

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



Безухов Дмитрий Анатольевич

**Рельеф как фактор эрозионно-аккумулятивных процессов в бассейнах малых
рек южного мегасклона Русской равнины**

25.00.25 – Геоморфология и эволюционная география

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

- Научный руководитель** – *Голосов Валентин Николаевич, доктор географических наук, доцент*
- Официальные оппоненты** – *Ермолаев Олег Петрович доктор географических наук, профессор кафедры моделирования экологических систем ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»*
- Рысин Иван Иванович – доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет»*
- Жидкин Андрей Петрович, кандидат географических наук, старший научный сотрудник кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова*

Защита диссертации состоится «19» декабря 2019 г. в 17 часов на заседании диссертационного совета МГУ.11.04 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д.1, Географический факультет, 21 этаж, ауд. 2109.

E-mail: malyn2006@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <http://istina.msu.ru/dissertations/243979490>

Автореферат разослан « 18 » ноября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.11.04,
кандидат географических наук

А.Л. Шныпарков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Эрозионно-аккумулятивные процессы являются ведущим рельефообразующим агентом на освоенных землях умеренного климатического пояса в пределах Европейской части Российской Федерации. На территории южного мегасклона Русской равнины, покрытого мощным чехлом легкоразмываемых лессов и покровных суглинков, особенности протекания эрозионно-аккумулятивных процессов определяют пути и объемы перемещения наносов, а вместе с ними и различного рода загрязняющих веществ в речные системы. Кроме того, эти процессы во многих случаях являются природным фактором, ограничивающим сельскохозяйственное использование земель.

Рельеф является определяющим фактором темпов эрозионно-аккумулятивных процессов на обрабатываемых территориях. Одновременно рельеф наряду с растительным покровом являются важнейшими факторами, определяющими долю смытого с пашни материала, поступающего в днища долин водотоков. Исследуя геоморфологическое строение территории, возможно оценить объемы потенциальной доставки наносов со склонов междуречий в днища долин суходольной сети и постоянных водотоков, спрогнозировать развитие новых эрозионных форм рельефа, оценить эрозионный потенциал рельефа, что позволит разработать оптимальную стратегию землепользования для сохранения плодородия почв и качества поверхностных вод для территорий с высокой долей пахотных земель.

Цель исследования. Цель данного исследования – количественная оценка влияния морфометрических свойств рельефа территории на динамику и пространственную структуру эрозионно-аккумулятивных процессов и доставку наносов в днища сухих долин и постоянные водотоки на сельскохозяйственно освоенных территориях в условиях мегасклона Русской равнины, расположенных в пределах юга лесной, лесостепной и степной ландшафтных зон.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Изучение влияния морфологического строения междуречных пространств речных бассейнов малых рек на развитие эрозионно-аккумулятивных процессов и доставку наносов с пахотных земель в днища речных долин.

2. Оценка и прогноз развития линейных эрозионных форм рельефа на распаханых склонах междуречий.
3. Создание математической модели доставки наносов со склонов в днища долин для малых распахиваемых водосборов южного мегасклона Русской равнины.

Объект и состав исследования. Для решения поставленных задач в качестве объектов исследования были выбраны бассейны пяти рек, расположенных в пределах возвышенностей различных ландшафтных зон южного мегасклона Русской равнины: р. Калаус и р. Кума (юг степной зоны, Ставропольская возвышенность), р. Медведица (приток р. Дон) (Приволжская возвышенность, север степной зоны), р. Ведуга (Среднерусская возвышенность, лесостепная зона), р. Иж (Вятско-Камское междуречье, юг лесной зоны), а также малый водосбор «Святой источник» бассейна р. Плава (Среднерусская возвышенность, лесостепная зона).

Исследования проводились в рамках двух различных масштабов организации флювиального рельефа: в качестве среднего масштаба был выбран уровень речных бассейнов, которые по величине занимаемой площади могут считаться бассейнами малых рек; в качестве крупного масштаба рассматривался уровень элементарных склоновых водосборов. В рамках среднемасштабных исследований изучалось морфологическое строение междуречных пространств, которое оценивалось на основе влияния их морфологии на эрозионные процессы и перераспределение наносов. Крупномасштабные исследования участков междуречий в бассейнах рек Ведуги и Медведицы проведены с целью оценки динамики и прогноза развития линейных эрозионных форм на пашне. Изучена связь коэффициентов доставки наносов с морфометрическими характеристиками малых распахиваемых водосборов, расположенных в пределах южного мегасклона Русской равнины.

В качестве источников исходных данных для исследований в среднем масштабе использовались цифровые модели рельефа SRTM версии №3, для крупного масштаба – топографические карты масштаба 1:10 000 конца 1980-х годов и крупномасштабные космические снимки высокого разрешения Bing. Также использовались материалы камеральных и экспедиционных исследований НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета

МГУ им. М.В. Ломоносова, в сборе которых принимали участие автор и сотрудники кафедры ландшафтной экологии Казанского (Приволжского) федерального университета.

Научная новизна.

1. Разработана методика классификации междуречий по их эрозионному потенциалу рельефа и влиянию их морфологических особенностей на коэффициенты доставки наносов в постоянные водотоки, основанная на количественных показателях.
2. Усовершенствована методика оценки вероятности развития линейных эрозионных форм на распаханых междуречьях бассейнов малых рек с целью уточнения прогноза их линейного прироста.
3. Предложена эмпирическая математическая модель расчета коэффициента доставки наносов малых водосборов на основе их морфометрических характеристик, адаптированная для южного мегасклона Русской равнины.

Защищаемые положения.

1. Морфологический тип междуречий возвышенностей южного мегасклона Русской равнины не влияет на темпы плоскостного смыва на пашне.
2. Прирост линейных эрозионных форм рельефа на пашне определяется степенью расчлененности междуречных пространств и продолжительностью земледельческого освоения.
3. Коэффициент доставки наносов с пашни в гидрографическую сеть для водосборов южного мегасклона Русской равнины определяется их морфологией.

Личный вклад автора. Автором проведена количественная классификация рельефа междуречий речных бассейнов рек Калауса, Кумы, Ведуги, Ижа и Медведицы, дренирующих возвышенности южного мегасклона Русской равнины, расположенных на юге лесной, в лесостепной и степной зонах. Разработаны подходы к прогнозированию вероятности развития линейных эрозионных форм для распахиваемых склонов, которые реализованы для двух ключевых участков в бассейнах рек Ведуга и Медведица. Для малого водосбора «Святой источник» в бассейне р. Плава проведен комплекс полевых и камеральных исследований,

позволивший оценить баланс наносов. Автором разработана эмпирико-математическая модель расчета коэффициентов доставки наносов для малых, преимущественно распахиваемых, водосборов южного мегасклона Русской равнины.

Практическая значимость работы. Полученные результаты могут использоваться для оценки эрозионной опасности земель, оптимального выбора почвозащитных и водоохранных мероприятий при сельскохозяйственном использовании земель, а также для разработки стратегии землепользования и регулирования существующих видов землепользования. Разработанные подходы целесообразно применять при проведении экологических исследований, направленных на снижение поступления наносов и транспортируемых совместно с ними загрязняющих веществ в водотоки и водоемы.

