

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
М.В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
ПОЧВЕННЫЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ В.В. ДОКУЧАЕВА
ОТДЕЛ АГРОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ПОЧВ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ
АГРОЛАНДШАФТОВ

На правах рукописи

Лозбенев Николай Игоревич

**Провинциальные различия структурно-функциональной организации
почвенного покрова лесостепи Восточно-Европейской равнины**

Специальность 1.6.12 – Физическая география и биогеография,
география почв и геохимия ландшафтов

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научные руководители:
Доктор географических наук, профессор, член-корр. РАН
К. Н. Дьяконов;
Кандидат географических наук
Д.Н. Козлов

Москва – 2024

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
1. СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА И ПОДХОДЫ К ЕЁ ИЗУЧЕНИЮ.....	7
1.1. Представление о структурно-функциональной организации почвенного покрова и геосистем	7
1.2. Структурно-функциональная организация почвенного покрова лесостепи Восточно-Европейской равнины.....	14
1.3. Методическая основа моделирования структурно-функциональной организации почвенного покрова и её ограничения.....	17
1.4. Структурно-функциональный анализ ландшафта в научно-прикладных исследованиях	23
2. РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЛАНДШАФТОВ ЛЕСОСТЕПИ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ РАВНИНЫ.....	27
2.1. Ландшафты лесостепи Среднерусской возвышенности	30
2.2. Ландшафты лесостепи Окско-Донской низменности	40
2.3. Ландшафты лесостепи Бугульминско-Белебеевской возвышенности	47
3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	51
3.1. Методология выявления межкомпонентных связей методами цифровой почвенной картографии	51
3.2. Материалы и факторно-индикационная основа модели для Среднерусской возвышенности.....	57
3.3. Материалы и факторно-индикационная основа модели для Окско-Донской низменности	65
3.4. Материалы и факторно-индикационная основа модели для Бугульминско-Белебеевской возвышенности	70
4. СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ЛЕСОСТЕПИ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ РАВНИНЫ	73
4.1. Структурно-функциональная организация почвенного покрова Среднерусской возвышенности.....	73
4.2. Структурно-функциональная организация почвенного покрова Окско-Донской низменности	98
4.3. Структурно-функциональная организация почвенного покрова Бугульминско-Белебеевской возвышенности	111
5. ПРОВИНЦИАЛЬНЫЕ РАЗЛИЧИЯ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ЛЕСОСТЕПИ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ РАВНИНЫ.....	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	132
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	132

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. По мере развития науки не ослабевает потребность в региональной оптимизации взаимоотношений природы и общества. Расширение полноты, точности и оперативности описании морфологической структуры ландшафта востребовано в задачах региональной оптимизации межхозяйственного и внутрихозяйственного землеустройства (Николаев, 1970; Зворыкин, 1985; Кирюшин, 2005; Волков, 2020), ландшафтного планирования (Хорошев, 2012), градостроительного проектирования (Кочуров и др., 2018) и охраны окружающей среды (Чижова и др., 2016).

Последовательное развитие географической картины мира сопровождается переходом от понимания особенностей природных и природно-антропогенных систем на качественном уровне к количественному описанию структурно-функциональной организации и сценарному моделированию их поведения в условиях естественных и социально-экономических изменений (Арманд, 1975).

Расширение состава моделей и включение функциональных показателей является шагом к сценарному моделированию в географических науках, позволяющему в будущем принимать оперативные управленческие решения для адаптации землепользования к глобальным и региональным вызовам (Иванов и др., 2021).

Это стало возможно благодаря развитию цифровых технологий сбора пространственно-временных данных (Берлянт, и др. 2004; Пространственные..., 2020), методов их согласованного численного анализа (Landscape patterns..., 2019), что ознаменовало переход от качественных моделей морфологической структуры ландшафтов (Солнцев, 1949; Мильков, 1961; Гвоздецкий, 1986; Исаченко 1988) к количественным моделям их структурно-функциональной организации (Пузаченко, 2004б; Черкашин и др., 2005; Линник, 2008; Макунина, 2010; Хорошев, 2016; Сысуев, 2019; Викторов и др., 2024; Wu, 2008; Shary, 1995; Minasny et.al., 2016; Hengl, MacMillan, 2019). Убедительные перспективы численного описания межкомпонентных связей (Пузаченко, 2011, Хорошев, 2016; Ervin, 2001) и цифрового картографирования (Пузаченко и др., 2004а; Козлов и др., 2008; Кренке, 2011; Савин и др., 2019; Almaki et.al., 2022; Chen et.al., 2022) на уровне отдельных регионов открывают возможности объективного межрегионального сравнения организации ландшафтной оболочки на единых методических позициях.

