выделении 8 классов ПРП. При других сочетаниях параметров масштаба многоуровневая модель не дает дополнительного объяснения варьирования свойств ПРП.

Таким образом, проведенный анализ показал целесообразность отражения варьирования свойств ПРП на нескольких масштабных 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 подробности классификации рельефа, то есть количества классов.

Для водораздельного урочища полигона «Козловка» результаты были представлены в работе (Хорошев и др., 2008): разделение 4-х классов рельефа оптимально отражает варьирование свойств почвенно-растительного покрова при размере ОТЕ 30 м. 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 выше 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 (почти везде – гумусового) горизонта почв, 4) цвета почв, 5) гранулометрического состава почв. Использовался стандартный метод без выбора переменных, то есть все 4 переменные включались в расчет. В одном из вариантов в качестве группы независимых переменных использовалась вся совокупность осей дифференциации – всего 20. 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 подробности классификации рельефа (2, 4, 6 классов) при 2 вариантах размеров ОТЕ (10 и 30 м). В отличие от результатов, представленных в работе (Хорошев и др., 2008), здесь используется более узкий набор морфометрических характеристик для сопоставимости с результатами аналогичных расчетов на других исследованных полигонах.

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 уровень дробности классификации рельефа, который был бы наиболее значим для распознавания максимального количества свойств разных компонентов ландшафта? Если такой (или такие) уровень дробности удастся выявить, то его можно рассматривать как основание для выделения целостных геосистем с согласованным сочетанием свойств компонентов.

Полученные результаты (таблица 22) 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 специфический 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.

Итак, как показали результаты, приведенные в разделах 4.4.3 и 4.8.3, в таежном и степном ландшафтах от четверти до половины информации о варьировании свойств почвенно-растительного покрова в соответствии с рельефом приходится на вещественно-энергетические

и информационные взаимодействия примерно фациального уровня. Этим объясняется относительно невысокое качество моделей межуровневых связей ландшафтного уровня и наличие широких полос с высокой неопределенностью классификационной принадлежности.

Продемонстрированный опыт двухуровневого и многоуровневого картографирования геосистем позволяет сделать ряд общих заключений.

Проверка гипотезы о полимасштабной и полиструктурной организации географического ландшафта подтвердила наличие комбинированных эффектов, возникающих от трансляции информации одновременно несколькими уровнями вмещающих геосистем. В модельном ландшафте Архангельского среднетаежного полигона плеяды свойств, чувствительных к трофности, в большей степени определяются рельефом вмещающих геосистем, чем плеяды свойств, чувствительных к влажности. Поэтому многоуровневое картографирование рельефа для этой территории дает больше ландшафтной информации о трофотопах (и, следовательно, – почвенно-геохимической обстановке) и соответствующих фитоценозах, чем о гигротопах. 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 выделения природно-территориальных комплексов. Сходный почвенно-растительный покров может возникать на участках различного генезиса при сходстве условий минерального питания и морфологических свойств вмещающих геосистем. Этот результат совпадает с положением, высказанным Г.А. Исаченко (1998). Большое значение для ландшафтной дифференциации имеют неаддитивные эффекты, когда определенный интервал значений свойства ПТК достигается только при необходимом сочетании значений других свойств.

Реализованная методология позволила выявить геосистемы особой категории, границы которых необязательно совпадают с очевидными геолого-геоморфологическими рубежами и объединяют группы урочищ. В таких геосистемах специфичность и монотонность значений свойств, объединенных в плеяду, задана ландшафтно-геохимическим фоном, который является результатом совокупного эффекта разнотипных и разномасштабных процессов. Представленные карты парагенетических геохор и парциальных геосистем-геомеров отражают одновременно результаты топологических и хорологических отношений в ландшафтном пространстве. Наличие больших площадей с неопределенностью классификационной принадлежности свидетельствует о том, что парциальные геосистемы-геомеры образуют континуум, когда даже небольшие изменения параметров пространственной структуры

приводит к сдвигу в свойствах компонентов. При этом между участками ландшафта, где почвенно-растительный покров строго адаптирован к морфолитогенной основе, формируются широкие переходные полосы, в которых расширен диапазон возможных комбинаций свойств и большой вес приобретают узколокальные эффекты.

Таблица 22. 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 метров														
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
Гранулометрический 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 метров														
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
Гранулометрический 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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что ключевые для ландшафтоведения вопросы о тесноте межкомпонентных связей и о дискретности-континуальности ландшафтных единиц – это вопросы о масштабе исследования. Свойства компонентов ландшафта несут отпечаток действия процессов (в том числе палео-процессов), проявляющихся в характерных пространствах более крупных пространственных единиц. Ландшафтная единица разными своими свойствами участвует одновременно в полимасштабной системе межкомпонентных отношений и подчиняется вмещающим геосистемам разных уровней. Эти вмещающие геосистемы необязательно укладываются в систему традиционных морфологических единиц ландшафта, выделяемых в геолого-геоморфологических границах, но могут содержать существенную информацию о постепенных или контрастных сменах ландшафтно-геохимического фона, отражающихся на свойствах почвенно-растительного покрова. Постепенное изменение в пространстве свойств вмещающих геосистем вносит вклад (необязательно решающий) в континуальное изменение свойств конкретных природных комплексов низкого ранга. 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 как неотъемлемых элементов вмещающей геосистемы.

Межкомпонентные связи в ландшафте должны характеризоваться не только традиционными разнообразными коэффициентами корреляции между парами свойств, но и математическим видом зависимости между парами или группами свойств. Построение уравнений «регрессии поверхности отклика» для межкомпонентных связей позволило выявить совокупные эффекты одновременного воздействия нескольких экологических факторов на свойства почв и фитоценозов. Вид зависимостей может варьировать в пространстве, что часто создает ложное впечатление об их отсутствии, если расчет ведется для территории с высоким ландшафтным разнообразием. Предложенные в данной работе методы позволяют распознать частично пересекающиеся в пространстве ареалы проявления зависимостей разного вида. 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 отношений конкретного типа. Проведенное исследование свидетельствует о частой смене типов отношений в пространстве. Однако, «размывание» связей с ростом ландшафтного разнообразия (обычно – с

ростом территориального охвата) может означать не только частую смену типов отношений 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. Предлагаемые в данной работе методы позволяют не только оценить размеры вышестоящего уровня геосистем формализованными количественными методами, но и распознать специфические свойства природных комплексов, которые возникают как следствие хронологических отношений 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. В качестве способа визуального отображения подобных континуальных пространственных изменений предложено вероятностное картографирование межкомпонентных связей. Построение серии вероятностных карт принадлежности к каждому из классов морфолитогенной 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 компонентной 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 вида межкомпонентных зависимостей, сходства структуры.

В-четвертых, выявляются ареалы с неполной взаимной адаптацией компонентов, где наиболее вероятны смещения границ ПТК, их слияние (конвергенция), разделение (дивергенция). Выбор стратегии природопользования или географический прогноз для таких 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 ПТК и позволяет уточнить родство ПТК по признаку сходства функционирования при структурных отличиях.

Расчет меры неопределенности классификационной принадлежности предложен как инструмент оценки меры равновесности вертикальной структуры ландшафта на конкретном его

участке. Близкие значения вероятности для геосистем нескольких типов могут индцировать относительно высокую приспособляемость к внешним изменениям, 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 обоснованных А.Ю. Ретеюмом (1988) как альтернативы 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 пространственное варьирование в основном определяется саморазвитием (Бобровский, 2010; Смирнова, 2011). Наши результаты показывают, что обе позиции неоправданно категоричны. 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.

В работе продемонстрирован опыт сравнения комбинированных эффектов, которые создают, с одной стороны, группы компонентов и, с другой стороны, совокупности вышестоящих геосистем. Проверка гипотезы о вкладе комбинированных эффектов в пространственное варьирование свойств ландшафта, показала следующее. Эффекты одновременного действия рамочных условий разноранговых вмещающих геосистем для большинства свойств ландшафта могут перекрывать по значимости рамочные условия вмещающих геосистем по отдельности. 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 неаддитивным эффектам. Основные различия в тесноте и соотношении внутриуровневых и межуровневых связей и их динамики в ходе сукцессий в исследованных среднетаежных, южнотаежных и хвойно-широколиственнолесных ландшафтах, отражающие специфику их структурной организации представлены в таблице 23.

Таблица 23. Различия структурной организации лесных ландшафтов.

Признак	Средняя тайга	Южная тайга	Хвойно-широколиственные леса
Теснота внутрифитоценотических связей	Высокая	Средняя	Высокая
Теснота почвенно-фитоценотических связей	Высокая	Низкая	Средняя
Изменение тесноты внутрифитоценотических связей в ходе сукцессии	Возрастает	Убывает	Возрастает
Изменение тесноты почвенно-фитоценотических связей в ходе сукцессии	Возрастает	Убывает	Убывает
Изменение значимости почвообразующих отложений для фитоценоза в ходе сукцессии	Убывает	Возрастает	Убывает
Индикационная роль трав по отношению к строению почвенного профиля	Высокая	Высокая	Средняя
Индикационная роль мхов по отношению к строению почвенного профиля	Высокая	Низкая	Низкая
Индикационная роль деревьев по отношению к строению почвенного профиля	Низкая	Низкая	Высокая
Значимость комбинированных эффектов вмещающих геосистем нескольких масштабных уровней (многоуровневых связей)	Высокая для фитоценоза	Средняя для почв и древостоя	Низкая
Значимость рамочных условий вмещающей геосистемы одного масштабного уровня (одноуровневых связей)	Высокая для единичных свойств почв и отложений	Высокая для большинства свойств	Высокая для большинства свойств
Значимость комбинированных эффектов взаимодействия компонентов независимых от вмещающих геосистем	Высокая	Высокая	Низкая

Реализованная процедура полимасштабного анализа структуры ландшафта доказала наличие в исследованных объектах всех признаков сложных адаптивных систем (Messier, Puettmann, 2011): 1) представлены множеством составных частей и процессов; 2) части и процессы взаимодействуют друг с другом и со средой во множестве пространственных и временных масштабов; 3) взаимодействия порождают гетерогенные структуры и нелинейные отношения; 4) структуры и отношения не являются ни полностью хаотическими, ни полностью детерминированными; 5) отношения включают механизмы положительных и отрицательных обратных связей, стабилизирующих или дестабилизирующих систему в зависимости от условий; 6) система открыта и обменивается со средой энергией, веществом, информацией; 7) система чувствительна к начальным условиям и последующим нарушениям; 8) система содержит много взаимоадаптированных компонентов и подсистем, создающих эмерджентные эффекты.

Подытожим основные особенности полимасштабного анализа ландшафтной организации в сравнении с традиционными методами выделения геосистем (таблица 24).

Таблица 24. Отличия методологии полимасштабного анализа от традиционных способов выделения геосистем.

<i>Традиционные методики выделения геосистем в рамках генетико-морфологической концепции</i>	<i>Полимасштабный анализ структуры ландшафта</i>
Масштабные уровни геосистем заданы априори или путем предварительного выявления иерархии ведущего фактора, чаще всего – рельефа.	Масштабные уровни выявляются на основании количественной оценки связей компонентов ландшафта.
Выбор элементов для классификации произволен или на основании сопоставления частных типологий компонентов (определенный масштабный 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 масштабных уровней одинаково для всех компонентов.	Признается возможность разного количества масштабных уровней организации для компонентов ландшафта. Необходимое количество уровней обосновывается исходя из тесноты связей с другими компонентами.

<i>Традиционные методики выделения геосистем в рамках генетико-морфологической концепции</i>	<i>Полимасштабный анализ структуры ландшафта</i>
<p>Линии перегиба рельефа считаются приоритетными границами целостных ПТК. Границы относительно однозначны в ландшафтах, генезис которых способствует формированию четких геолого-геоморфологических границ.</p>	<p>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 масштабным уровнем организации ландшафта.</p>
<p>При выделении геосистемы в основном принимаются во внимание ее внутренние свойства.</p>	<p>При выделении геосистемы принимаются во внимание не только ее внутренние свойства, но и характер связи с вышестоящей по рангу геосистемой и хронологические отношения с одноранговыми соседними геосистемами.</p>
<p>На всех масштабных уровнях критерием выделения является однородность (монотонность) по ведущему информативному для данного уровня признаку.</p>	<p>Единство типа межкомпонентных отношений может использоваться как критерий выделения геосистем внутренне мозаичных, но связанных единым фактором дифференциации. Такие геосистемы могут быть сопоставлены с определенным масштабным уровнем организации рельефа, характеристики которого в некоторой окрестности детерминируют варьирование состояний компонентов ландшафта.</p>

ВЫВОДЫ

1. Совокупный вклад контролируемых рельефом процессов и явлений разных масштабных уровней в пространственное варьирование свойств компонентов ландшафта может составлять от 20 до 60% дисперсии. От 15 до 50% дисперсии может объясняться локальными внутрифитоценоотическими и почвенно-фитоценоотическими взаимодействиями в ходе саморазвития компонентной структуры. Количественная оценка вкладов разномасштабных эффектов позволяет повысить корректность ландшафтного картографирования на основе информации о межкомпонентных связях.

2. Наиболее универсальные плеяды свойств в ландшафтах лесной зоны состоят из взаимосвязанных свойств кустарникового и травяного ярусов, древесного и травяного ярусов. Наилучшие фитоценоотические индикаторы строения почв различаются по регионам: в заболоченной средней тайге Западной Сибири – виды мохового яруса, в средней тайге Архангельской области и в южной тайге – виды трав и кустарничков, в хвойно-широколиственных лесах – виды деревьев и кустарников.

3. Сопряженность свойств компонентов зависит от масштабного уровня организации: на уровне ландшафта теснота связей снижается по сравнению с уровнем местности и, особенно, – урочища. Уменьшение тесноты связей с ростом ландшафтного разнообразия и территориального охвата обычно означает смену математических видов зависимости в пространстве.