Апробация. Основные результаты работы докладывались на следующих научных конференциях: Геоморфологические ресурсы и геоморфологическая безопасность: от теории к практике. Всероссийская конференция «VII Щукинские чтения» (Москва, 2015), 1st World Conference on Soil and Water Conservation under Global Change (CONSOWA) (Лерида, Испания, 2017), II-я Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Проблемы региональной экологии и географии» посвященной Году экологии и 55-летию высшего географического образования в Удмуртской республике (Ижевск, 2017), Национальная картографическая конференция — 2018 (Москва, 2018), «Ломоносовские чтения – 2019». Секция «География» (Москва, 2019), V Всероссийская научная конференции с международным участием «Закономерности проявления эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях» (Москва, 2019). В рамках подготовки диссертационной работы опубликовано 8 научных работ, в том числе 3 статьи в журналах из списка RSCI Web of Science и 5 тезисов докладов.

Объём и структура. Диссертационная работа состоит из 5 глав, введения, заключения (147 страниц текста), списка литературы (196 названий), содержит 49 рисунков и 11 таблиц.

Благодарности. Диссертационная работа выполнена в НИЛ лаборатории эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Автор выражает искреннюю благодарность доктору географических наук В.Н. Голосову за руководство при подготовке диссертационной работы, доктору географических наук В.Н. Панину за ценные советы и рекомендации, сотруднику кафедры картографии и геоинформатики А.Л. Энтину за участие в подготовке совместной публикации и ценные рекомендации, М.Д. Безуховой и Е.А. Безуховой за моральную поддержку, а также всему коллективу НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ им. М.В. Ломоносова.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Роль рельефа в развитии эрозионно-аккумулятивных процессов в речных бассейнах освоенных равнин: современное состояние и нерешенные проблемы

От рельефа земной поверхности зависит скорость и направление движение стекающей воды, которая напрямую влияет на характер протекания эрозионно-аккумулятивных процессов (Соболев, 1948).

Линейные эрозионные формы – овраги и промоины – одни из самых динамичных эрозионных форм рельефа на равнинах умеренного пояса. Скорость роста оврагов может достигать до нескольких десятков метров в год (Рысин, 1998), а сеть промоин, формирующаяся на пашне в днищах склоновых ложбин, значительно увеличивает потери почвы (Голосов и др., 1996). Прогнозирование развития линейных эрозионных форм на распахиваемых междуречьях является актуальной научной проблемой.

Темпы смыва увеличиваются на участках концентрации стока в промоинах, ложбинах и уменьшаются на участках внутрисклоновой аккумуляции (Воскресенский, 1971). Согласно проведенным исследованиям (Poesen et al., 1996; Poesen, Hooke, 1997; Martinez-Casasnovas, 2003) объёмы наносов, выносимых по склоновым промоинам могут достигать 44-80% от суммарных потерь почвы с пашни. Не до конца ясным остается вопрос влияния морфологии междуречных пространств на общую интенсивность смыва почвы в пределах распахиваемых междуречий.

Основная масса наносов в пределах земледельчески освоенных бассейнов в верхних звеньях флювиальной сети перераспределяется на склонах, в оврагах и

балках. Определение объемов материала, перемещаемого в пределах речного бассейна, является весьма трудоемкой задачей. Для ее решения существуют различные способы, одним из которых является оценка коэффициента доставки наносов (*sediment delivery ratio coefficient* далее *SDR*), определяемого как соотношение между наносами, доставленными к устью (или любому створу) водосбора (в т/км² в год), к суммарной эрозии на водосборе (в т/км² в год) (Maner, 1958; Walling, 1983) за любую единицу времени, начиная от эрозионного события и кончая периодом земледельческого освоения. Зная объём наносов, смытых с водосборных склонов в единицу времени и *SDR*, представляется возможным определить массу наносов, выносимых за пределы водосбора. Многие исследователи связывали *SDR* с морфометрическими параметрами рельефа (Maner, 1958; Roehl, 1962; Muthler, Bowie, 1975; Piest et al., 1975; Williams, 1977; Walling, 1983; Walling, Webb, 1983; Bagarello et al, 1991; Ferro, Porto, 1998; Van Rompaey et al., 2001; Golosov, Ivanova, 2002; Onyado et al., 2005), однако нерешенной проблемой остается влияние плановой формы малого водосбора на доставку наносов.

Глава 2. Методика исследований

В качестве объектов исследования выбраны пять бассейнов рек: р. Кума, р. Калаус, р. Ведуга, р. Медведица, р. Иж и малый водосбор «Святой источник» в бассейне р. Плава Тульской области (рис. 1).

Распаханность всех речных бассейнов, кроме бассейна р. Иж, превышает 40%, в бассейне р. Иж она составляет 16%, 55 процентов его площади занимают леса. Для этих объектов проводилась оценка влияния расчлененности междуречных пространств на развитие эрозионных процессов и потенциальную доставку наносов. Данные ключевые участки выбирались исходя из площади бассейна. Для каждого бассейна она не превышает 3500 км², что сопоставимо с площадью бассейна типичной малой реки. Кроме того, данные речные бассейны располагаются в нескольких ландшафтных зонах и имеют различные структуры землепользования.

В бассейнах рек «Медведица» и «Ведуга» на двух ключевых участках с одноименными названиями проводился прогноз развития линейных эрозионных форм. В качестве основной методики для проведения этого прогноза использовалась усовершенствованная и адаптированная методика, применявшаяся для горных

водосборов о. Сицилия (Conoscenti et al., 2013).



Рисунок 1 – Расположение объектов исследования в пределах южного мегасклона Восточно-Европейской равнины.

В качестве главного метода в ней применялся вероятностный подход, основанный на использовании набора морфометрических характеристик междуречий (крутизна, плановая кривизна, профильная кривизна, десятичный логарифм общей площади водосбора, максимальная длина линии тока, глубина расчленения). Результаты расчётов проверялись по данным фактических изменений протяжённости линейных эрозионных форм, полученных на основе дешифрирования космических снимков.

Для решения поставленных задач применялся широкий спектр полевых и камеральных методов. При оценке баланса наносов малого водосбора применялись

радиоцезиевый, почвенно-морфологический полевые методы, расчеты по эмпирико-математической модели USLE/ГГИ и метод крупномасштабного геоморфологического картографирования. Для выявления зависимости между SDR для малых распахиваемых водосборов и их морфологических характеристик использовались результаты оценок SDR, полученные ранее для малых водосборов, находящихся в различных природных зонах, отличающихся друг от друга морфологией, при этом использовался регрессионный анализ. Такой же анализ применялся и при изучении влияния морфологии междуречных пространств на эрозионные процессы.

Глава 3. Рельеф как фактор эрозионно-аккумулятивных процессов в бассейнах малых рек

Бассейны рек Калауса, Кумы, Медведицы, Ведуги и Ижа были разбиты на сеть элементарных водосборов, в пределах каждого из которых произведена оценка расчлененности рельефа на основе четырех показателей.

1) Густота овражно-балочной сети (Спиридонов, 1975; Мальцев, Шарифуллин, 2017):

$$G = \frac{\sum l_b}{F}, \quad (1)$$

где $\sum l_b$ – сумма длин тальвегов временных и постоянных водотоков в пределах элементарного водосбора (м),

F – площадь элементарного водосбора (км^2).