Развитие имитационных моделей природных процессов расширяет факторно-индикационную основу цифрового картографирования за счет включения количественных показателей процессов ландшафтной дифференциации (Mitas, Mitasova, 1998; Van Oost et.al., 2000), что позволяет повысить качество и полноту описания ландшафтной структуры. В связи с этим приобретают актуальность исследования, связывающие факторы и процессы

ландшафтной дифференциации с фактически наблюдаемым разнообразием почв в моделях межкомпонентных связей. Составленные на единой методической основе, они позволят описать причины различий структур почвенного покрова физико-географических провинций.

Это направление укладывается в утвержденные положения Стратегии НТР РФ (в редакции 2024 года), в том числе, включающие требования по смягчению и адаптации к естественным и антропогенным изменениям окружающей среды, реализацию природного и производственного потенциала земель с учетом ландшафтного разнообразия на основе моделей отношений факторов-процессов и свойств в пространстве и времени для повышения эффективности сельского хозяйства. При этом цифровизация науки о ландшафте сегодня сталкивается с рядом постепенно решаемых проблем (по: Хорошев, 2017): региональная специфика межкомпонентных отношений обуславливает сложность в количественном объяснении межрегиональных различий; разделения вкладов факторов и процессов в ландшафтную дифференциацию и интеграцию; полимасштабная организация и полиструктурность ландшафта; обоснованность критериев выделения границ ПТК.

Цель работы - установить закономерности региональных различий компонентного состава и функционирования почвенного покрова лесостепи Восточно-Европейской равнины на основе моделирования межкомпонентных связей с применением цифровых технологий крупномасштабного почвенно-ландшафтного картографирования.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Обосновать порядок и схему описания и сравнения провинциальных особенностей структурно-функциональной организации почвенного покрова;
2. Разработать численные модели структурно-функциональной организации структуры почвенного покрова Среднерусской, Окско-Донской и Бугульминско-Белебеевской лесостепных провинций и оценить различия в составе, площадях и функциональных показателях их морфологических единиц;
3. Выявить причины различий структурно-функциональной организации почвенного покрова лесостепи Среднерусской, Окско-Донской и Бугульминско-Белебеевской провинций.

Методология исследования. В работе используется понятийная база, общие подходы и конкретные методики, разработанные в рамках учений о природных и природно-антропогенных ландшафтах в рамках структурно-генетического (Солнцев, 1949; Николаев и др., 2008) и ландшафтно-типологического (Мильков, 1966; Михно и др., 2020) подходов, крупномасштабной почвенной картографии в методологии структур почвенного покрова (Фридланд, 1972; Сорокина, 2006), представлений о структурно-функциональной

организации ландшафтов (Герасимов, 1975; Солнцев, 1997; Козловский, 2003; Макунина, 2010), цифрового картографирования и моделирования (Пузаченко, 2004б; Цифровая почвенная картография..., 2012; McBratney et. al., 2003) на базе геоинформационных технологий пространственного анализа (Линник, 2008), эмпирического и имитационного моделирования природных процессов (Mitas, Mitasova, 1998; Van Oost et.al., 2000).

Материалы и методы исследования. В работе использованы материалы государственного фонда данных, полученных в результате проведения землеустройства, архивные и собственные ландшафтные описания автора, методические руководства по проведению статистического и геоинформационного анализа. В работе использовались сравнительно-географический, картографический, геоинформационный, статистический методы. Выполнены полевые ландшафтные исследования и применена группа методов цифрового картографирования геосистем, эмпирического и имитационного физико-математического моделирования на основе программных комплексов GrassGIS, GlobalMapper, QGIS, SAGA GIS, STATISTICA, Surfer, R, Watem/Sedem.