4. Совокупные эффекты воздействия групп компонентов могут превышать по значимости эффекты парных взаимодействий. Внутрифитоценоотические связи обычно более сильны, чем почвенно-фитоценоотические и чем связи фитоценоза с рельефом вмещающих геосистем.

5. В ходе восстановительной сукцессии свойства почв и фитоценозов находятся под приоритетным контролем процессов одного и того же масштабного уровня вмещающих геосистем, что должно включаться в понятие «инвариант ландшафта». Теснота почвенно-фитоценоотических и внутрифитоценоотических связей в ходе сукцессии изменяется. Внутрифитоценоотическая межъярусная сопряженность в ходе восстановительной сукцессии возрастает, особенно среди нижних ярусов фитоценоза.

6. В средней тайге с приближением к стадии старовозрастных лесов взаимоадаптированность почв и фитоценоза возрастает, а зависимость фитоценоза от гранулометрического 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 роста согласованности с

динамичными цветовыми характеристиками почв. Хвойно-широколиственные фитоценозы на ранних стадиях развиваются сопряженно со свойствами почв, но при приближении к старовозрастной стадии усиливают независимость от внешней среды.

7. Методология полимасштабного анализа структуры ландшафта позволяет различать дискретные и континуальные границы составляющих его геосистем и определять ширину переходных полос с неравновесными отношениями компонентов. Параллельное применение статистических моделей с разными размерами операционных территориальных единиц позволяет выявить участки, где высокая неопределенность классификационной принадлежности для высокого масштабного уровня объясняется эффектами низкого уровня. В таежном и степном ландшафтах от четверти до половины дисперсии свойств, не описываемой моделью ландшафтного уровня, объясняются узколокальными взаимодействиями пространственных единиц фациального уровня.

8. Полиструктурная и полимасштабная организация ландшафта порождает специфические геосистемы с континуальными границами, которые заданы совокупным эффектом разномасштабных хронологических взаимодействий и сосуществуют с природно-территориальными комплексами с явными геолого-геоморфологическими границами.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

МЛО: морфолитогенная основа

НКП: неопределенность классификационной принадлежности

ОТЕ: операционная территориальная единица

ПРП: почвенно-растительный покров

ПТК: природно-территориальный комплекс

СПИСОК ТЕРМИНОВ

геосистема: Территория с единым типом межкомпонентных связей и единым способом зависимости от геосистемы вышестоящего ранга, что индицирует наличие системообразующего процесса или явления.

компоненты ландшафта: Составные части ландшафта, представленная фрагментами отдельных сфер географической оболочки: горные породы, воздух, воды, почвы, растительность, животный мир (Охрана ландшафтов, 1982).

ландшафтная структура: Совокупность взаимодействующих компонентов (вертикальная, или компонентная структура, обусловленная топологическими отношениями) и

пространственных элементов (горизонтальная, или пространственная структура, обусловленная хорологическими отношениями).

ландшафтный покров: Совокупность пространственных элементов ландшафта, визуально легко различимых по космическому снимку как мозаика типов растительности и/или хозяйственных угодий, двухмерный образ ландшафта

масштабный уровень геосистемы: Размер пространства, в котором набор и взаиморасположение пространственных элементов контролируют современный процесс или индицируют палеопроцесс, сила которого варьирует в пространстве и задает правило дифференциации значений свойств ландшафтных компонентов. Любое изменение набора и взаиморасположения пространственных элементов приводит к изменению свойств элемента геосистемы, расположенного в ее центре.

морфолитогенная основа (МЛО): Рельеф и горные почвообразующие породы как группа компонентов ландшафта.

неопределенность классификационной принадлежности (НКП): Количественная мера степени однозначности отношений между группами свойств компонентов (например, между морфолитогенной основой и почвенно-растительным покровом). Определяется по формуле Шеннона на основе значений вероятности соответствия свойств одного компонента типичным значениям для каждого класса другого компонента. Рассчитывается методом дискриминантного анализа.

организация: Упорядоченность элементов, связей и отношений в системе, специфические для системы взаимоотношения между ее частями, подсистемами, уровнями, а также степень их вклада в общее функционирование системы (по В.Н. Садовскому, 1974).

ось: Количественное выражение силы проявления одного из взаимонезависимых экологических факторов дифференциации ландшафта, полученное методом многомерного шкалирования (*Axis*). Координата описанной в поле фации на оси отражает соотношение конкурирующих признаков в соответствии с силой проявления фактора.

операционная территориальная единица (ОТЕ): Наименьшая по площади единица, на которую распространяются результаты полевых измерений свойств компонентов ландшафта, соответствующая (в данной работе) размеру пиксела цифровой модели рельефа и/или космического снимка.

парагенетическая геохора: Участок ландшафта, для которого выявлен единый тип отношений между свойствами компонентов ландшафта, подтверждаемый высоким достоверным значением коэффициента детерминации мультирегрессионного уравнения и описываемый параметрами уравнения (знаками и величинами достоверных регрессионных

коэффициентов). Единый тип отношений индицирует наличие единого системообразующего фактора, в соответствии с силой которого варьируют свойства.

парциальная геосистема: Территория, в пределах которой значения каждого свойства в плеяде относительно монотонны и соответствуют силе действия системообразующего фактора на данной территории. Парциальные геосистемы объединяются в парагенетическую геохору.

плеяда ландшафтная: Группа свойств ландшафта, объединяемая статистически достоверными связями, выявленными для геосистемы определенного ранга и отражающими сопряженное пространственное варьирование их значение под действием единого основного фактора.

полимасштабная организация географического ландшафта: Одновременное подчинение свойств компонентов разномасштабным процессам и явлениям в геосистемах разных типов.

пространственные элементы ландшафта: Части ландшафта, составляющие его пространственную структуру, безотносительно их иерархического ранга.

природно-территориальный комплекс (ПТК): Конкретная геосистема с известными границами и известным положением с иерархии морфологических единиц географического ландшафта в региональном понимании (по Н.А. Солнцеву, 1948).

свойство компонента ландшафта: Чувствительность группы признаков компонента ландшафта к экологическому фактору; количественно характеризуется координатами на оси дифференциации.

связи внутриуровневые: Отношения между компонентами ландшафта, подтверждаемые статистически значимыми корреляциями на некоторой территории, объединяемой в геосистему какого либо масштабного уровня.

связи межкомпонентные: Совокупность закономерных комбинаций свойств компонентов ландшафта на определенной территории, подтверждаемая статистически значимой корреляцией и, как правило, отражающая наличие непосредственного вещественно-энергетического обмена между компонентами.

связи межуровневые: Совокупность закономерных комбинаций какого-либо свойства компонента ландшафта и свойства геосистемы вышестоящего ранга, подтверждаемая статистически значимой корреляцией и отражающая отношения субординации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абишев М.Н. Информационно-картографический подход к анализу связей природных явлений (на примере гидротермических показателей растительности и почв равнинного Казахстана) // Вопросы географии. Сб. 98. М.: Мысль, 1975. С. 131–146.
2. Абрамова Т.А. Трансформации растительного покрова и ландшафтов юга Архангельской области в среднем и позднем голоцене (по палинологическим данным // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 2002. № 1. С. 70–75.
3. Авессаломова И.А. Биогеохимическая специализация растений в среднетаежных ландшафтах юга Архангельской области // Растительный покров Севера в условиях интенсивного природопользования. Архангельск, 1997. С.73–77.
4. Авессаломова И.А., Петрушина М.Н., Хорошев А.В. Горные ландшафты: структура и динамика. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002. 158 с.
5. Авессаломова И.А. Внутренняя ландшафтно-геохимическая структура болот и факторы ее формирования (на примере юга Архангельской области) // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 2003. № 1. С. 59–67.
6. Авессаломова И.А., Савенко А.В., Хорошев А.В. Ландшафтно-геохимическая контрастность речных бассейнов как фактор формирования ионного стока // Вестн. Моск. ун-та, сер. Геогр. 2013. № 4. С. 3–10.
7. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика. Основы эконометрики. Т. 1. Теория вероятностей и прикладная статистика. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. 656 с.
8. Айвазян С.А. Прикладная статистика. Основы эконометрики. Т. 1. Основы эконометрики. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. 432 с.
9. 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. Морфологическая структура географического ландшафта. М.: Изд-во МГУ, 1963. 55 с.
10. Апарин Б.Ф. Географические основы рационального использования почв (на двучленных породах). СПб.: Наука, 1992. 188 с.
11. Арманд А.Д. Информационные модели природных комплексов. М.: Наука, 1975. 128 с.
12. Арманд А.Д. Теория поля и проблема выделения геосистем // Вопросы географии. Сб. 98. Количественные методы изучения природы. М.: Мысль, 1975. С.92-106.
13. Арманд А.Д. Самоорганизация и саморегулирование географических систем. М.: Наука, 1988. 264 с.

14. Арманд А.Д. Необратимые изменения ландшафтов // Ландшафтоведение: теория, методы, региональные исследования, практика. Матер. XI Межд. ландшафтн. конф. М.: Геогр. ф-т МГУ, 2006. С. 31–33.
15. Арманд А.Д. Два в одном. Закон дополнительности. М.: Издательство ЛКИ, 2008. 360 с.
16. Арманд А.Д., Таргульян В.О. Принцип дополнительности и характерное время в географии // Системный подход в географии. М., 1972. С. 18–23.
17. Арманд А.Д., Куприянова Т.П. Типы природных систем и физико-географическое районирование // Известия АН СССР, сер. географическая. 1976. № 5. С. 26-38.
18. Арманд А.Д., Ведюшкин М.А. Триггерные геосистемы. Препринт. М., 1989. 51 с.
19. Арманд Д.Л. 1975. Наука о ландшафте. М.: Мысль. 288 с.
20. Ахметели А.М., Беручашвили Н.Л. Составление карт охраны, рационального использования и планирования ландшафтов горных территорий // Изв. Всес. геогр. о-ва. Т. 122. 1990. Вып. 4. С. 301–314.
21. Балаш В.А., Балаш О.С., Харламов А.В. Эконометрический анализ геокошированных данных о ценах на жилую недвижимость // Прикладная эконометрика. 2011. № 2(22). С. 62-77.
22. Безделова А.П. Распределение неморальных видов во вторичных лесах средней тайги Архангельской области // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 2008. № 3. С. 73–79.
23. Беляков А.И. Ритмы функционирования локальных геосистем среднетаёжного ледникового ландшафта // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 2004. № 1. С. 53–58.
24. Беручашвили Н.Л. 1989. Этология ландшафта и картографирование состояний природной среды. Тбилиси: Изд-во Тбилисск. ун-та. 198 с.
25. Беручашвили Н.Л. Геофизика ландшафта. М.: Высшая школа, 1990. 287 с.
26. Беручашвили Н.Л. Исаченко Г.А., Чистяков К.В. Ландшафт как реальность и объект профессионального исследования // Изв. Всес. геогр. о-ва. Т. 121. 1989. Вып. 3. С. 215–219.
27. Битюков Н.А. Экология горных лесов Причерноморья. Сочи: НИИ горлесэкол, 2007. 397 с.
28. Блауберг И.В. Целостность и системность // Системные исследования. Ежегодник. 1977. М.: Наука, 1977. С. 5-28.
29. Бобра Т.В. Ландшафтные границы: выявление, анализ, картографирование. Симферополь: Таврия-Плюс, 2005. 168 с.
30. Бобра Т.В. Новые объекты ландшафтных исследований // Геополитика и экогеодинамика регионов. Т. 5. 2009. Вып. 1. С. 20–32.

31. Бобровский М.В. Лесные почвы Европейской России: биотические и антропогенные факторы формирования. М.: Т-во науч. изданий КМК, 2010. 359 с.
32. Богучарсков В.Т. История географии. М.: Академич. Проект, 2006. 560 с.
33. Боков В.А. Пространственно-временные основы геосистемных взаимодействий. Дисс. докт. геогр. наук. М., 1990. 406 с.
34. Боков В.А. Пространственно-временные отношения как фактор формирования свойств геосистем // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 1992. № 2. С. 10–16.
35. Боков В.А. Реальны ли ландшафты? // Уч. зап. Таврич. нац. ун-та им. В.И. Вернадского. Сер. География. Т. 25 (64). 2012. № 2. С. 3–8.
36. Бутаков Г.П., Вахрушев В.П., Лебедев В.М. О тектонической предрасположенности рельефа Удмуртии // Вопросы геоморфологии Поволжья. Вып. 1(4). Саратов: Изд-во Саратовск. ун-та, 1977. С. 71–76.
37. Величко А.А., Тимирева С.Н., Кременецкий К.В., МакДональд Г., Смит Л. Западно-Сибирская равнина в облике позднеледниковой пустыни // Изв. РАН. Серия геогр. 2007. № 4. С.16–27.
38. Видина А.А. Методические указания по полевым крупномасштабным ландшафтными исследованиям. М.: МГУ, 1962. 120 с.
39. Викторов А.С. Рисунок ландшафта. М.: Мысль, 1986. 179 с.
40. Викторов А.С. Математическая морфология ландшафта. М.: ТРАТЕК, 1998. 180 с.
41. Викторов А.С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006. 252 с.
42. Викторов А.С. Динамическое равновесие в морфологической структуре ландшафтов // Вопросы географии. Сб. 138. М.: Кодекс, 2014. С. 123-137.
43. Викторов С.В., Ремезова Г.Л. Индикационная геоботаника. М.: Изд-во МГУ, 1988. 168 с.
44. Виноградов Б.В. Основы ландшафтной экологии. М.: ГЕОС, 1998. 418 с.
45. Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность. М.: Наука, 2004. Т.1, 479 с.; Т.2, 575 с.
46. Гагаева З.Ш., Пузаченко Ю.Г., Алещенко Г.М. Классификация форм рельефа горной территории для составления мелкомасштабной ландшафтной карты // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 2003. № 1. С. 26–35.
47. Гагарина Э.И. Литологический фактор почвообразования. Дис. докт. биол. н. СПб, 1994. 661 с.
48. Гвоздецкий Н.А. 1979. Основные проблемы физической географии. М.: Высшая школа. 222 с.