2) Среднеквадратичное отклонение абсолютной высоты – H_{std} (Якименко, Дмитриев, 1990).

3) Индекс расчлененности, dissection index (Singh, Dubey, 1994):

$$D_{is} = (H_{\text{max}} - H_{\text{min}}) : ((H_{\text{max}} + H_{\text{min}}) / 2), \quad (2)$$

где H_{max} – максимальная высота водосбора (м),

H_{min} – минимальная высота водосбора.

4) Коэффициент объема, V_r (Beg, 2015):

$$V_r = \frac{V_1}{V_2}, \quad (3)$$

где V_1 – объем водосбора между поверхностью водосбора и ее проекцией на горизонтальную плоскость,

V_2 – объем, равный произведению проекции поверхности водосбора на горизонтальную плоскость на амплитуду абсолютных высот водосбора (рис. 2).

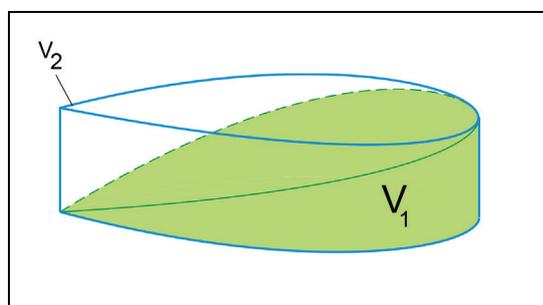


Рисунок 2 – Наглядное изображение аргументов в формуле коэффициента объема.

V_r может принимать значения только в пределах от 0 до 1. Чем ближе V_r к единице, тем менее денудирован водосбор.

Для всех элементарных водосборов исследуемых речных бассейнов рассчитывался коэффициент объема. Кроме того, строились продольные профили главных тальвегов водосборов. Полученные значения коэффициента объема могут использоваться для автоматизированного разделения элементарных водосборов на водосборы с выпуклым, вогнутым и прямым продольным профилем. Следовательно, представляется возможным выделить морфологические типы водосборов, влияющим на интенсивность смыва – концентрирующие сток, рассеивающие сток и прямые (Литвин, 2002). Водосборы, рассеивающие сток, имеют значение $V_r > 0.55$, прямые – $0.45 < V_r < 0.55$, концентрирующие сток – $V_r < 0.45$.

Путем сравнения четырех упомянутых выше морфометрических параметров, установлено, что коэффициент объема по сравнению с остальными имеет более значимые географические закономерности распределения. Водосборы с высокими значениями V_r имеют выпуклый продольный профиль, с низким – вогнутый и часто бывают приурочены к речным долинам. Поэтому данный показатель может использоваться для количественной оценки расчлененности междуречий.

Для определения зависимости между типом эрозионного расчленения и коэффициентом объема были смоделированы все морфологические типы междуречных пространств. Путем оцифровки иллюстрации из монографии С.С. Соболева (1948) получены точные поперечные профили выделенных типов

междуречных пространств. В трехмерном редакторе из этих профилей построены поверхности, которые затем были преобразованы в объемные тела (рис. 3).

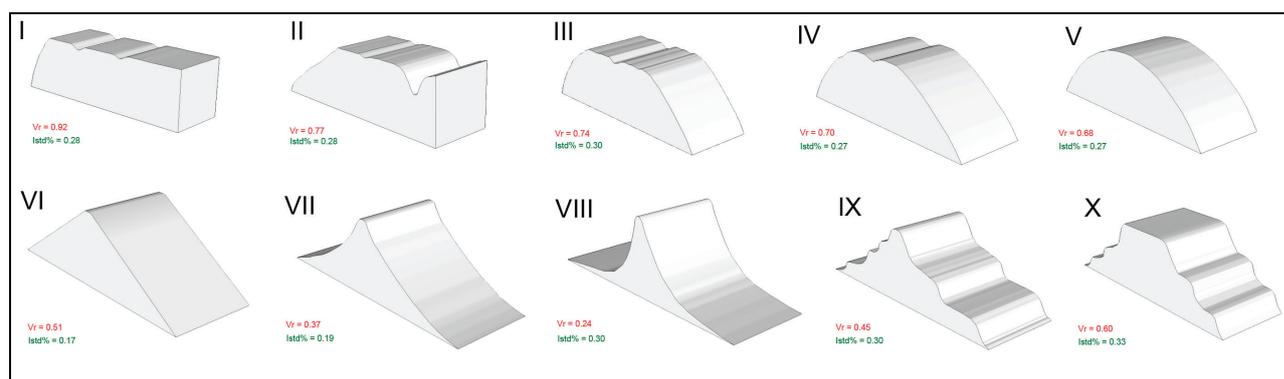


Рисунок 3 – Морфологических типы междуречных пространств южного мегасклона Русской равнины, выделенные на основе классификации С.С. Соболева.

Для каждого типа междуречных пространств рассчитан объемный коэффициент (V_r). Путем сопоставления значений объемного коэффициента с типами водосбора с I по VIII, установлено, что чем больше объемный коэффициент, тем менее пенепленизировано междуречное пространство. В результате проведено ранжирование междуречий, при котором также учитывалось среднее квадратическое отклонение уклона, отнесенное к амплитуде уклонов ($I_{std}\%$) (рис. 3). Оно во многом отражает историю развития рельефа в доагрикультурный период. Отличительным признаком междуречий IX и X типов (рис. 3) является ступенчатость склонов. Данные междуречные пространства, при прочих равных условиях, имеют более контрастный, отличающийся большим разнообразием уклонов рельеф по сравнению с междуречьями остальных типов. Междуречные пространства II-V типов сравнительно мало отличаются, если проводить их сравнение на основе используемых для ранжирования показателей, что позволяет сократить число типов междуречий до 7. Относительный малый диапазон уклонов пахотных земель, расположенных в пределах междуречий различных типов предопределяет отсутствие зависимости темпов плоскостного и ручейкового смыва от типа междуречных пространств. В тоже время тип междуречных пространств определяет густоту и структуру линейных форм рельефа (ложбин и потяжин) полигенетического происхождения. Однако они не в полной мере отражены ЦМР SRTM, которая использовалась для среднемасштабных оценок темпов смыва.

Чтобы оценить потенциальную эрозионную опасность распаханых земель

элементарных водосборов, с помощью эмпирико-математической модели USLE/ГГИ (Ларионов, 1993) рассчитывались среднегодовые темпы смыва почвы. В качестве входных данных для этой модели в блоке рельефа применялись цифровые модели рельефа SRTM разрешением около 30 метров на пиксель. Данные о почвах использовались из единого государственного реестра почвенных ресурсов (Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. URL: <http://info-soil.ru>), классификации почв по смываемости (Белоцерковский и др., 1983; Кирюхина, Пацукевич, 1987, 1989). Климатические данные, заложенные в модель, представляют собой величины запасов воды в снеге (Литвин, 2002) и эрозионного потенциала осадков (Ларионов, 1993). Расчет темпов смыва почвы производился с допущением о том, что все распахиваемые территории исследуемых речных бассейнов находятся под паром (рис. 4).