49. Геннадиев А.Н. Почвы и время: модели развития. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. 232 с.
50. Географические исследования Сибири. Т.1. Структура и динамика геосистем. Отв. ред. Ю.М. Семенов, А.В. Белов. Новосибирск: Гео, 2007. 413 с.
51. Геодакян В.А. Организация систем - живых и неживых // Системные исследования. М.: Наука, 1970. С. 49-62.
52. Геосистемы контакта тайги и степи: юг Центральной Сибири. Отв. ред. А.А. Крауклис. Новосибирск: Наука, 1991.. 217 с.
53. Геттнер А. География, ее история, сущность и методы. Л., М.: Госиздат, 1930. 416 с.
54. Глазовская М. А. Геохимические основы типологии и методики исследования природных ландшафтов. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1964. 230 с.
55. Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. М.: Высшая школа, 1988. 328 с.
56. Глазовская М.А., Пиковский Ю.И. Комплексный эксперимент по изучению факторов самоочищения и рекультивации загрязненных нефтью почв в различных природных зонах // Миграция загрязняющих веществ в почвах и сопредельных средах. Тр.Ш Всесоюзн. совещ. Л: 1985. С. 195-198.
57. Глущенко И.В., Лычак А.И. Опыт геоинформационного моделирования ландшафтно-геофизических условий в Горном Крыму // Уч. зап. Таврич. нац. ун-та им. В.И. Вернадского. Т. 18 (57). 2005. № 1. С. 16–24.
58. Голованов А.И., Кожанов Е.С., Сухарев Ю.И. Ландшафтоведение. М.: КолосС, 2006. 216 с.
59. Голубчик М.М., Евдокимов С.П., Максимов Г.Н. История географии. Смоленск: Изд-во Смоленск. гуманитарн. ун-та, 1998. 224 с.
60. Горбунова И.А., Гаврилова И.П. Особенности текстурно-подзолистых иллювиально-железистых почв Архангельской учебно-научной станции МГУ // Геохимия ландшафтов и география почв. Смоленск: Ойкумена, 2002. С. 242–268.
61. Горяинова И.Н., Леонова Н.Б., Феодоритов В.М. Процессы зарастания сельскохозяйственных земель в средней тайге Архангельской области // Вестник Моск. ун-та, сер. геогр. 2012. № 3. С. 41–47.
62. Гришанков Г.Е. Введение в физическую географию: предмет и метод. Киев: О-во «Знания», 2001. 249 с.
63. Гродзиньский М.Д. Пізнання ландшафту: місце і простір. Київ: Київський університет, 2005. Т.1, 431 с.; Т.2, 503 с.

64. Гродзинський М.Д. Ландшафтна екологія. Київ: Знання, 2014. 233 с.
65. Гросс В.Л., Булатов В.И. Ландшафтно-картографическое моделирование оптимизации природопользования (опыт предпроектной проработки) // Изв. Всес. геогр. о-ва. Т. 121. 1989. Вып. 4. С. 339–345.
66. Гугалинская Л.А., Алифанов В.М. Палеогидроморфизм почв Русской равнины - развитие концепции // Почвоведение. 1995. № 1. С. 63–72.
67. Данько Л.В., Черкашин Е.А., Кузьмин С.Б. Моделирование рельефа при анализе ландшафтной структуры территории // Моделирование географических систем. Иркутск: Изд-во ин-та географии СО РАН, 2004. С. 94–97.
68. Дедков А.П., Малышева О.Н., Порман С.Р., Рождественский А.Д. Древние поверхности выравнивания и останцовый рельеф Удмуртии // Развитие склонов и выравнивание рельефа. Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 1974. С. 64–76.
69. Дирин Д.А. Этнокультурные ландшафты Алтая: особенности формирования, пространственной организации и развития // Вопросы географии. Сб. 138. М.: Кодекс, 2014. С. 327-345.
70. Дроздов К.А. Крупномасштабные исследования равнинных ландшафтов. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1986. 176 с.
71. Дронин Н.М. Эволюция ландшафтной концепции в русской и советской физической географии, 1999. М.: ГЕОС. 232 с.
72. Дьяконов К.Н. Методологические проблемы изучения физико-географической дифференциации // Вопросы географии. Сб. 98. М.: Мысль, 1975. С. 28–51.
73. Дьяконов К.Н. Физико-географический анализ зон влияния гидротехнических систем (на примерах водохранилищ ГЭС и осушительных мелиорации лесной зоны). Дисс. докт. геогр. н., М. 1984. 502 с.
74. Дьяконов К.Н. Геофизика ландшафта. Биоэнергетика, модели, проблемы. М.: МГУ, 1991. 96 с.
75. Дьяконов К.Н. Взаимодействие структурного, эволюционного и функционального направлений в ландшафтных исследованиях // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 2002. № 1. С. 13–21.
76. Дьяконов К.Н. Базовые концепции и понятия ландшафтоведения // Географические научные школы Московского университета. М.: Городец, 2008. С. 348–386.
77. Дьяконов К.Н., Абрамова Т.А., Авессаломова И.А., Беляков А.И., Пузаченко Ю.Г., Хорошев А.В. Взаимодействие структурного функционального и эволюционного направлений в ландшафтоведении // К.Н. Дьяконов, Э.П. Романова (ред.). География, общество, окружающая

среда. М.: Городец, 2004. Т. 2. Функционирование и современное состояние ландшафтов. С. 213–239.

78. Дьяконов К.Н., Иванов А.Н. Устойчивость и инерционность геосистемы // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 1991. № 1. С. 28–34.

79. Дьяконов К.Н., Пузаченко Ю.Г. Трансектный метод исследования структуры ландшафта // Структура, функционирование, эволюция природных и антропогенных ландшафтов. Тезисы X ландшафтной конференции. М.-СПб., 1997. С. 89–91.

80. Дьяконов К.Н., Пузаченко Ю.Г. Факторы эволюции и строение среднетаежного структурно-эрозионно-ледникового ландшафта // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 2000. № 1. С. 37–44.

81. Дьяконов К.Н., Хорошев А.В. Актуальные проблемы и задачи ландшафтного планирования // Актуальные проблемы ландшафтного планирования. Отв. ред. К.Н. Дьяконов. Матер. Всеросс. науч.-практ. конф. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2011. С. 8–13.

82. Дэвис Дж. С. Статистический анализ данных в геологии. М.: Недра, 1990. Кн. 1. 319 с. Кн. 2. 427 с.

83. Европейская ландшафтная конвенция. 2000.
<http://conventions.coe.int/Treaty/rus/Treaties/Html/176.htm>

84. Емельянова Л.Г., Горяинова И.Н., Мяло Е.Г. Жизнь тайги (экологические экскурсии в Устьянском районе Архангельской области). М.-Архангельск, 1999. 164 с.

85. Емельянова Л.Г., Хорошев А.В., Гаврилова И.П., Мяло Е.Г., Горбунова И.А., Горяинова И.Н., Неронов В.В., Петрасов В.В. Устьянская учебно-научная станция географического факультета МГУ // Учебно-научные географические станции вузов России. Под ред. Г.И. Рычагова, С.И. Антонова. М.: МГУ, 2001. С. 257–283.

86. Еремеева А.П. Пространственные масштабы проявления факторов дифференциации ландшафтов Буртинской степи (Оренбуржье) // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 2012. № 4. С. 48–53.

87. Ерофеев А.А. Ландшафтно-экологический анализ бассейнов малых рек на основе геоинформационного моделирования (на примере малых рек Томска и его окрестностей). Дис. канд. геогр. н. Томск, 2012. 175 с.

88. Забелин И.М. Физическая география в современном естествознании (Вопросы истории и теории). М.: Наука, 1978. 336 с.

89. Залиханов М.Ч., Коломыц Э.Г., Шарая Л.С., Цепкова Н.Л., Сурова Н.А. Высокогорная геоэкология в моделях. М.: Наука, 2010. 487 с.

90. Ивашутина Л.И., Николаев В.А. Контрастность ландшафтной структуры и некоторые аспекты ее изучения // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 1971. № 5. С. 70–77.

91. Исаченко А.Г. Физико-географическое картирование. Ч. 3. Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1961. 268 с.
92. Исаченко А.Г. Представление о геосистеме в современной физической географии // Известия ВГО. 1981. Т. 113. Вып. 4. С. 297-306
93. Исаченко А.Г. Теория и методология географической науки: М.: Академия, 2004. 400 с.
94. Исаченко А.Г. Ландшафтоведение на переходе ко второму столетию своей истории // Ландшафтоведение: теория, методы, региональные исследования, практика. Матер. XI Межд. ландшафтной конф. М.: Геогр. ф-т МГУ, 2006. С. 3–8.
95. Исаченко А.Г., Исаченко Г.А. Ландшафтно-географические предпосылки экологического нормирования // Изв. Русск. геогр. о-ва. Т. 125. 1993. Вып. 1. С. 12–18.
96. Исаченко Г.А. Дискретность и континуальность в теории ландшафтоведения // Структура, функционирование, эволюция природных и антропогенных ландшафтов. Тезисы X ландшафтной конференции. М.-СПб, 1997. С. 23–25.
97. Исаченко Г.А. “Окно в Европу”: история и ландшафты. СПб.: Изд-во СПб. ун-та, 1998. 476 с.
98. Исаченко Г.А. Методы полевых ландшафтных исследований и ландшафтно-экологическое картографирование (курс лекций). СПб.: Изд-во СПб. ун-та, 1999. 111 с.
99. Истомина Е.А. Геоинформационное картографирование ландшафтов Тункинской котловины на основе метода факторально-динамической классификации // Геодезия и картография. 2012. № 4. С.32–39.
100. Калуцков В.Н. Ландшафт в культурной географии. М.: Новый хронограф, 2008. 320 с.
101. Касимов Н.С. Базовые концепции геохимии ландшафтов // Геохимия ландшафтов и географии почв. Смоленск: Ойкумена, 2002. С. 23–40.
102. Квасов Д.Д. Позднечетвертичная история крупных озер и внутренних морей Восточной Европы. Л.: Наука, 1975. 278 с.
103. Керженцев А.С. Функциональная экология. М.: Наука, 2006. 259 с.
104. Кирюшин А.В., Пузаченко Ю.Г., Стульцев Ю.К., Ямашкин А.А. Многомерный факторный анализ содержания микроэлементов в почвах Мордовии // Изв. РАН. Сер. геогр. 1996. № 4. С. 24–45.
105. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
106. Князева Е.Н., Курдюмов С.П. Синергетика: Нелинейность времени и ландшафты коэволюции. М.: КомКнига, 2011. 272 с.

107. Кобелева Н.В., Мадасова А.А., Михеев В.С. Количественный анализ признаков различных природных режимов с целью выявления структуры геосистем // Структура и динамика геосистем. Новосибирск: Наука, 1979. С. 14–35.
108. Ковалев А.П. Ландшафт сам по себе и для нас. Харьков: Бурун Книга, 2009. 928 с.
109. Козлов Д.Н., Пузаченко М.Ю., Федяева М.В., Пузаченко Ю.Г. Отображение пространственного варьирования свойств ландшафтного покрова на основе дистанционной информации и цифровой модели рельефа // Изв. РАН. Сер. геогр. 2008. № 4. С. 112–124.
110. Козлов Д.Н. Цифровой анализ ландшафта в крупномасштабном картографировании структур почвенного покрова. Дис. канд. геогр. н. М., 2009. 138 с.
111. Козловский Ф.И. Почвенный индивидуум и методы его определения // Закономерности пространственного варьирования свойств почв и информационно-статистические методы их изучения. М.: Наука, 1970. С. 42-59.
112. Козловский Ф.И. Современные естественные и антропогенные процессы эволюции почв. М.: Наука, 1991. 196 с.
113. Козловский Ф.И. Пути и перспективы дальнейшего развития концепции структуры почвенного покрова // Почвоведение. 1992. №4. С. 5-14.
114. Колбовский Е.Ю. Ландшафтоведение. М.: Академия, 2006. 480 с.
115. Колбовский Е.Ю. Ландшафтное планирование. М.: Академия, 2008. 336 с.
116. Колбовский Е.Ю. Нерешенные вопросы ландшафтоведения и ландшафтное планирование // Изв. РАН. Сер. геогр. 2013. № 5. С. 19–29.
117. Кологривский лес: экологические исследования. Отв. ред. В.Е. Соколов. М.: Наука, 1986. 125 с.
118. Коломыц Э.Г. Информационно-статистический анализ структуры высокогорных экосистем и ее антропогенных изменений // Тр. ВГИ. Вып. 58. М.: Гидрометеиздат, 1984. С. 26–53.
119. Коломыц Э.Г. Полиморфизм ландшафтно-зональных систем. Пущино: ОНТИ ПИЦ РАН, 1998. 311 с.
120. Коломыц Э.Г. Локальные механизмы глобальных изменений природных геосистем. М.: Наука, 2008. 427 с.
121. Коломыц Э.Г., Шарая Л.С. Влияние глобального потепления на ландшафтную структуру Северного Кавказа // Изв. РАН. Сер. геогр. 2012. № 4. С. 45–61.
122. Коновалова Т.И. Картографическое моделирование изменчивости геосистем // Моделирование географических систем. Иркутск: Изд-во ин-та географии СО РАН, 2004. С. 24–28.