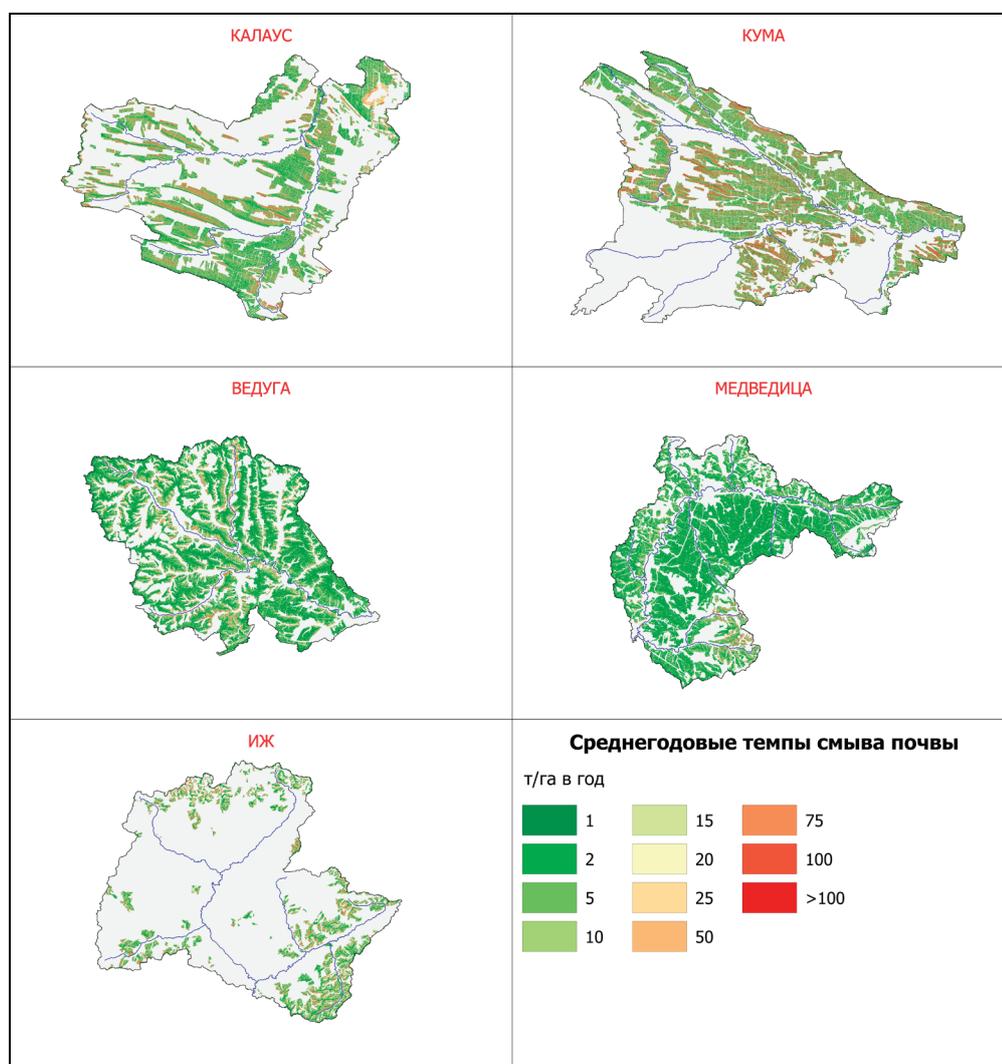


Рисунок 4 – Среднегодовые темпы смыва почвы на пашне для исследованных речных бассейнов

Для каждого из речных бассейнов по цифровым моделям рельефа рассчитаны значения коэффициента объема. Расчеты производились по матрицам высот по методу «скользящего окна» размером 3x3 пикселя. Полученные результаты сопоставлялись с расчетами интенсивности смыва, выполненными по эмпирико-математической модели USLE/ГГИ. В результате такого сопоставления получены графики зависимости темпов смыва почвы от коэффициента объема, отражающего тип расчленения междуречий по классификации С.С. Соболева. Согласно этим результатам, максимальная интенсивность смыва наблюдается при коэффициентах объема от 0.45 до 0.65 для всех речных бассейнов. При величинах коэффициента от 0.8 до 1.0 и менее 0.4, интенсивность смыва постепенно снижается.

Глава 4. Рельеф как фактор эрозионно-аккумулятивных процессов на малых водосборах

Склоны распаханых междуречий часто осложняются линейными эрозионными формами рельефа – ложбинами, промоинами и оврагами, в пределах которых может формироваться и проходить достаточно интенсивный сток наносов. По своей сути линейные эрозионные формы рельефа являются главными тальвегами своих водосборов. Такие малые водосборы часто являются сильно вытянутыми в длину, отчего их тальвеги располагаются достаточно близко друг к другу, что затрудняет выделение границ водосборов. Исходя из этого, для прогноза развития линейных эрозионных форм использовался вероятностный подход в сочетании с цифровым моделированием рельефа.

В пределах бассейнов рек Ведуга и Медведица выделено по ключевому участку, различающихся своим геоморфологическим строением. Участок «Медведица» в центральной части представляет собой пологий макросклон, плавно переходящий в приводораздельное пространство, расчленённый густой сетью длинных вытянутых ложбин, иногда образующих между собой древовидную сеть. Несмотря на значительную амплитуду высот (до 100 метров), рельеф данного участка является менее контрастным, чем рельеф участка «Ведуга», в строении которого четко выделяются придолинная (южная и северная) и центральная части междуречного пространства. Густота расчленения участка «Ведуга» ложбинно-промоиной сетью значительно меньше, чем участка «Медведица», что обусловлено историей развития

рельефа территорий и связано с литологическим составом подстилающих пород.

Для указанных ключевых участков рассчитаны вероятности развития линейных эрозионных форм рельефа – ложбин и крупных промоин (рис. 5).