123. Коновалова Т. И. Организация геосистем и ее картографирование // Известия Иркутского гос. ун-та. Серия «Науки о Земле». 2012. Т. 5, № 2. С. 150–162.
124. Копыл И.В., Николаев В.А., Сенкевич Н.Г. Ландшафтно-экологическая экстраполяция лесомелиоративного опыта в прикаспийской полупустыне // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 1990. № 2. С. 53–61.
125. Коренные темнохвойные леса южной тайги. М.: Наука, 1988. 220 с.
126. Кошелева Н.Е. Моделирование биогеохимических циклов тяжелых металлов в агроландшафтах на основе балансового подхода // Геохимия ландшафтов и географии почв. Смоленск: Ойкумена, 2002. С. 389–405.
127. Кошечева А.С., Хорошев А.В. Планирование многофункционального лесопользования на ландшафтной основе // Экологическое планирование и управление. 2008. № 2(7). С. 51-60.
128. Крауклис А.А. Структурно-динамический фациальный анализ южнотаежного ландшафта Нижнего Приангарья // Южная тайга Приангарья. Л.: Наука, 1969. С. 32–119.
129. Крауклис А.А. Некоторые итоги // Природные режимы и топогеосистемы Приангарской тайги. Новосибирск: Наука, 1975. С. 270–278.
130. Крауклис А.А. Проблемы экспериментального ландшафтоведения. Новосибирск: Наука, 1979. 232 с.
131. Крауклис А.А. Геосистемы, их динамика и классификация в современном контексте географии // Классификация геосистем. Матер. к Межд. науч. конф. Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 1997. С. 12–19.
132. Крауклис А.А., Евдокимова В.Н. Опыт количественного описания натурной модели // Природные режимы и топогеосистемы Приангарской тайги. Новосибирск: Наука, 1975. С. 246–269.
133. Кренке А.Н.-мл., Пузаченко М.Ю., Пузаченко Ю.Г. Уточнение содержания тематических карт на основе данных дистанционного зондирования // Изв. РАН, сер. геогр. 2011. № 4. С. 86–96.
134. Куприянова Т.П. Физико-географическое районирование по принципам однородности территорий // Вопросы географии. Сб. 98. М.: Мысль, 1975. С. 114–130.
135. Лазуков Г.И. Этапы плейстоценового осадконакопления в пределах Западно-Сибирской равнины // Природные условия Западной Сибири. Под. ред. А.И. Попова. Вып. 1. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1971. С. 6–24.
136. Ланге О. Целое и развитие в сфере кибернетики // Исследования по общей теории систем. Под ред. В.Н. Садовского, Э.Г. Юдина. М.: Прогресс, 1969. С. 181-251.

137. Ландшафтно-интерпретационное картографирование. Отв. ред. А.К.Черкашин. Новосибирск: Наука, 2005. 424 с.
138. Ландшафтоведение: теория, методы, региональные исследования, практика. Мат-лы XI Международной ландшафтной конференции. М.: Геогр. ф-т МГУ, 2006. 788 с.
139. Ласточкин А.Н. Общая теория геосистем. СПб.: Лемма, 2011. 980 с.
140. Линник В.Г. Ландшафтная дифференциация техногенных радионуклидов: геоинформационные системы и модели. Автореф. дис. докт. геогр. н. М., 2008. 40 с.
141. 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. Болотные геосистемы Западной Сибири и их природоохранное значение. Тула: Гриф и К., 2001. 584 с.
142. Лурье И.К. Геоинформационное картографирование. М.: КДУ, 2008. 424 с.
143. Міллер Г.П., Петлін В.М., Мельник А.В. Ландшафтознавство. Теорія і практика. Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2002. 172 с.
144. Максимов Г.Н. Методологические проблемы физической географии. Якутск: Изд-во ЯГУ, 1988. 148 с.
145. Малиновский А.А. Теория структур и ее место в системном подходе // Системные исследования. М.: Наука, 1970. С. 10-31
146. Малиновский А.А. Основные понятия и определения теории систем (в связи с приложением теории систем в биологии) // Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник. 1979 .М.: Наука, 1980. С. 78-90.
147. Мамай И.И. Динамика ландшафтов. Методика изучения. М.: МГУ, 1992. 167 с.
148. Мамай И.И. О неповторимости состояний природных территориальных комплексов // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 1997. № 1. С. 30–35.
149. Мамай И.И. Системный подход в ландшафтоведении: приобретения и потери // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 1999. № 1. С. 12–17
150. Мамай И.И. Динамика и функционирование ландшафтов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 138 с.
151. Мамай И.И. Отечественное ландшафтоведение: история, современное состояние, направление поиска // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 2008. № 1. С. 3–12.
152. Мамай И.И., Мироненко И.В., Роганов С.Б., Матасов В.М., Глухов А.И., Федин А.В., Лапоница Г.В. Развитие ландшафтов Мещеры за короткие временные отрезки // Ландшафтный сборник (Развитие идей Н.А.Солнцева в современном ландшафтоведении). М.- Смоленск: Ойкумена, 2013. С. 58–87.
153. Мамай И.И., Мироненко И.В., Роганов С.Б., Матасов В.М., Глухов А.И., Федин А.В. Синхронность-асинхронность наступления новых состояний в природных

территориальных комплексах Мещеры // Ландшафтный сборник (Развитие идей Н.А.Солнцева в современном ландшафтоведении). М.-Смоленск: Ойкумена, 2013. С. 88–113.

154. Марцинкевич Г.И. Ландшафтоведение. Минск: БГУ, 2007. 206 с.

155. Мерекалова К.А. Выделение геосистем с единым типом межкомпонентных отношений // Ландшафтное планирование: общие основания, методология, технология. М.: Геогр. ф-т МГУ, 2006. С. 199–203.

156. Мересте У.И., Ныммик С.Я. Современная география: вопросы теории. М.: Мысль, 1984. 296 с.

157. Мильков Ф.Н. Парагенетические ландшафтные комплексы // Науч. зап. Воронежского отд. географического об-ва СССР. 1966. № 4. С. 3-12.

158. Мильков Ф.Н. Физическая география: учение о ландшафте и географическая зональность. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1986. 328 с.

159. Мильков Ф.Н. Общее землеведение. М.: Высшая школа, 1990. 335 с.

160. Михеев В.С. Ландшафтно-географическое обеспечение комплексных проблем Сибири. Новосибирск: Наука, 1987. 205 с.

161. Михеев В.С. Системный подход в географии (теоретический аспект // География и природные ресурсы. 1990. № 4. С. 5-15.

162. Михеев В.С., Мадасова А.А. Некоторые итоги структурно-функционального изучения среднетаежных геосистем // Природные режимы средней тайги Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1977. С. 258–292.

163. Мкртчян О. Принципы автоматизованого ландшафтно-екологічного картування // Уч. зап. Таврич. нац. ун-та им. В.И. Вернадского. Т. 21(60). 2008. № 2. С.238–247.

164. Мяло Е.Г., Горяинова И.Н., Родман Л.С. Роль неморальных видов в структуре среднетаежных лесов (на примере южной части Архангельской области // Экология таежных лесов. Тез. докл. межд. науч. конф. Сыктывкар, 1998. С. 42–43.

165. Нееф Э. Теоретические основы ландшафтоведения. М.: Прогресс, 1974. 220 с.

166. Нейштадт М.И. Возникновение и скорость развития процесса заболачивания. // Научные предпосылки в освоении болот Западной Сибири. М.: Наука, 1977. С. 39–48.

167. Немчинова А.В. Дифференциация лесных фитохор бассейна р. Понга на примере ландшафтов «Кологривского леса». Дисс. канд. биол. наук. Сыктывкар, 2005. 251 с.

168. Нечаева Е.Г., Полюшкин Ю.В., Никитина З.И. Природные взаимосвязи южнотаежных геосистем // Южная тайга Прииртышья (опыт стационарного исследования южнотаежных топогеосистем). Новосибирск: Наука, 1975. С. 225–239.

169. Низовцев В.А. Становление антропогенного ландшафтогенеза лесных областей европейской территории России // Ландшафтный сборник (Развитие идей Н.А.Солнцева в современном ландшафтоведении). М.-Смоленск: Ойкумена, 2013. С. 196–226.

170. Никитина О.А., Горбунова И.А., Леонова Н.Б. Фитоиндикация автоморфных среднетаежных почв Устьянского плато (Архангельская область) // Проблемы региональной экологии. 2016. № 3. С. 41-46.

171. Николаев В.А. Проблемы регионального ландшафтоведения. М.: МГУ, 1979. 160 с.

172. Николаев В.А. Ландшафтное пространство-время (методологические аспекты) // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 1989. № 2. С. 18–25.

173. Николаев В.А. Эстетическое восприятие ландшафта // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 1999. № 6. С. 10–15.

174. Николаев В.А. К теории ландшафтного полигенеза // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 2006. № 6. С. 3–8.

175. Николаев В.А. Ландшафтоведение. М.: МГУ, 2006. 208 с.

176. Николаев В.А. Память ландшафта // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 2013. № 1. С. 17–21.

177. Овчинников Н.Ф. Структура и симметрия // Системные исследования. Ежегодник. 1969. М.: Наука, 1969. С. 111-121.

178. Орлов В.И. Ход развития природы лесоболотной зоны Западной Сибири. Л.: Недра, 1968. 172 с.

179. Охрана ландшафтов. Толковый словарь. Отв. ред. В.С. Преображенский. М.: Прогресс, 1982. 272 с.

180. Пашенко В.М. К развитию теории ландшафтоведения // География и природные ресурсы. 1990. № 2. С. 143–153.

181. Пашенко В.М. Теоретические проблемы ландшафтоведения. Киев: Наукова думка, 1993. 283 с.

182. Перельман А.И. Биологический круговорот атомов - важнейший геохимический параметр природных ландшафтов // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 1991. № 3. С. 3–8.

183. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Издательство МГУ, 1999. 610 с.

184. Пермяков Ф.И. Почвы Удмуртии. Повышение их плодородия. Ижевск: Удмуртия, 1972. 223 с.

185. Петлін В.М. Синергетика ландшафту. Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2005. 205 с.

186. Петрушина М.Н. Структура и динамика горных ландшафтов Северного Кавказа // Ландшафтный сборник (Развитие идей Н.А.Солнцева в современном ландшафтоведении). М.- Смоленск: Ойкумена, 2013. С. 227–248.
187. Письмеров А.В. Лесной резерват «Кологривский лес» // Природа Костромской области и ее охрана. Ярославль: Верхне-Волжское изд-во, 1987. С. 7–11.
188. Преображенский В.С. Беседы о современной физической географии. М.: Наука, 1972. 165 с.
189. Преображенский В.С., Уемов А.И., Швецбс Г.И. Системная концепция в географии // Тез. Докл. III Всесоюзного симпозиума по теоретическим вопросам географии. Киев: Наукова думка, 1977. С. 5-9.
190. Природа Удмуртии. Под ред. А.И. Соловьева. Ижевск: Удмуртия, 1972. 400 с.
191. Природные режимы и топогеосистемы приангарской тайги. Новосибирск: Наука, 1975. 280 с.
192. Прозоров А.А. Структура и геохимическая контрастность среднетаёжных ландшафтов юга Архангельской области (на примере бассейна р.Заячья). Автореф. дис. канд. геогр. н. М., 2003. 23 с.
193. Пузаченко Ю.Г. Пространственно-временная иерархия геосистем с позиции теории колебаний // Вопросы географии. Т. 127. М.: Мысль, 1986. С. 96–111.
194. Пузаченко Ю.Г. Методологические основы географического прогноза и охраны среды. М.: Изд-во УРАО, 1998. 212 с.
195. Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: Академия, 2004. 416 с.
196. Пузаченко Ю.Г. Организация ландшафта // Вопросы географии. Сб. 138. М.: Кодекс, 2014. С.35-64.
197. Пузаченко Ю.Г., Мошкин А.В. Информационно-логический анализ в медико-географических исследованиях // Медицинская география. Вып. 3. М, 1969. С. 5-32.
198. Пузаченко Ю.Г., Скулкин В.С. Структура растительности лесной зоны СССР. М.: Наука, 1981. 275 с.
199. Пузаченко Ю.Г., Борунов А.К., Кошкарев А.В., Скулкин В.С. Географические основы предупреждения и ликвидации последствий природно-техногенных катастроф // Изв. РАН, сер. геогр. 1991. № 6. С. 40–54.
200. Пузаченко Ю.Г., Дьяконов К.Н., Иванов А.Н. Анализ иерархической организации структуры рельефа как основы организации природно-территориального комплекса // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 1997. № 1. С. 3–9.

201. Пузаченко Ю.Г., Дьяконов К.Н., Безделова А.П., Хорошев А.В., Виноградова Т.А. Структура лесной растительности средней тайги (юг Архангельской области) // Экология таежных лесов. Тез. докл. межд. науч. конф. Сыктывкар, 1998. С. 54–55.
202. Пузаченко Ю.Г., Дьяконов К.Н., Алещенко Г.М. Разнообразие ландшафта и методы его измерения // География и мониторинг биоразнообразия. М.: Экоцентр МГУ, 2002. С. 76–177.
203. Пузаченко Ю.Г., Котлов И.П., Сандлерский Р.Б. Анализ изменений ландшафтного покрова по данным мультиспектральной дистанционной информации в Центральном-Лесном заповеднике // Изв. РАН. Сер. геогр. 2014. № 3. С. 5-18.
204. Раман К.Г. Пространственная полиструктурность топологических геокомплексов и опыт её выявления в условиях Латвийской ССР. Рига: ЛГУ им. Петра Стучки, 1972. 48 с.
205. Раменский Л.Г. Введение в комплексное почвенно-геоботаническое исследование земель. М.: Сельхозгиз, 1938. 620 с.
206. Ретеюм А.Ю. О геокомплексах с односторонним потоком вещества и энергии // Известия АН СССР, серия географическая, 1971. № 5. С. 122-128.
207. Ретеюм А.Ю. Физико-географические исследования и системный подход // Системные исследования. Ежегодник. 1972. М.: Наука, 1972. С. 90-110.
208. Ретеюм А.Ю. Физико-географическое районирование и выделение геосистем // Вопросы географии. Сб. 98. М.: Мысль, 1975. С. 5-27.
209. Ретеюм А.Ю. О факторах и формах упорядоченности пространства оболочки Земли // Вопросы географии. Сб. 104. М.: Мысль, 1977. С. 84-95.
210. Ретеюм А.Ю. Контур теории геосистем // Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник. 1991. М.: Наука, 1991. С. 53-70.
211. Ретеюм А.Ю. Земные миры. М.: Мысль, 1988. 266 с.
212. Ретеюм А.Ю. Исследовательские установки ландшафтоведения // Ландшафтоведение: теория, методы, региональные исследования, практика. Матер. XI Межд. ландшафтной конф. М.: Геогр. ф-т МГУ, 2006. С. 46–49.
213. Рысин И.И. О современном тренде овражной эрозии в Удмуртии // Геоморфология. 1998. № 3. С. 92–101
214. Рысин И.И., Петухова Л.Н. Русловые процессы на реках Удмуртии. Ижевск: Научная книга, 2006. 176 с.
215. Савельев А.А. Моделирование пространственной структуры растительного покрова (геоинформационный подход). Казань: Казанский государственный университет, 2004. 244 с.