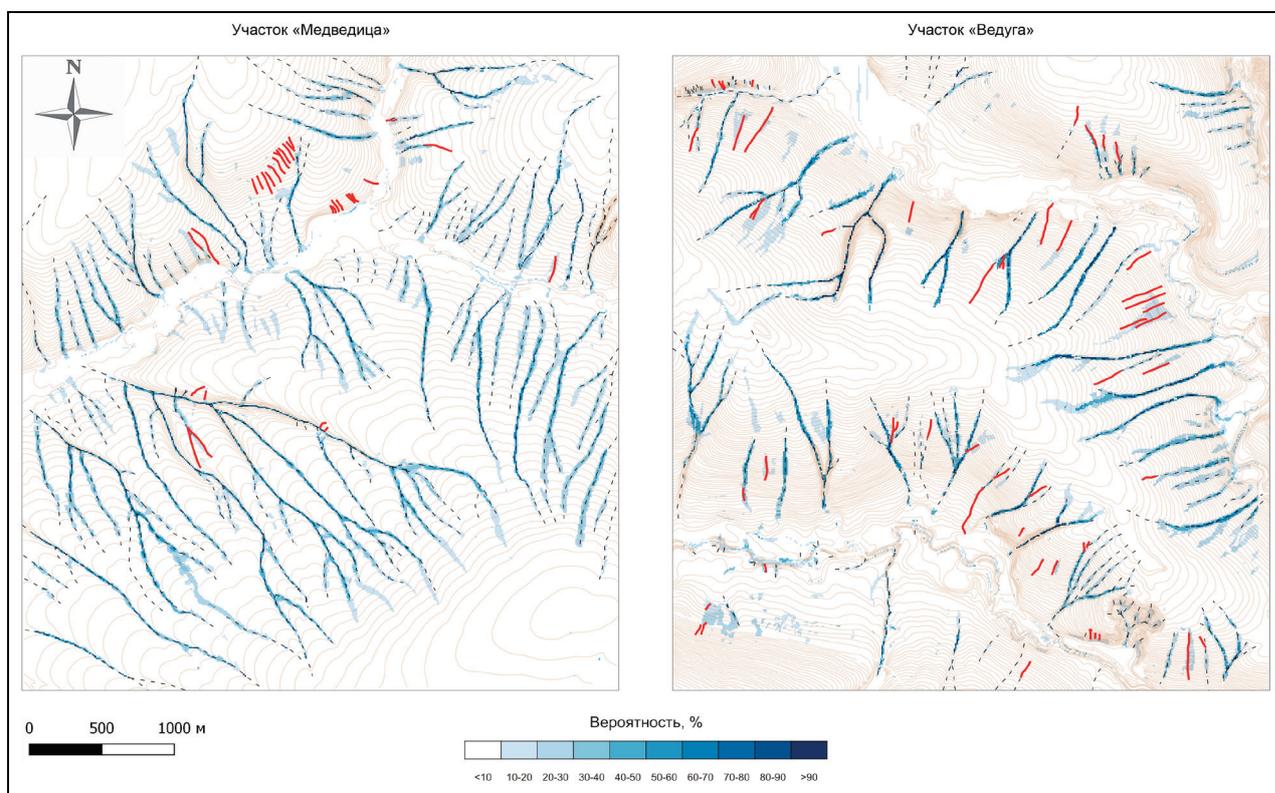


Рисунок 5 – Распределение вероятностей формирования и развития линейных эрозионных форм рельефа на участках «Медведица» и «Ведуга». Пунктирными линиями обозначены тальвеги, использованные для вычисления вероятности. Красными линиями обозначены тальвеги линейных эрозионных форм по данным дешифрирования космических снимков.

При сравнении между собой карт, полученных на основе расчета, и фактической структуры эрозионных форм на склонах выявлено, что полученное пространственное распределение вероятности формирования линейных эрозионных форм рельефа в пределах междуречных пространств в целом отражает уже существующую структуру ложбинной сети.

Это является следствием построения ложбин для формирования, так называемой «тренировочной выборки» на основе тех же исходных данных, что были использованы для построения ЦМР. Полученные значения вероятности позволяют прогнозировать развитие новых линейных эрозионных форм.

Наибольший интерес для прогноза представляют собой области со значениями

вероятности развития линейных эрозионных форм 10-30%, образующие некую пространственную структуру – потенциальный тальвег и/или водосбор новой линейной формы. Участки с вероятностью формирования ложбин более 30%, по сути, полностью сосредоточены в пределах уже сформированных ложбин. Участки с вероятностью формирования линейных эрозионных форм менее 10% являются фоновыми и распространены повсеместно на обоих участках независимо от их геоморфологического строения.

Данные вероятности были рассчитаны по цифровым моделям рельефа, построенным на основе оцифровки топографических карт 1986-1988 годов. Для того чтобы оценить фактический прирост линейных эрозионных форм рельефа на ключевых участках за последние 30 лет, проводилось дешифрирование детальных космических снимков, полученных при съёмках 2015-2016 годов. Установлено, что за прошедшие 30 лет прирост линейных эрозионных форм рельефа составил 12% для участка «Ведуга» и 5% для участка «Медведица» от общей протяжённости существовавшей в 1986-1988 годах сети линейных форм эрозионного происхождения.

Среди сформировавшихся за примерно 30-летний период линейных эрозионных форм рельефа обнаружено, что тальвеги природно-антропогенных оврагов, возникшие в южной части участка «Ведуга», приурочены к небольшим фрагментам с вероятностью формирования линейных форм рельефа 10-30%. Области развития параллельных промоин, обнаруженные в северной части участка «Медведица», располагаются на участках с вероятностью формирования линейных форм менее 10%, что объясняется их вероятным заложением по разъёмным бороздам при распашке. Тальвеги в приистоковых частях существующих ложбин как на участке «Медведица», так и на участке «Ведуга» также практически не обнаруживаются в районах с вероятностью развития эрозионных процессов более 10%.

Выполненная количественная оценка интенсивности перераспределения наносов за период с 1986 г. на малом водосборе «Святой источник», расположенном в бассейне р. Плава в Тульской области в зоне интенсивного радиоактивного загрязнения чернбыльским цезием-137, позволила оценить баланс наносов для данного водосбора за период 1986-2013 (рис. 6). Установлено, что около 80% материала, эродированного с распаханых склонов, выносится за пределы водосбора

«Святой источник» и поступает в днище долины р. Плавы.