216. Садовский В.Н. Парадоксы системного мышления // Системные исследования. Ежегодник. 1972. М.: Наука, 1972. С.133-146.
217. Садовский В.Н. Основания общей теории систем. М.: Наука, 1974. 279 с.
218. Сандлерский Р.Б. Термодинамические характеристики южно-таежных биогеоценозов на основе дистанционной информации (юг Валдайской возвышенности, Центрально-Лесной заповедник). Автореф. дис. канд. биол н. М., 2013. 26 с.
219. Сандлерский Р.Б., Пузаченко Ю.Г. Энергетические характеристики геосистем Центрально-лесного заповедника по данным дистанционного зондирования // Тр. Центрально-лесного заповедника. Великие Луки, 2007. Вып. 5. С. 429–441.
220. Сандлерский Р.Б., Пузаченко Ю.Г. Термодинамика ландшафта на основе данных дистанционного зондирования // Вопросы географии. Сб. 138. М.: Кодекс, 2014. С. 185-214.
221. Смирнова О.В. Теоретические основы единой стратегии охраны природы и природопользования. Курс лекций в НП "Прозрачный мир". М., 2011.. <http://www.transparentworld.ru/ru/education/lect-smirnova/>
222. Снакин В.В., Присяжная А.А., Рухович О.В. Состав жидкой фазы почв. М.: РЭФИА, 1997. 325 с.
223. Солнцев В.Н. О трудностях внедрения системного подхода в географию // Вопросы географии. № 104. М.: Мысль, 1977. С. 20–36.
224. Солнцев В.Н. Системная организация ландшафтов. М.: Наука, 1981. 239 с.
225. Солнцев В.Н. Структурное ландшафтоведение: основы концепции // Структура, функционирование, эволюция природных и антропогенных ландшафтов. Тез. X ландшафтн. конф. М.-СПб, 1997. С. 11–14.
226. Солнцев В.Н. О гравитационной парадигме ландшафтоведения // Ландшафтный сборник (Развитие идей Н.А. Солнцева в современном ландшафтоведении). М.-Смоленск: Ойкумена, 2013. С. 155–169.
227. Солнцев В.Н., Рыжков О.В., Трегубов О.В., Алексеев Б.А., Калуцкова Н.Н., Анцифорова А.А. Использование GPS и ГИС технологий для изучения природных комплексов особо охраняемых природных территорий (на примере ландшафтной структуры Воронежского Биосферного заповедника). Тула: Гриф и Ко, 2006. 216 с.
228. Солнцев Н.А. Природный ландшафт и некоторые его общие закономерности // Тр. II Всес. геогр. съезда. М.: Географгиз, 1948. Т. 1. С. 258–269.
229. Солнцева Н.П. Геохимическая устойчивость природных систем к техногенезу (Принципы и методы изучения. Критерии прогноза) // Добыча полезных ископаемых и геохимия природных экосистем. М., 1982. С. 181–217.

230. Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 376 с.
231. Соловьева В.В. Что такое экотон? // Самарский научный вестник. 2014. № 2(7).С. 116-119.
232. Солодянкина С.В., Черкашин А.К. Естественная классификация геосистем: предопределенность структуры ландшафтных выделов их классификационной позицией // Моделирование географических систем. Иркутск: Изд-во ин-та географии СО РАН, 2004. С. 43–46.
233. Сочава В.Б. Определение некоторых понятий и терминов физической географии // Докл. Ин-та геогр. Сибири и Дальнего Востока. 1963, № 3. С. 50-59.
234. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 320 с.
235. Степанов И.Н. Пространство и время в науке о почвах: Недокучаевское почвоведение. М.: Наука, 2003. 184 с.
236. Степной заповедник «Оренбургский»: физико-географическая и экологическая характеристика. Екатеринбург: УрО РАН, 1996. 167 с.
237. Структура и динамика экосистем южнотаежного Заволжья. Отв. ред. Е.Е. Сыроечковский. М., 1989. 190 с.
238. Структура, функционирование, эволюция природных и антропогенных ландшафтов. Тез. X ландшафтн. конф. М.-СПб.: РГО, 1997. 282 с.
239. Сысуев В.В. Моделирование процессов в ландшафтно-геохимических системах. М: Наука, 1986. 304 с.
240. Сысуев В.В. Структурообразующие геосистемные процессы: характерные масштабы и моделирование // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 2002. № 1. С. 22–28.
241. Сысуев В.В. Морфометрический анализ геофизической дифференциации ландшафтов // Изв. РАН. Серия геогр. 2003. № 4. С. 36–50.
242. Сысуев В.В. Физико-математические основы ландшафтоведения. М.: Геогр. ф-т МГУ, 2003. 175 с.
243. Сысуев В.В. Основные концепции физико-математической теории геосистем // Вопросы географии. Сб. 138. М.: Кодекс, 2014. С. 65-100.
244. Тахтаджян А.Л. Тектология: история и проблемы // Системные исследования. Ежегодник. 1971. М.: Наука, 1971. С. 200-277.
245. Тимофеев Д.А. От Дэвиса до наших дней: чему учит история геоморфологии // Геоморфология. 2002. № 2. С. 3–9.
246. Тишков А.А. «Характерное пространство» и «характерное время» в географии // Известия РАН, сер. географическая. 2016. № 4. С. 20-33.

247. Тонконогов В.Д. Автоморфное почвообразование в тундровой и таежной зонах Восточно-Европейской и Западно-Сибирской равнин. М: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2010. 304 с.
248. Топология степных геосистем. Л.: Наука, 1970. 174 с.
249. Топчиев А.Г. Пространственная организация географических комплексов и систем. Киев-Одесса: Выща школа, 1988. 187 с.
250. Углов В.А. Опыт формализации некоторых действий районирования на основе многомерного статистического анализа. Автореф. дис. канд. геогр. н. М., 1971. 22 с.
251. Флора и фауна средней тайги Архангельской области (междуречье Устья 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.
252. Фридланд В.М. Об уровнях организации почвенного покрова и системе закономерностей географии почв // Вопросы географии. Сб. 104. М.: Мысль, 1977. С. 139-152.
253. Фролова М.Ю. Оценка эстетических достоинств природных ландшафтов // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 1994. № 2. С. 27–33.
254. Харвей Д. Научное объяснение в географии. М.: Прогресс, 1974. 502 с.
255. Хомич В.С., Какарека С.В., Кухарчик Т.И. Экогеохимия городских ландшафтов Беларуси. Минск: Минсктиппроект, 2004. 260 с.
256. Хорошев А.В. Оценка устойчивости ландшафтов бассейна р. Баксан // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 1995. №1. С. 81–87.
257. Хорошев А.В. Факторы дифференциации микроэлементов в почвах Центрального Кавказа // Изв. РАН. Сер. геогр. 2001. № 6. С. 77–82.
258. Хорошев А.В. Межкомпонентные отношения в среднетаёжном ландшафте // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 2002. № 1. С. 62–69.
259. Хорошев А.В. Пространственная структура ландшафта как функция блокового строения территории // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 2003. №1. С. 9–15.
260. Хорошев А.В. Факторы саморазвития пространственной структуры таёжного ландшафта // География и природные ресурсы. 2004. № 4. С. 5–12.
261. Хорошев А.В. Ландшафтная структура бассейна р.Заячья (Важско-Северодвинское междуречье, Архангельская область. М., 2005. Деп. ВИНТИ 27.09.2005 № 1253-В2005. 158 с.
262. Хорошев А.В. Геостационарные и геодинамические структуры в среднетаёжном ландшафте // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 2005. № 3. С. 23–28.
263. Хорошев А.В. Ландшафтная структура Костромской области // Изв. Русск. геогр. о-ва. Т. 139. 2007. Вып. 5. С. 58–65.

264. Хорошев А.В. Рельеф как фактор полимасштабной организации межкомпонентных связей в лесных ландшафтах Восточно-Европейской равнины // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 2010. № 3. С. 35–42.

265. Хорошев А.В. Пространственная дифференциация режимов природопользования в ландшафтах Куршской косы // Актуальные проблемы ландшафтного планирования: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2011. С. 226–230.

266. Хорошев А.В. О способе выделения парциальных геосистем на основе анализа межкомпонентных связей в ландшафте // Изв. Русск. геогр. о-ва. Т. 144. 2012. Вып. 2. С. 19–28.

267. Хорошев А.В. Географическая концепция ландшафтного планирования // Изв. РАН. Сер. геогр. 2012. № 4. С. 103–112.

268. Хорошев А.В. Проблемы изучения полиструктурности ландшафта // Ландшафтный сборник (Развитие идей Н.А. Солнцева в современном ландшафтоведении). И.И. Мамай (ред.). М.-Смоленск: Ойкумена, 2013. С. 170–195.

269. Хорошев А.В. К дискуссии о неоландшафтоведении: детерминированность, полимасштабность, полиструктурность // Изв. Русск. геогр. о-ва. Т. 146. 2014. Вып. 4. С. 58–69.

270. Хорошев А.В. Полимасштабность структуры географического ландшафта // Вопросы географии. Сб. 138. М.: Кодекс, 2014. С. 101–122.

271. Хорошев А.В. Современные направления структурного ландшафтоведения // Известия РАН. Серия географическая. 2016. № 3. С. 7–15.

272. Хорошев А.В. Полимасштабная организация географического ландшафта. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. 416 с.

273. Хорошев А.В., Алещенко Г.М. 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, 2005. С. 42–46.

274. Хорошев А.В., Алещенко Г.М. Характерное пространство межкомпонентных отношений в ландшафте // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 2007. № 1. С. 22–28.

275. Хорошев А.В., Алещенко Г.М. Методы выделения геосистем с единством межкомпонентных отношений // География и природные ресурсы. 2008. № 3. С. 120–126

276. Хорошев А.В., Алещенко Г.М. Иерархическая организация межкомпонентных связей в ландшафте // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 2012. № 3. С. 25–32.

277. Хорошев А.В., Артемова О.А., Матасов В.М., Кощеева А.С. Иерархические уровни взаимосвязей между рельефом, почвами и растительностью в среднетаежном ландшафте // Вестн. Моск. ун-та, сер. геогр. 2008. № 1. С. 66–72.

278. Хорошев А.В., Еремеева А.П., Мерекалова К.А. Оценка межкомпонентных связей в степном и таежном ландшафтах с учетом изменяемой пространственной единицы // Изв. Русск. геогр. о-ва. Т. 145. 2013. Вып. 3. С. 32–42.

279. Хорошев А.В., Немчинова А.В., Авданин В.О. Ландшафты и экологическая сеть Костромской области. Ландшафтно-географические основы проектирования экологической сети Костромской области. Кострома: Изд-во КГУ им. Н.А. Некрасова. 2013. 428 с.

280. Хорошев А.В., Леонова Г.М. Реакции при изменении увлажнения в ландшафте Айтуарской степи (Южный Урал) // Вестник Московского университета, серия 5 география. 2015. № 4. С. 95-103.

281. Хорошев А.В., Мерекалова К.А., Алещенко Г.М. Полимасштабная организация межкомпонентных отношений в ландшафте // Изв. РАН. Сер. геогр. 2010. № 1. С. 26–36.

282. Хорошев А.В., Прозоров А.А., Котлов И.П., Бочкарев Ю.Н., Столповский А.П. 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, 2002. С. 197–198.

283. Хорошев А.В., Пузаченко Ю.Г., Дьяконов К.Н. Современное состояние ландшафтной экологии // Изв. РАН. Сер. геогр. 2006. № 5. С. 12–21.

284. Цыганов Д.Н. Фитоиндикация экологических режимов в подзоне хвойно-широколиственных лесов. М.: Наука, 1983. 196 с.

285. Черванев И.Г., Боков В.А., Тимченко И.Е. Геосистемные основы управления природной средой. Харьков, 2005. 128 с.

286. Черкашин А.К. Математические задачи учения о геосистемах и возможные пути их решения // География и природные ресурсы. 1985. № 2. С. 34–44.

287. Черкашин А.К. Полисистемное моделирование. Новосибирск: Наука, 2005. 280 с.

288. Черкашин А.К. Системный анализ ландшафтных знаний // Географические исследования в Сибири. Т. 4. Полисистемное тематическое картографирование. Отв. ред. А.К.Черкашин. Новосибирск: Гео, 2007. С. 279-287.

289. Черкашин А.К., Истомина Е.А. Выделение границ функционально однородных ареалов на космических снимках на основе вычисления определителя Якоби // География и природные ресурсы. 2013. № 1. С. 157–165.