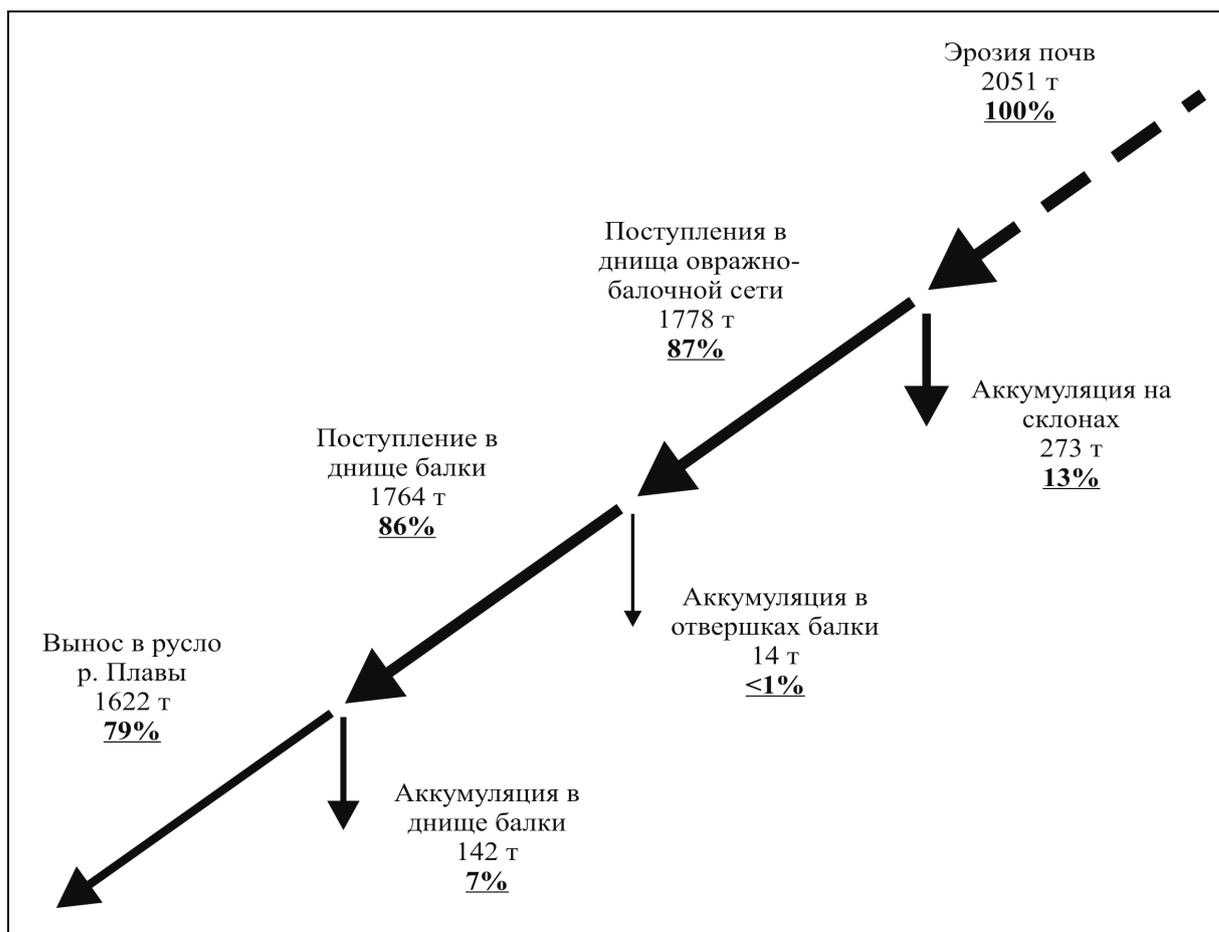


Рисунок 6 – Баланс наносов для водосбора «Святой источник» за период 1986 – 2013 годы.

Оценка коэффициента доставки наносов для водосбора «Святой источник» была дополнительно включена в статистическую совокупность коэффициентов доставки наносов, полученных для 26 ранее исследованных малых водосборов центральной и южной части Русской равнины, расположенных в различных ландшафтных зонах. Для количественной оценки влияния рельефа водосбора на долю выносимого через устьевой створ материала была определена степень линейной связи между морфометрическими характеристиками водосбора и коэффициентом доставки наносов.

Это осуществлялось с помощью построения регрессионных уравнений вида $SDR=f(x)$, где x – значение какого-либо параметра, для каждого морфометрического показателя в отдельности, и вычисления коэффициента корреляции (в среде Microsoft Excel). Таким образом, определялись морфометрические характеристики, имеющие наибольшее влияние на коэффициент доставки наносов. Было установлено, что

наибольшую среди остальных параметров, но недостаточную для построения расчетного уравнения, степень линейной связи с SDR имеют средняя крутизна, площадь и периметр малого водосбора. Таким образом, искомое соотношение является функцией вида $f(F, P, H)$, где F – площадь водосбора (км^2), P – его периметр (км), H – абсолютная высота (м). Кроме того, выдвинуто предположение, что, при прочих равных условиях, средний уклон водосбора (I_a) оказывает наибольшее влияние на количество выносимых наносов за пределы водосбора. Средний уклон водосбора определяется как отношение амплитуды абсолютных высот к длине (прямая линия, соединяющая исток и устье) водосбора. На основе этого предположения можно заключить, что средний уклон водосбора можно выразить через площадные характеристики. Выявлено, что средний уклон водосбора прямо пропорционален его плановой форме, которая описывается коэффициентом округлости k_c (Miller, 1953):

$$I_a \sim k_c, \text{ где } k_c = 4\pi F/P^2 \quad (4)$$

Чем больше коэффициент округлости, тем ближе плановая форма водосбора приближается к окружности, а чем он меньше, тем более вытянутую форму имеет водосбор.

С помощью построения регрессионных уравнений вида $SDR = f(I_a)$, где I_a – средний уклон водосбора, и вычисления коэффициента корреляции установлена зависимость (рис. 7).

Соотношение $SDR \sim I_a$ имеет коэффициент корреляции примерно равный 0,7 (рис.7). Установлено, что:

$$SDR \sim \Delta H P / 4F \quad (5)$$

где: ΔH – амплитуда абсолютных высот водосбора.

Используя полученное уравнение регрессии, была получена расчетная формула для коэффициента доставки наносов:

$$SDR = 0,234 (\Delta H P / 4F)^{1,375} \quad (6)$$

Данное уравнение содержит в себе кроме площадной характеристики показатели формы водосбора (периметр) и показатель его потенциальной энергии (амплитуда абсолютных высот).

Рассчитанные по формуле (6) SDR для исследованных полевыми методами 27

малых водосборов весьма близки к оценкам SDR, полученным по результатам полевых исследований.

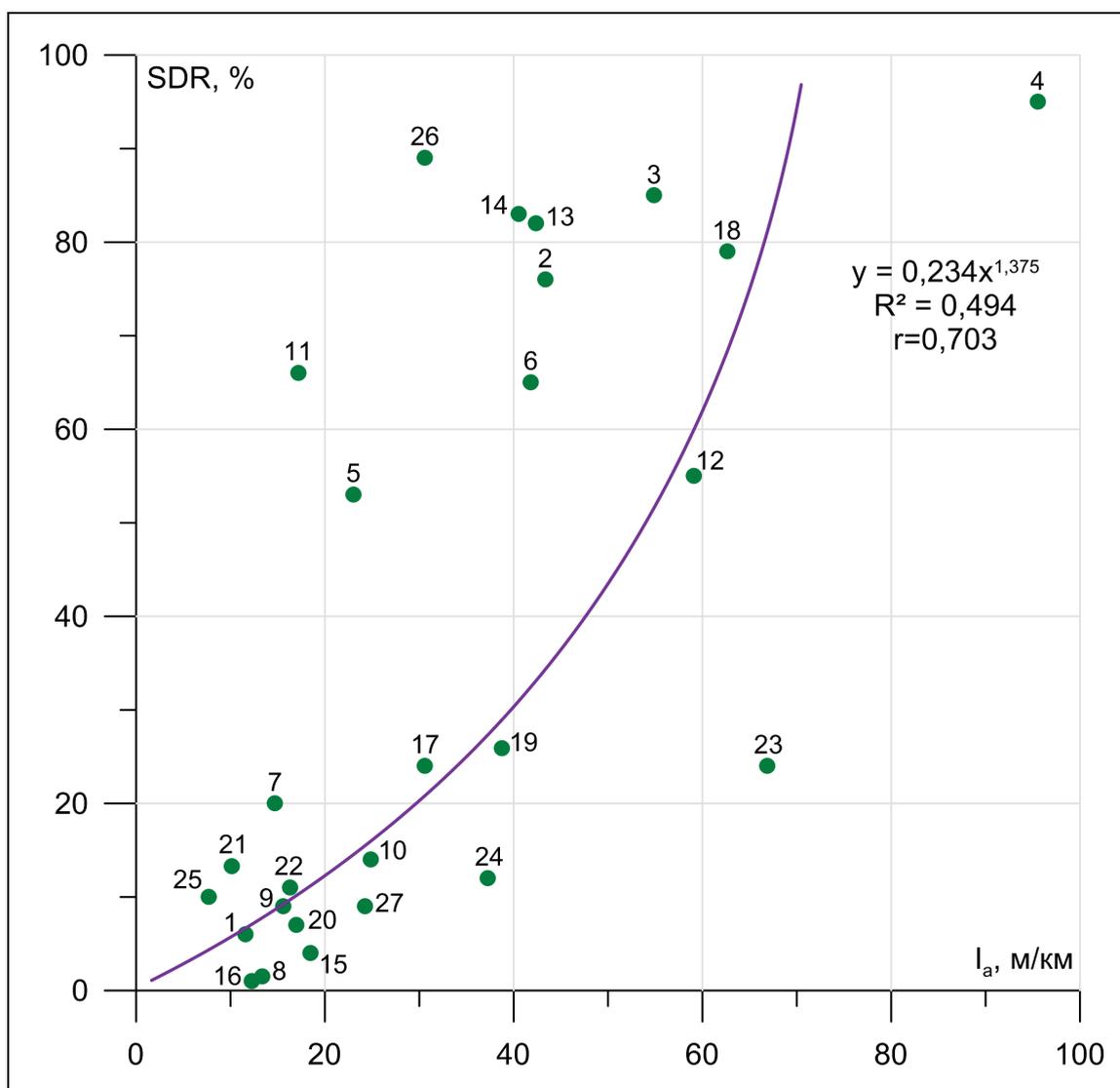


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента доставки наносов от среднего уклона водосбора. По оси X – значения среднего уклона, по оси Y – значения коэффициента доставки. Цифрами обозначены порядковые номера водосборов.

Около половины расчётных значений отклоняются от значений SDR, полученных полевыми методами, не более чем на $\pm 10\%$. При этом наиболее значительные отклонения наблюдаются для определенных полевыми методами SDR, как правило, превышающих 50%. Это связано со значительным разбросом исходных данных в этой области.

Независимые переменные, которые входят в расчетную формулу SDR, отражают наиболее важные характеристики водосбора: площадь в сочетании с периметром входят в расчетную формулу коэффициента округлости, выражая тем

самым плановую форму водосбора, амплитуда высот отражает энергетический потенциал рельефа. При этом коэффициент доставки обратно пропорционален площади (Jinze, Qingmei, 1981; Walling, 1983; Голосов, 2006): чем больше площадь водосбора, тем меньше относительное количество материала, выносимого из него через устье. В предлагаемой формуле учтена и другая важная закономерность: чем больше амплитуда высот, тем больше объем материала, выносимого за пределы водосбора.

Глава 5. Оптимизация размещения пахотных земель на основе количественных оценок потенциального смыва почвы и расчёта коэффициентов доставки наносов

Тенденции сельского хозяйства последних лет, связанные с химизацией, увеличением площади пашни, изменениями в севообороте, ставят вопрос о сохранении плодородия почв и снижения загрязнения поверхностных вод, для решения которых необходим комплекс различных мероприятий, которые должны выбираться исходя из особенностей развития эрозионно-аккумулятивных процессов каждой конкретно взятой территории. Поэтому полученные в нашем исследовании результаты имеют прикладное значение и могут использоваться для оптимизации землепользования и решения вышеупомянутых геоэкологических проблем на среднемасштабном уровне, что является промежуточным этапом при выделении территорий в пределах речных бассейнов, требующих повышенного внимания в части сохранения плодородия почв и снижения загрязнения поверхностных вод. Более точные рекомендации по проведению противоэрозионных и водоохраных мероприятий могут быть даны только в результате крупномасштабных изысканий.

Для изучаемых речных бассейнов по расчетной формуле (6) рассчитаны потенциальные коэффициенты доставки наносов малых водосборов. На основе этих данных, а также данных о потенциальных темпах смыва почвы (гл. 3) проведена типизация малых водосборов бассейнов малых рек по потенциальной эрозионной опасности и потенциальной доставке наносов (рис. 8).

Выполненная типизация для исследованных речных бассейнов позволила дать рекомендации по проведению противоэрозионных и водоохраных мероприятий, а также оптимизации структуры землепользования, т.е. уменьшению или увеличению площади пахотных земель, выведению из оборота наиболее эрозионноопасных

участков.

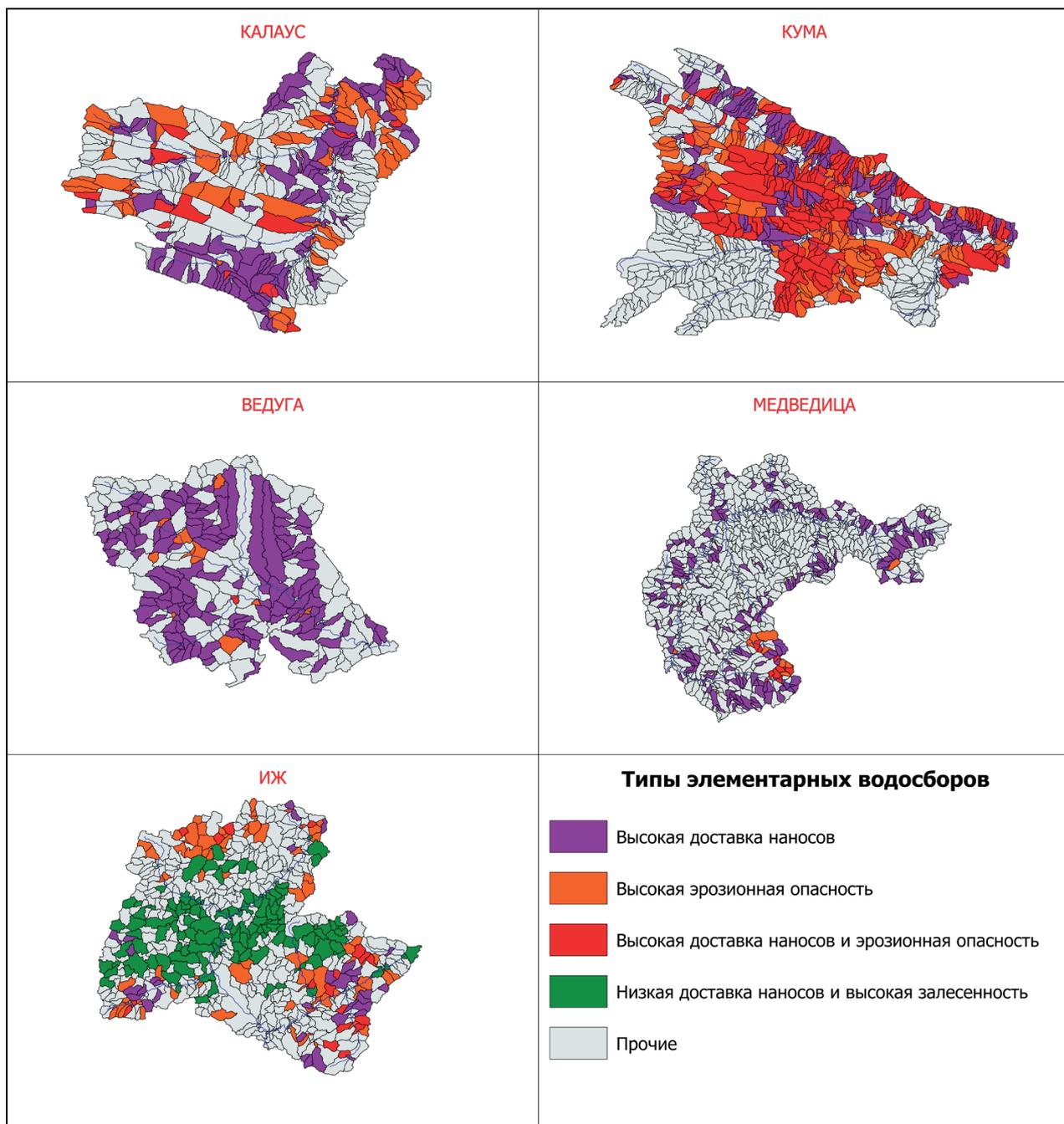


Рисунок 8 – Типизация элементарных водосборов по потенциальной эрозионной опасности и влиянию смыва на качество поверхностных вод для исследованных речных бассейнов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе использования ряда морфометрических параметров количественно охарактеризованы различные типы междуречий возвышенностей