290. Чистяков К.В. Географический детерминизм и ландшафтный прогноз // Ландшафтоведение: теория, методы, региональные исследования, практика. Матер. XI Межд. ландшафтной конф. М.: Геогр. ф-т МГУ, 2006. С. 25–29.

291. Чупрынин В.И. Нелинейности в геосистемах // Изв. РАН. Сер. геогр. 2003. № 6. С. 7–14.
292. Шاپлыгина Т.В., Волкова И.И. Природная и антропогенная трансформация ландшафтов и рельефа Куршской и Вислинской кос // Геоморфология. 2013. № 1. С. 95–103.
293. Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Костина Н.В. Методы синтетического картографирования территории (на примере эколого-информационной системы "Volgababas") // Количественные методы экологии и гидробиологии. Сб. научных трудов, посвященный памяти А.И. Баканова. Тольятти: СамНЦ РАН, 2005. С. 167-227.
294. Юдин Б.Г. Интеграция наук и системные исследования // Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник. 1986. М.: Наука, 1987. С. 26-44.
295. Юдин Э.Г. Системный подход и принцип деятельности. Методологические проблемы современной науки. М.: Наука, 1978. 391 с.
296. Южная тайга Прииртышья. Новосибирск: Наука, 1975. 248 с.
297. Allen T.F.H., Starr T.B. Hierarchy: Perspective for Ecological Complexity. Chicago: Univ. of Chicago, 1982. 216 p.
298. Angelstam P., Grodzynski M., Andersson K., Axelsson R., Elbakidze M., Khoroshev A., Kruhlov I., Naumov V. Measurement, collaborative learning and research for sustainable use of ecosystem services: landscape concepts and Europe as laboratory // AMBIO. Vol. 42. 2013. P.129–145.
299. Antonić O., Pernar N., Jelaska S.D. Spatial distribution of main forest soil groups in Croatia as a function of basic pedogenetic factors // Ecological Modelling. Vol. 170. 2003. P. 363–371.
300. Antrop M. Geography and landscape science // BELGEO 2000 1-2-3-4. Special Issue: 29th International Geographical Congress. 2000. P. 9–36.
301. Avessalomova I. A., Khoroshev A. V., Savenko A. V. Barrier function of floodplain and riparian landscapes in river runoff formation // Pokrovsky O.S. (Ed.) Riparian zones. Characteristics, management practices, and ecological impacts. Nova Science Publishers, New York, 2016. P.181-210.
302. Axelsson R. Landscape approach for sustainable development. From applied research to transdisciplinary knowledge production. Doctoral thesis No. 2009: 94. Swedish institute of agricultural sciences: Skinnskatterberg, 2009. 98 p.
303. Bailey R.G. Identifying Ecoregion Boundaries // Environmental Management. Vol.34. 2005. Suppl.1. P.14–26.
304. Bak P., Chen K. Self-organized criticality // Sci. Am. Vol. 264. 1991. P. 46–53.
305. Baker W. The r.le programs. A set of GRASS programs for the quantitative analysis of landscape structure. University of Wyoming, 2001. 60 p.

306. Banaszuk P., Wysocka A., Matowicka B. 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, 2000. P. 21–30.
307. Bastian O., Grunewald K., Khoroshev A.V. The significance of geosystem and landscape concepts for the assessment of ecosystem services: exemplified on a case study in Russia // *Landscape Ecology*. 2015. Vol. 30. No. 7. P. 1145-1164.
308. Bastian O, Steinhardt U. (eds.). *Development and perspectives of landscape ecology*. Boston: Kluwer Academic Publisher, 2002. 498 p.
309. Ben Wu X., Archer S.R. Scale-dependent influence of topography-based hydrologic features on patterns of woody plant encroachment in savanna landscapes // *Landscape Ecology*. Vol. 20. 2005. P. 733–742.
310. Bender D.J., Tischendorf L., Fahrig L. Using patch isolation metrics to predict animal movement in binary landscapes // *Landscape Ecology*. Vol. 18. 2003. P. 17–39.
311. Benning T.L., Seastedt T.R. Landscape-level interactions between topographic features and nitrogen limitation in tallgrass prairie // *Landscape Ecology*. Vol. 10. 1995. No. 6. P. 337–348.
312. Bian L., Walsh S.J. Scale dependencies of vegetation and topography in a mountainous environment of Montana // *The Professional Geographer*. Vol. 45. 1993. No. 1. P. 1–11.
313. Blaschke T., Biberacher M., Gadocha S., Scharding I. Energy landscapes: Meeting energy demands and human aspirations // *Biomass and Bioenergy*. Vol. 55. 2013. P. 3–16.
314. Bolstad P.V., Swank W., Vose J. Predicting Southern Appalachian overstory vegetation with digital terrain data // *Landscape Ecology*. Vol. 13. 1998. P. 271–283.
315. Borcard D., Legendre P. All-scale spatial analysis of ecological data by means of principal coordinates of neighbour matrices // *Ecological Modelling*. Vol. 153. 2002. P. 51–68.
316. Boutet J.C., Weishampel F. Spatial pattern analysis of pre- and post-hurricane forest canopy structure in North Carolina, USA // *Landscape Ecology*. Vol. 18. 2003. P. 553–559.
317. Braimoh A.K., Vlek P.L.G., Stein A. Land evaluation for maize based on fuzzy set and interpolation // *Environmental Management*. Vol. 33. 2004. No. 2. P. 226–238.
318. 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, 2000. 264 p.
319. Burnett C., Blaschke T. A multi-scale segmentation/object relationship modeling methodology for landscape analysis // *Ecological modeling*. Vol. 168. 2003. P. 233–249.

320. Burrough P.A., Wilson J.P., van Gaans P.F.M., Hansen A.J. Fuzzy k-means classification of topo-climatic data as an aid to forest mapping in the Greater Yellowstone Area, USA // *Landscape Ecology*. Vol. 16. 2001. No. 6. P. 523–546.
321. Buyantuyev A., Wu J. Effects of thematic resolution on landscape pattern analysis // *Landscape Ecology*. Vol. 22. No. 1. 2007. P. 7-13.
322. Cain D.H., Riitters K., Orvis K. A multi-scale analysis of landscape statistics // *Landscape Ecology*. Vol. 12. 1997. P. 199-212.
323. Carlile D.W., Skalski J.R., Batker J.E., Thomas J.M., Cullinan V.I. Determination of ecological scale // *Landscape Ecology*. Vol. 2. 1989. No. 4. P. 203–213.
324. Chang C.-R., Lee P.-F., Bai M.-L., Lin T.-T. Identifying the scale thresholds for field-data extrapolation via spatial analysis of landscape gradients // *Ecosystems*. Vol. 9. 2006. P. 200–214.
325. Christian C.S. The concept of land units and land systems // *Proceedings of the Ninth Pacific Science Congress*. Vol. 20. 1958. P. 74-81.
326. Coueron P., Barbier N., Gautier D. Textural ordination based on Fourier spectral decomposition: a method to analyze and compare landscape patterns // *Landscape Ecology*. Vol. 21. 2006. P. 555–567.
327. Christopherson R.W. *Geosystems: An introduction to physical geography*. 9th ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2014. 688 p.
328. Cross A., Perakis S.S. Complementary models of tree species–soil relationships in old-growth temperate forests // *Ecosystem*. Vol. 14. 2011. P. 248–260.
329. Cullinan V.I., Simmons M.A., Thomas J.M. A Bayesian test of hierarchy theory: scaling up variability in plant cover from field to remotely sensed data // *Landscape Ecology*. Vol 12. 1997. P. 273–285.
330. Cushman S.A., McGarigal K. Hierarchical, multiscale decomposition of species-environment relationships // *Landscape Ecology*. Vol. 17. 2002. P. 637–646.
331. Cushman S.A. Shirk A., Landguth E.L. Separating the effects of habitat area, fragmentation and matrix resistance on genetic differentiation in complex landscapes // *Landscape Ecology*. Vol. 27. 2012. P. 369-380.
332. Dahlin K.M., Asner G.P., Field C.B. Linking vegetation patterns to environmental gradients and human impacts in a mediterranean-type island ecosystem // *Landscape Ecology*. 2014. Vol. 29. P. 1571–1585.
333. Decamps H. 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, 2000. P. 44–49.

334. Del Barrio G., Alvera B., Puigdefabregas J., Diez C. Response of high mountain landscape to topographic variables: Central Pirenees // *Landscape Ecology*. Vol. 12. 1997. No. 2. P. 95–115.
335. Delcourt H.R., Delcourt P.A., Webb T. Dynamic plant ecology: the spectrum of vegetation change in space and time // *Quaternary science review*. Vol. 1. 1983. P. 153–175.
336. Demek J. Landscape ecology into the twenty-first century // *Ecology (Bratislava)*. Vol. 19. 2000. Suppl. 2. P. 9–17.
337. Dorner B., Lertzman K., Fall J. Landscape pattern in topographically complex landscapes: issues and techniques for analysis // *Landscape Ecology*. Vol. 17. 2002. P. 729–743.
338. 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. A balanced view of scale in spatial statistical analysis // *Ecography*. Vol. 25. 2002. P. 626–640.
339. Ernault A., Bureau B., Poudevigne I. Patterns of organisation in changing landscapes: implications for the management of biodiversity // *Landscape Ecology*. Vol. 18. 2003. P. 239–251.
340. Etherington T.R., Perry G.L.W. Using point process intensity to establish the spatio-temporal grain of continuous landscape tessellations and graphs // *Landscape Ecology*. Vol. 27. 2012. P. 1083–1090.
341. European Landscapes in Transformation: Challenges for Landscape Ecology and Management. European IALE Conference 2009. Salzburg, Bratislava, 2009.. 608 p.
342. Farina A. Principles and methods in landscape ecology. London, UK: Chapman & Hall, 1998. 235 p.
343. Feranec J., O'ahel' J. Krajinná pokrývka slovenska. Veda, Bratislava, 2001. 122 p.
344. Fletcher R.J., Jr. Emergent properties of conspecific attraction in fragmented landscapes // *American Naturalist*. Vol. 168. 2006. No. 2. P. 207–218.
345. Forman R.T.T. Land Mosaics. Cambridge University Press, 2006. 632 p.
346. Forman R.T.T., Godron M. Landscape ecology. New York: John Wiley & Sons, 1986. 437 pp.
347. Fortin M.J., Olson R.J., Ferson S., Iverson I., Hunsaker C., Edwards G., Levine D., Butera K., Klemas V. Issues related to the detection of boundaries // *Landscape Ecology*. Vol. 15. 2000. P. 453–466.
348. Fritz H., Saïd S., Renauld P.-C., Mutake S., Coid C., Monicat F. 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. 2003. No. 3. P. 293–302.

349. Fuhlendorf S.D., Woodward A.J.W., Leslie D.M. Jr., Shackford J.S. Multi-scale effects of habitat loss and fragmentation on lesser prairie-chicken populations of the US Southern Great Plains // *Landscape Ecology*. Vol. 17. 2002. P. 617–628.
350. Gardner R.H., Forester J.D., Plotnick R.E. Determining pattern-process relationships in heterogeneous landscapes // Wu J., Hobbs R. (Eds.) *Key topics in landscape ecology*. Cambridge University Press, 2007. P. 92-114.
351. Gardner R.H., Milne B., Turner M., O'Neill R.V. Neutral models for the analysis of broad-scale landscape pattern // *Landscape Ecology*. Vol. 1. 1987. P. 19–28.
352. Gardner R.H., Urban D.L. Neutral models for testing landscape hypotheses // *Landscape Ecology*. Vol. 22. 2006. P. 15–29.
353. Gergel S.E. Spatial and non-spatial factors: When do they affect landscape indicators of watershed loading? // *Landscape Ecology*. Vol. 20. 2005. P.177–189.
354. Gosz J.R., Sharpe P.J.H. Broad-scale concepts for interactions of climate, topography, and biota at biome transitions // *Landscape Ecology*. Vol. 3. 1989. No. 3/4. P. 229–243.
355. Grünewald K., Bastian O. (Eds.) *Ecosystem services. Concept, method and case studies*. Springer, 2015. 312 p.
356. Grünewald K., Scheithauer J. *Landscape development and climate change in Southwest Bulgaria (Pirin mountains)*. Springer, 2011. 161 p.
357. Guisan A., Zimmermann N.E. Predictive habitat distribution models in ecology // *Ecological Modelling*. Vol. 135. 2000. P. 147–186
358. Guo Z., Gan Y., Li Y. Spatial pattern of ecosystem function and ecosystem conservation // *Environmental management*. Vol. 32. 2003. No. 6. P. 682–692.
359. Gustafson E.J., Zollner P.A., Sturtevant B.R., He H.S., Mladenoff D.J. Influence of forest management alternatives and land type on susceptibility to fire in northern Wisconsin, USA // *Landscape Ecology*. Vol. 19. 2004. P. 327–341.
360. Haase G. *Landschaftsökologische Detailuntersuchung und naturräumliche Gliederung* // *Pet. Geogr. Mitt.* 1964. P. 1–2.
361. Haila Y. Scaling environmental issues: problems and paradoxes // *Landscape and Urban Planning*. Vol 61. 2002. No. 2. P. 59–69.
362. Haining R., *Spatial data analysis. Theory and practice*. Cambridge University Press, 2003. 432 p.
363. Hall O., Hay G.J., Bouchard A., Marceau D.J. Detecting dominant landscape objects through multiple scales: An integration of object-specific methods and watershed segmentation // *Landscape Ecology*. Vol. 19. 2004. No. 1. P. 59–76.