южного мегасклона Русской равнины, выделенных согласно классификации С.С. Соболева (1948). Установлено, что в приложении к решению задач по оценке плоскостного и ручейкового смыва на пахотных склонах морфологические различия различных типов междуречий не играют существенной роли в связи со сравнительно небольшим диапазоном уклонов склонов, характерных для обрабатываемых земель южного мегасклона Русской равнины. Различия в величинах суммарных потерь почвы от эрозии для междуречий различного типа в основном обусловлены густотой линейных эрозионных форм (ложбин и потяжин), имеющих полигенетическое (доагрикультурное и антропогенное) происхождение.

2. Адаптирована для условий южного мегасклона Русской равнины методика прогноза развития линейных эрозионных форм на пахотных землях. Данная методика применена для тех же двух распахиваемых длительное время участков в бассейнах рек Ведуга и Медведица. Установлено, что зоны с вероятностью формирования малых эрозионных форм более 30% практически полностью сосредоточены в местах расположения существующих тальвегов ложбин. Точность прогноза формирования новых промоин при использовании данной методики для конкретного участка междуречий зависит от площади междуречных пространств, ещё не затронутых процессами линейной эрозии. Значения вероятности в диапазоне от 10% до 30% в некоторых случаях совпадают с новыми линейными формами, образовавшимися за последние 30 лет.

3. На основе сопоставления ЦМР, построенной на основе топографических карт масштаба 1 :10 000 (съёмка-1986-1988 гг.) и дешифрирования космоснимков высокого разрешения 2016 г. для двух, обрабатываемых длительное время, участков в бассейнах рек Ведуга и Медведица, характеризующихся различной морфологией междуречных пространств и историей земледельческого освоения, установлено, что прирост сети линейных эрозионных форм на пашне составил 6300 м и 4700 м , что составляет соответственно 12% и 5% от протяжённости имевшейся на 1986-1988 гг. сети. Незначительный прирост сети крупных промоин за последние 30 лет указывает на невысокие темпы смыва в целом на данных участках пашни.

4. Для малого водосбора «Святой источник», расположенного в бассейне р. Плавы (Плавское плато, Среднерусская возвышенность) на основе набора полевых и аналитических методов и расчётов по эрозионным моделям оценены темпы

перераспределения наносов за период с 1986 г. и рассчитан коэффициент доставки наносов. На основе данных по перераспределению наносов на этом водосборе и 26 ранее изученных малых водосборов, находящихся в различных физико-географических условиях, получена зависимость коэффициента доставки наносов для малых распахиваемых водосборов южного мегасклона Русской равнины от их морфометрических характеристик, включая их плановую конфигурацию, относительное превышение и площадь. Её применение в сочетании с расчётными данными темпов смыва на малых водосборах позволяет типизировать малые водосборы по потенциальной эрозионной опасности и влиянию смыва на качество поверхностных вод в пределах речных бассейнов, что можно использовать при разработке схем почвозащитных и водоохраных мероприятий.

Публикации по теме диссертации

Статьи в журналах в изданиях из списка RSCI Web of Science:

1. **Безухов, Д.А.**, Беляев, В.Р., Иванова, Н.Н. Количественная оценка интенсивности и направленности эрозионно-аккумулятивных процессов на обрабатываемых склонах в пределах бассейна р. Плава (Тульская область) / Д.А. Безухов, В.Р. Беляев, Н.Н. Иванова // Вестник МГУ. Сер. 5. География. – М.: Изд-во МГУ. – 2014. – № 6. – с. 16–23. (пятилетний импакт-фактор РИНЦ 0,733)

2. **Безухов, Д.А.**, Голосов, В.Н., Панин, А.В. Оценка коэффициента доставки наносов малых водосборов в лесостепных и степных районах Восточно-Европейской равнины / Д.А. Безухов, В.Н. Голосов, А.В. Панин // Изв. РАН. Сер. геогр. — М.: изд-во РАН. — 2019. — № 4. — с. 73–84. (пятилетний импакт-фактор РИНЦ 0,899)

3. **Безухов, Д.А.**, Энтин, А.Л. Вероятностный подход к прогнозированию формирования промоинной сети в пределах распахиваемых междуречий / Д.А. Безухов, А.Л. Энтин // Вестник МГУ. Сер. 5. География. — М.: Изд-во МГУ. — 2019. — №5. — с. 39–49. (пятилетний импакт-фактор РИНЦ 0,733)

Статьи и тезисы докладов в других научных изданиях:

1. Безухов, Д.А., В.Р. Беляев, В.Р., Иванова, Н.Н. Влияние морфометрии водосбора на коэффициент доставки наносов / **Д.А. Безухов**, В.Р. Беляев, Н.Н. Иванова // Геоморфологические ресурсы и геоморфологическая безопасность:

от теории к практике: Всероссийская конференция VII Шукинские чтения. — М.: МАКС Пресс. — 2015. — с. 384–386

2. Golosov, V., Gusarov, A., Ivanov, M., Maltsev, K., Sharifullin, A., **Bezukhov, D.** Assessment of soil erosion rates in two agricultural regions of European Russia for the last 50 years in the various scales / V. Golosov, A. Gusarov, M. Ivanov et al. // Book of Abstract of the 1st World conference on Soil and Water Conservation under Global Change — CONSOWA. — Department de Medi Ambient Lleida, Spain. — 2017. — pp. 114–114

3. **Безухов, Д.А.** Прогноз развития эрозионной сети средствами геоинформационного анализа / Д.А. Безухов // Сборник тезисов Всероссийской научной конференции Национальная картографическая конференция — М.: Географический факультет МГУ. — 2018. — с. 44–46

4. **Безухов, Д.А.** Анализ расчлененности рельефа водораздельных пространств в бассейнах малых рек Русской равнины / Д.А. Безухов // Материалы Международного молодежного научного форума ЛОМОНОСОВ-2019. [Электронный ресурс]. — М.: МАКС Пресс. — 2019. Режим доступа: https://lomonosovmsu.ru/archive/Lomonosov_2019/data/15904/90940_uid264144_report.pdf

5. **Безухов, Д.А.** Количественная оценка расчлененности рельефа бассейнов малых рек южной части Русской равнины / Д.А. Безухов // Закономерности проявления эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях. Материалы V Всероссийской научной конференции с международным участием (3-6 сентября 2019 г.). — М.: ЛЕНАНД М. — 2019. — с. 104–105