364. Hay G.J., Marceau D.J., Dube P., Bouchard A. A multiscale framework for landscape analysis: Object-specific analysis and upscaling // *Landscape Ecology*. Vol. 16. 2001. P. 471–490.
365. Hay G.J., Dube P., Bouchard A., Marceau D.J. A scale-space primer for exploring and quantifying complex landscapes // *Ecological Modelling*. Vol. 153. 2002. P. 27–49.
366. Hlasny T. Probabilistic approaches to ecological modeling // *Ecology (Bratislava)*. Vol. 25. 2006. Suppl. 1. P. 66–75.
367. Hoechstetter S., Walz U., Dang L.H., Thinh N.X. 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. 2008. P. 1–14.
368. Holling C.S. (ed.). *Adaptive environmental assessment and management*. London: John Wiley & Sons. 1978. 377 p.
369. Hooten M.B., Larsen D.R., Wikle C.K. Predicting the spatial distribution of ground flora on large domains using a hierarchical Bayesian model // *Landscape Ecology*. Vol. 18. 2003. P. 487–502.
370. Jaeger J.A.G. Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation // *Landscape Ecology*. Vol. 15. 2000. P. 115–130.
371. Jager H.I., King A.W. Spatial uncertainty and ecological models // *Ecosystems*. Vol. 7. 2004. P. 841–847.
372. Jin Yao, Peters D., Havstad K., Gibbens R., Herrick J. Multiscale factors and long-term responses of Chihuahuan desert grasses to drought // *Landscape Ecology*. Vol. 21. 2006. No. 8. P. 1217–1231.
373. Jongman R.H.G., Pungetti G. *Ecological networks and greenways. Concept, design, implementation*. Cambridge University Press, 2004. 345 p.
374. Jorgensen S.E., Svirezhev Yu.M. *Towards a Thermodynamical Theory for Ecological Systems*. Oxford UK: Elsevier Ltd. The Boulevard, 2004. 369 p.
375. Kachanoski R.G. Processes in soil-from Pedon to landscape // Rosswall T., Woodmansee R.G., Risser P.G. (eds.). *SCOPE*. Vol. 35. *Scales and Global Change*. John Wiley & Sons, 1988. P. 153–177.
376. Kennedy R.S.H., Spies T.A., Gregory M.J. Relationships of dead wood patterns with biophysical characteristics and ownership according to scale in Coastal Oregon, USA // *Landscape Ecology*. Vol. 23. 2008. P. 55–68.
377. Khoroshev A.V., Merekalova K.A. Uncertainty of relations between landscape components – a tool for modelling evolution of spatial pattern // *Ekológia (Bratislava)*. Vol. 25. 2006. Suppl. 1. P. 122–130.

378. King A.W. Hierarchy theory and the landscape...level? Or: words do matter // Wiens J.A., Moss M.R. (eds.). *Issues in Landscape Ecology*. Snowmass Village, Colorado, USA, 1999. P. 6–9.
379. King R.S., Richardson C.J., Urban D.L., Romanowicz E.A. Spatial dependency of vegetation – environmental linkages in an anthropogenically influenced wetland ecosystem // *Ecosystems*. Vol. 7. 2004. P. 75–97.
380. Kirchhoff T., Trepl L., Vicenzotti V. What is landscape ecology? An analysis and evaluation of six different conceptions // *Landscape Research*. 2012. P. 1-19. DOI:10.1080/01426397.2011.640751
381. Klijn F., de Haes H.A.U. A hierarchical approach to ecosystems and its applications for ecological land classification // *Landscape Ecology*. Vol. 9. 1994. No. 2. P. 89–104.
382. Klimo E., Kulhavy J., Vavříček D. Changes in the quality of precipitation water passing through Norway spruce forest ecosystem in the agricultural-forest landscape of the Dražanská vysočina Uplands // *Ecology (Bratislava)*. Vol. 18. 1996. No. 3. P. 295–306.
383. Krcho J. Morphometric analysis of relief on the basis of geometric aspect of field theory. *Acta geographica UC, Geographico-physica*, 1, SPN, Bratislava, 1973. 233 p.
384. Krnač Š., Krnačova Z. Study of ecosystems by factor analysis method. I. Exploratory approach // *Ecology (Bratislava)*. Vol. 13. 1994. No. 4. P. 349–360.
385. Langford W.T. Gergel S.E., Dietterich T.G., Cohen W. Map misclassification can cause large errors in landscape pattern indices: examples from habitat fragmentation // *Ecosystems*. 2006. Vol. 9. P. 474–488.
386. Larsen J.K., Madsen J. Effects of wind turbines and other physical elements on field utilization by pink-footed geese (*Anser brachyrhynchus*): A landscape perspective // *Landscape Ecology*. Vol. 15. 2000. No. 8. P. 755–764.
387. Lechner A.M., Langford W.T., Bekessy S.A., Jones S.D. Are landscape ecologists addressing uncertainty in their remote sensing data? // *Landscape Ecology*. Vol. 27. 2012. P. 1249–1261.
388. Legendre P. Spatial autocorrelation: trouble or a new paradigm // *Ecology*. Vol. 74. 1993. P. 1659–1673.
389. Leser H. *Landschaftsökologie*. UTB-Taschenbuch. Stuttgart: Ulmer-Verlag, 1997.. 644 S.
390. Levin S.A. Ecosystems and the biosphere as complex adaptive systems // *Ecosystems*. Vol. 1. 1998. P. 431-436
391. Likens G.E., Bormann F.H. *Biogeochemistry of a forested ecosystem*. New York: Springer-Verlag, 1995. 159 p.

392. Litaor M.I., Seastedt T.R., Walker D.A. Spatial analysis of selected soil attributes across an alpine topographic/snow gradient // *Landscape Ecology*. Vol. 17. 2002. P. 71–85.
393. Lobo A., Moloney K., Chic O., Chiariello N. Analysis of fine-scale spatial pattern of a grassland from remotely-sensed imagery and field collected data // *Landscape Ecology*. Vol. 13. 1998. P. 111–131.
394. Lookingbill T., Urban D. An empirical approach towards improved spatial estimates of soil moisture for vegetation analysis // *Landscape Ecology*. Vol. 19. 2004. No. 4. P. 417–433.
395. Ludwig J.A. Advances in detecting landscape changes at multiple scales: examples from northern Australia // Wu J., Hobbs R. (Eds.) *Key topics in landscape ecology*. Cambridge University Press, 2007. P. 161-172.
396. Ludwig J.A., Tongway D.J., Eager R.W., Williams R.J., Cook G.D. Fine-scale vegetation patches decline in size and cover with increasing rainfall in Australian savannas // *Landscape Ecology*. Vol. 14. 1999. P. 557–566.
397. MacArthur R., Wilson E.O. *The Theory of Island Biogeography*. Princeton: Princeton Univ. Press, 1967. 203 p.
398. Makhdoum M.F. Landscape ecology or environmental studies (Land Ecology) (European versus Anglo-Saxon schools of thought) // *J. Int. Environmental Application & Science*. Vol. 3. 2008. No. 3. P. 147–160.
399. Malard F., Tockner K., Ward J.V. Physico-chemical heterogeneity in a glacial landscape // *Landscape Ecology*. Vol. 15. 2000. No. 8. P. 679–695.
400. Marceau D.J. The scale issue in social and natural sciences // *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol. 25. 1999. No. 4. P. 347–356.
401. May R.M. Will a large complex system be stable? // *Nature (London)*. Vol. 238. 1972. P. 413–414.
402. McGarigal K., Marks B.J. *Fragstats: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure*. U. S. Forest Service General Technical Report PNW: 351. Portland, OR, USA, 1995.
403. McIntyre N.E., Wiens J. A novel use of the lacunarity index to discern landscape function // *Landscape Ecology*. Vol. 15. 2000. No. 4. P. 313–321.
404. McMahan G., Wiken E.B., Gauthier D.A. Toward a scientifically rigorous basis for developing mapped ecological regions // *Environmental Management*. Vol. 34. 2004. Suppl. 1. P. 111–124.
405. Meentemeyer V. Geographical perspectives of space, time, scale // *Landscape Ecology*. Vol. 3. 1989. No. 3/4. P. 163–173.

406. Meisel J., Turner M.G. Scale detection in real and artificial landscapes using semivariance analysis // *Landscape Ecology*. Vol. 13. 1998. P. 347–362.
407. Messier C., Puettmann K.J. Forests as complex adaptive systems: implications for forest management and modelling // *L'Italia Forestale e Montana*. Vol. 66 (3). 2011. P. 249-258.
408. Mikloš L. 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. 1996. No. 4. P. 377–385.
409. Milns I., Beale C.M., Smith V.A. Revealing ecological networks using Bayesian network inference algorithms // *Ecology*. Vol. 91. 2010. No. 7. P. 1892–1899.
410. Minar J. The position of geomorphology in the landscape research // *Acta Facultatis Rerum Naturalium Universitatis Comenianae. Geographica*. 1993. Nr. 32. P.35–49.
411. Minar J., Evans I.S. Elementary forms for land surface segmentation: the theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping // *Geomorphology*. Vol. 95. 2008. Issue 3–4. P. 236–259.
412. Molenaar M., Cheng T. 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, 2002. P. 389–393.
413. 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. Diversity in Current Ecological Thinking: Implications for Environmental Management // *Environmental Management*. Vol. 43. 2009. P. 17–27.
414. Moss M.R. Fostering academic and institutional activities in landscape ecology // Wiens J.A., Moss M.R. (eds.). *Issues in Landscape Ecology*. International Association for Landscape Ecology. Snowmass Village, 1999. P. 138–144.
415. Muller F. Indicating ecosystem and landscape organization // *Ecological Indicators*. Vol. 5. 2005. P. 280–294.
416. Musio M., von Wilpert K., Augustin N.H. Crown condition as a function of soil, site and tree characteristics // *Eur. J. Forest Res.* Vol. 126. 2007. P. 91–100.
417. Myster R.W., Thomlinson J.R., Larsen M.C. Predicting landslide vegetation in patches on landscape gradients in Puerto Rico // *Landscape Ecology*. Vol. 12. 1997. P. 299–307.
418. Naveh Z. Introduction to the theoretical foundations of multifunctional landscapes and their application in transdisciplinary landscape ecology // Brandt J., Tress B., Tress G. (eds.). *Multifunctional Landscapes: Interdisciplinary Approaches to Landscape Research and Management*. Centre for Landscape Research, Roskilde, 2000. P. 27–43.

419. Naveh Z. Ten major premises for a holistic conception of multifunctional landscape // *Landscape and Urban Planning* Vol. 57. 2001. P. 269–284.
420. Naveh Z. Ecosystem and landscapes – a critical comparative appraisal // *Journal of Landscape Ecology*. Vol. 3. 2010. No. 1. P. 64–81.
421. Ndubisi F. *Ecological Planning: A Historical and Comparative Synthesis*. John Hopkins University, Baltimore, 2002. 384 p.
422. Obeysekera J., Rutchey K. Selection of scale for Everglades landscape models // *Landscape Ecology*. Vol. 12. 1997. No. 1. P. 7–18.
423. Oline D., Grant M.C. Scaling patterns of biomass and soil properties: an empirical analysis // *Landscape Ecology*. Vol.17. 2002. P. 13–26.
424. O'Neill R.V. Hierarchy theory and global change // Rosswall T., Woodmansee R.G., Risser P.G. (eds.). *SCOPE 35. Scales and Global Change: Spatial and Temporal Variability in Biospheric and Geospheric Processes*. Wiley, U.K, 1988. P. 29–45.
425. O'Neill R.V., De Angelis D.L., Waids J.B., Allen T.F.H. *A hierarchical concept of ecosystem*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1986. 262 p.
426. O'Neill R.V., Johnson A.R., King A.W. A hierarchical framework for the analysis of scale // *Landscape Ecology*. Vol. 3. 1989. No. 3–4. P. 193–205.
427. Opdam P., Verboom J., Pouwels R. Landscape cohesion: an index for the conservation potential of landscapes for biodiversity // *Landscape Ecology*. Vol. 18. 2003. P. 113–126.
428. Openshaw S. A geographical solution to scale and aggregation problem in region building, partitioning and spatial modelling // *Institute of British Geographers, Transactions, New Series*. Vol. 2. 1977. P. 459–472.
429. Opp C. Actual problems of loadability and load in agro-ecosystems // *Ecology (CSFR)*. Vol. 10. 1991. No. 4. P. 373–388.
430. Oľahel' J., Drdoš J., Štefunková D. Landscape perception assessment (visual quality, emotional quality, landscape identity, habitat quality) // *Landscape Ecology in Slovakia. Development, Current State, and Perspectives*, 2007. P. 116–123.
431. Papadimitriou F. Geo-mathematical modelling of spatial-ecological complex systems: an evaluation // *Geography, Environment, Sustainability*. Vol. 3. 2010. No. 1. P. 67–80.
432. Papadimitriou F., Mairota P. Spatial scale-dependent policy planning for land mnagement in Southern Europe // *Environmental Monitoring and Assessment*. Vol. 39. 1996. P. 47–57.
433. Perry G.L.W., Enright N.J. Spatial modelling of landscape composition and pattern in a maquis-forest complex, Mont Do, New Caledonia // *Ecological Modelling*. Vol. 152. 2002. P. 279–302.

434. Peters D.P.C., Jin Yao, Huenneke L.F., Gibbens R.P., Havstad K.M., Herrick J.E., Rango A., Schlesinger W. A framework and methods for simplifying complex landscapes to reduce uncertainty in predictions // Wu J., Jones K.B., Loucks O.I. (eds.). *Scale and uncertainty in landscape ecology*. Springer, 2007. P. 131–146.
435. Phillips J.D. Global and local factors in earth surface systems // *Ecological Modelling*. Vol. 149. 2002. No. 3. P. 257–272.
436. Pickett S.T.A., Cadenasso M.L. Landscape ecology: spatial heterogeneity in ecological systems // *Science*. Vol. 269. 1995. P.331-334.
437. Pickett S.T.A., Cadenasso M.L. The ecosystem as a multidimensional concept: meaning, model, and metaphor // *Ecosystems*. Vol. 5. 2002. P. 1–10.
438. Pietrzak M. Landscape dimensions – some theoretical remarks // *The problems of landscape ecology*. Vol. XXX. 2011. P. 11-14.
439. Ratas U., Puurmann E., Roosaare J., Ravis R. A landscape-geochemical approach in insular studies as exemplified by islets of the eastern Baltic Sea // *Landscape Ecology*. Vol. 18. 2003. No. 2. P. 173-184.
440. Reid R.S., Kruska R.L., Muthui N., Taye A., Wotton S., Wilson C.J., Mulatu W. 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. 2000. No. 4. P. 339–355.
441. Richling A., Solon J. *Ekologia krajobrazu*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa, 2011. 464 p.
442. Robinson V.B. A perspective on geographic information systems and fuzzy sets // *Proceedings of North American Fuzzy Information Processing Society Proceedings, IEEE, New Orleans, LA, 2002*. P. 1–6.
443. Röder M., Syrbe R.-U. 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, 2000. P. 235–246.
444. Rowe J.S. Land classification and ecosystem classification // *Environmental Monitoring and Assessment*. Vol. 39, 1996. P. 11–20.
445. Rupp T.S., Starfield A.M., Chapin F.S. A frame-based spatially explicit model of subarctic vegetation response to climatic change: comparison with a point model // *Landscape Ecology*. Vol. 15. 2000. No. 4. P. 383–400.
446. Ružička M. *Krajinnoekologické planovanie – LANDEP I (Systemový prístup v krajinnej ekológii)*. Nitra, 2000. 119 p.
447. Ružička M., Mišovičova R. *Krajina ekológia. Edícia Biosfera. C. Seria učebných textov*, Vol. 2. Nitra, 2006. 131 p.

448. Ryszkowski L., Bartoszewicz A., Kedziora A. Management of matter fluxes by biogeochemical barriers at the agricultural landscape level // *Landscape Ecology*. Vol.14. 1999. P. 479–492.
449. Saunders S.C., Chen J., Crow T.R., Brososke K.D. Hierarchical relationships between landscape structure and temperature in a managed forest landscape // *Landscape Ecology*. Vol. 13. 1998. P. 381–395.
450. Sebastiá M.-T. Role of topography and soils in grassland structuring at the landscape and community scales // *Basic and Applied Ecology*. Vol. 5. 2004. P. 331–346.
451. Seoane J., Bustamante J., Díaz-Delgado R. Competing roles for landscape, vegetation, topography and climate in predictive models of bird distribution // *Ecological Modelling*. Vol. 171. 2004. P. 209–222.
452. Shugart H.H. *A Theory of Forest Dynamics: The Ecological Implications of Forest Succession Models*. New York: Springer-Verlag, 1984. 278 p.
453. Shugart H.H. Equilibrium versus non-equilibrium landscapes // Wiens J.A., Moss M.R. (eds.). *Issues in Landscape Ecology*. Snowmass Village. Colorado, USA, 1999. P. 18–21.
454. Shugart H.H., Michaels P.J., Smith T.M., Weinstein D.A., Rastetter E.B. *Simulation Models of Forest Succession* // Rosswall T., Woodmansee R.G., Risser P.G. (eds.). *SCOPE 35. Scales and Global Change: Spatial and Temporal Variability in Biospheric and Geospheric Processes*. Wiley, U.K., 1988. 376 p.
455. Smith M.-L., Carpenter C. 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. 1996. P. 187–198.
456. Snacken F., Antrop M. Structure and dynamics of landscape systems // Drdoš J. (ed.). *Landscape Synthesis. Geocological Foundations of the Complex Landscape Management*. Veda, Bratislava, 1983. P. 10–30.
457. Solon J. Integrating ecological and geographical (biophysical) principles in studies of landscape systems // Wiens J.A., Moss M.R. (eds.). *Issues in Landscape Ecology*. 5th IALE-World Congress, Snowmass, CO, USA, 1999. P. 22–27.
458. Stottlemeyer R., Toczydlowski D., Hermann R. *Biogeochemistry of a mature boreal ecosystem: Isle Royal national park, Michigan*. Scientific monograph NPS/NRUSGS/NRSM-98/01. Unites States Department of the Interior National Park Service, 1998. 116 p.
459. Strayer D.L., Beighley R.E., Thompson L.C., Brooks S., Nilsson C., Pinay G., Naiman R.J. Effects of land cover on stream ecosystems: roles of empirical models and scaling issues // *Ecosystems*. Vol. 6. 2003. P. 407–423.

460. Stremke S., van den Dobbelsteen A., Koh J. Exergy landscapes: exploration of second-law thinking towards sustainable landscape design // *Int. J. Exergy*. Vol. 8. 2011. No. 2.
461. Sugier P., Czarnecka B. 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, 1998. P. 236–245.
462. Sweeney B.A., Cook J.E. A landscape-level assessment of understory diversity in upland forests of North-Central Wisconsin, USA // *Landscape Ecology*. Vol. 16. 2001. P. 55–69.
463. Szabo P., Meszena G. Spatial ecological hierarchies: coexistence on heterogeneous landscapes via scale niche diversification // *Ecosystems*. Vol. 9. 2006. P. 1009–1016.
464. Taylor P. The location variable in taxonomy // *Geographical Analysis*. Vol. 1. 1969. No. 2. P. 181–195.
465. Tischendorf L. Can landscape indices predict ecological processes consistently? // *Landscape Ecology*. Vol. 16. 2001. No. 3. P. 235–254.
466. Tischendorf L., Fahrig L. How should we measure landscape connectivity? // *Landscape Ecology*. Vol. 15. 2000. No. 7. P. 633–641.
467. Tran L.T., O'Neill R.V., Smith E.R. A generalized distance measure for integrating multiple environmental assessment indicators // *Landscape Ecology*. Vol. 21. 2006. P. 469–476.
468. Tress G., Tress B., Fry G. Clarifying integrative research concepts in landscape ecology // *Landscape Ecology*. Vol. 20. 2004. P. 479–493.
469. Troll C. Die geographische Landschaft und ihre Erforschung. *Studium Generale*. Vol. 3 (4/5). 1950. P. 163-181.
470. Turnbull L., Wainwright J., Brazier R.E., Bol R. Biotic and abiotic changes in ecosystem structure over a shrub-encroachment gradient in the southwestern USA // *Ecosystems*. Vol. 13. 2010. No. 8. P. 1239–1255.
471. Turner M.G. Spatial and temporal analysis of landscape patterns // *Landscape Ecology*. Vol. 4. 1990. P. 21-30.
472. Turner M., O'Neill R.V., Gardner R., Milne B.T. Effects of changing spatial scale on the analysis of landscape pattern // *Landscape Ecology*. Vol. 1. 1989. No. 3/4. P. 153-162.
473. Turner M., Gardner R.H., O'Neill R.V. *Landscape Ecology in Theory and Practice: Pattern and Process*. Springer Verlag, 2001. 352 p.
474. Turner M., Gardner R.H. *Landscape Ecology in Theory and Practice. Pattern and Process*. Springer, 2015. 482 p.
475. Urban D.L., O'Neill R.V., Shugart H.H. Jr. Landscape ecology. A hierarchical perspective can help scientists understand spatial patterns // *Bioscience*. Vol. 37. 1987. No. 2. P. 119–127.

476. van Eetvelde V., Antrop M. 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, 2007. P. 229–239.
477. van Horssen P.W., Schot P.P., Barendregt A.A. GIS-based plant prediction model for wetland ecosystems // Landscape Ecology. Vol. 14. 1999. P. 253–265.
478. Vasconcelos De M.J.P., Zeigle B.P., Graham L.A. Modeling multiscale spatial ecological processes under the discrete-event systems paradigm // Landscape Ecology. Vol. 8. 1993. No. 4. P. 273–286.
479. Vasques G.M., Grunwald S., Myers D.B. Associations between soil carbon and ecological landscape variables at escalating spatial scales in Florida, USA // Landscape Ecology. 2012. Vol. 27. P. 355–367.
480. von Haaren C, Galler C, Ott S. Landscape planning. The basis of sustainable landscape development. Leipzig, Bonn: Federal Agency for Nature Conservation, 2008. 51 p.
481. Vos C.C., Opdam P., Steingrover G., Reijnen R. Transferring ecological knowledge to landscape planning: a design method for robust corridors // Wu J., Hobbs R. (Eds.) Key topics in landscape ecology. Cambridge University Press, 2007. P. 227-245.
482. Waldhardt R., Simmering D., Otte A. Estimation and prediction of plant species richness in a mosaic landscape // Landscape Ecology. Vol. 19. 2004. P. 211–226.
483. Waldrop M.M. 1992. Complexity: The emerging science at the edge of order and chaos. New York: Touchstone. 384 p.
484. Walz U. Landscape Structure, Landscape Metrics and Biodiversity // Living Rev. Landscape Res.. Vol 5. 2011. No. 3. <http://www.livingreviews.org/lrlr-2011-3>
485. Wamelink G.W.W., ter Braak C.J.F, van Dobben H.F. Changes in large-scale patterns of plant biodiversity predicted from environmental economic scenarios // Landscape Ecology. Vol. 18. 2003. P. 513–527.
486. Weaver J.E., Conway T.M., Fortin M.-J. An invasive species' relationship with environmental variables changes across multiple spatial scales // Landscape Ecology. Vol. 27. 2012. P. 1351-1362.
487. Weaver K., Perera A.H. Modelling land cover transitions: A solution to the problem of spatial dependence in data // Landscape Ecology. Vol. 19. 2004. P. 273–289.
488. Weishampel J.F., Knox R.G., Levine E.R. Soil saturation effects on forest dynamics: scaling across a southern boreal/northern hardwood landscape // Landscape Ecology. Vol. 14. 1999. P. 121–135.

489. Wicik B. The hydrogeochemical problems in the Campinos national park // Richling A., Osowiec M. (eds.). *Landscape ecological methods for strongly transformed areas*. Warsaw, 2001. P. 55–61.
490. 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. Upstream-to-downstream changes in nutrient export risk // *Landscape Ecology*. Vol. 18. 2003. P. 195–208.
491. Wickham J.D., Riitters K.H., Wade T.G., Coulston J.W. Temporal change in forest fragmentation at multiple scales // *Landscape Ecology*. Vol. 22. 2007. P. 481–489.
492. Wiens J.A., Milne B.T. Scaling of 'landscapes' in landscape ecology, or, landscape ecology from a beetle's perspective // *Landscape Ecology*. Vol. 3. 1989. No. 2. P. 87–96.
493. Wilcox B.P., Breshears D.D., Allen C.D. Ecohydrology of a resource-conserving semiarid woodland: effects of scale and disturbance // *Ecological Monographs*. Vol. 73. 2003. No. 2. P. 223–239.
494. Witte J.-P.M., Bartholomeus R.P., van Bodegom P.M., Cirkel D.G., van Ek R., Fujita Y., Janssen G.M.C.M., Spek T.J., Runhaar H. A probabilistic eco-hydrological model to predict the effects of climate change on natural vegetation at a regional scale // *Landscape Ecology*. 2015. Vol. 30. P. 835–854.
495. Wood S.W., Bowman D.M.J.S. Alternative stable states and the role of fire–vegetation–soil feedbacks in the temperate wilderness of southwest Tasmania // *Landscape Ecology*. 2012. Vol. 27. P. 13–28.
496. Wu J. Hierarchy and scaling: extrapolating information along a scaling ladder // *Can. J. of Remote Sensing*. Vol. 25. 1999. No. 4. P. 367–380.
497. Wu J. Effects of changing scale on landscape pattern analysis: scaling relations // *Landscape Ecology*. Vol. 19. 2004. P. 125–138.
498. Wu J., David J.L. A spatially explicit hierarchical approach to modelling complex ecological systems: theory and applications // *Ecological modelling*. Vol. 153. 2002. P. 7–26.
499. Wu J., Gao W., Tueller P.T. Effects of changing spatial scale on the results of statistical analysis with landscape data: A case study // *Geographic Information Sciences*. 1997. No 3. P. 30–41.
500. Wu J., Jelinski D.E., Luck M., Tueller P.T. Multiscale analysis of landscape heterogeneity: scale variance and pattern metrics // *Geographic Information Sciences*. Vol. 6. 2000. P. 6–19.
501. Wu J., Hobbs R. Key issues and research priorities in landscape ecology: An idiosyncratic synthesis // *Landscape Ecology*. Vol. 17. 2002. No. 4. P. 355–365.
502. Wu J., Loucks O.L. From balance-of-nature to hierarchical patch dynamics: A paradigm shift in ecology // *Quarter Review of Biology*. Vol. 70. 1995. P. 439–466.

503. Zald H.S.J., Spies T.A., Huso M., Gatzolis D. Climatic, landform, microtopographic, and overstory canopy controls of tree invasion in a subalpine meadow landscape, Oregon Cascades, USA // *Landscape ecology*. Vol. 27. 2012. P. 1197–1212.

504. Žigrai F. Preservation of authenticity and determination of identity of landscape ecology as one prerequisite of its future development (selected theoretical and meta-scientific aspects) // *Ekologia (Bratislava)*. Vol. 34. 2015. No. 2. P. 186–206.

505. Zhu A.X., Hudson B., Burt J., Lubich K., Simonson D. Soil mapping using GIS expert knowledge and fuzzy logic // *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 65. 2001. No. 5. P. 1463–1472.

506. Zonneveld I.S. The land unit – A fundamental concept in landscape ecology, and its applications // *Landscape ecology*. Vol. 3. 1989. No 2. P. 67–86.

507. Zonneveld I.S. *Land ecology. An introduction to landscape ecology as a basis for land evaluation, land management and conservation*. SPB Academic Publishing, Amsterdam, 1995. 199 p.

508. Zurlini G., Riitters K.H., Zaccarelli N., Petrosillo I. Patterns of disturbance at multiple scales in real and simulated landscapes // *Landscape Ecology*. Vol. 22. 2007. P. 705–721.