Научная новизна исследования состоит в определении причин различий структурно-функциональной организации почвенного покрова трёх физико-географических провинций лесостепи Восточно-Европейской равнины на основе моделирования межкомпонентных отношений с применением цифровых технологий крупномасштабного ландшафтного картографирования для их последующего применения в задачах ландшафтного планирования разного уровня.

Теоретическая и практическая значимость. В теоретическом отношении работа развивает методы формализации структурно-функциональной организации ландшафтов. В прикладном отношении результаты исследования предназначены для оптимизации территориального планирования сельскохозяйственного землепользования на основе ландшафтно-экологического подхода.

Степень достоверности, апробация результатов и публикации. Результаты исследования доложены на 11 научных и научно-практических конференциях, в том числе на международных (IYFSWC/ICCE Conference, Москва, 2018; Pedometrics 2019, Гвелф, Канада; IALE-Russia, 2020, Москва). Результаты работы опубликованы в 7 статьях в журналах, индексируемых в базах данных Scopus, Web of Science, RSCI. Региональная специфика структурно-функциональной организации ландшафтов рассмотрена в работах по Среднерусской (Lozbenev et.al., 2019, 2021) и Бугульминско-Белеевской (Lozbenev et.al., 2022) возвышенностям. Вклад автора в данных работах основополагающий и составляет 60%. В работах по структурно-функциональной организации ландшафтов Окско-Донской низменности (Yugova et.al., 2021) и эрозионных структур почвенного покрова

Среднерусской возвышенности (Козлов и др., 2019) вклад автора составляет 25%. В статье о региональных особенностях структур почвенного покрова черноземной зоны Европейской России (Khitrov et.al., 2019) вклад автора – также 25%. Применение результатов изучения структурно-функциональной организации ландшафтов в задачах агроэкологической и экономической оценки земель на примере Окско-Донской низменности раскрывается в работе (Нестеренко, Лозбенев, 2024) со вкладом автора 45%.

Личный вклад автора. Автор принимал участие и руководил сбором материала на всех ключевых участках в составе полевых бригад в период с 2014 по 2021 гг., обрабатывал результаты обследований, готовил цифровые основы для регионального моделирования, составлял модели межкомпонентных отношений и их картографическое выражение, проводил межрегиональные сравнения. Автором в составе коллективов подготовлены статьи в рецензируемых журналах, отражающие основные аспекты защищаемой работы.

Положения, выносимые на защиту.

1. Особенности структурно-функциональной организации почвенного покрова отражены в переменных и коэффициентах численных моделей, связывающих региональное разнообразие строений почвенного профиля с характеристиками факторов и процессов их ландшафтной дифференциации, и выражаются в составе и площади типизированных почвенных комбинаций морфологических единиц локального уровня;

2. Провинциальные различия возвышенных и низменных ландшафтов лесостепи проявляются в структуре почвенного покрова и пространственном соотношении доминантных, субдоминантных и редких типов местностей – плакорного с комплексом черноземов типичных и выщелоченных, склонового со смытыми вариантами чернозёмов и междуречного недренируемого с сочетаниями лугово-черноземных, черноземно-луговых и влажнолуговых почв и обусловлены функциональными показателями (величиной слоя перераспределенных осадков, темпами эрозии, количеством приходящей солнечной радиации) и геоморфометрическими величинами (крутизной, формой поверхности рельефа, превышением над водотоком);

3. Особенности местностей возвышенных и низменных провинций лесостепи обусловлены более, чем двукратными различиями в интенсивности поверхностного стока и полуторакратными в эрозии, что проявляется в доминировании (суммарно, до 70% площади) плакорного и склонового типов местностей с пятнистостями и сочетаниями черноземных почв и их смытых вариантов на возвышенностях и преобладании (около 65% площади) междуречного недренируемого типа местности в низменности с комплексом лугово-черноземных, черноземно-луговых и влажно-луговых почв.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 148 страницах, включает 21 таблицу и 74 рисунка и карты. Библиографический список содержит 205 литературных источника, из них 42 на английском языке.

Благодарности. Автор выражает благодарность своим научным руководителям К.Н. Дьяконову и Д.Н. Козлову, сотрудникам кафедры Физической географии и ландшафтоведения, родителям за поддержку в подготовке диссертационной работы. Директору Центрально-Черноземного заповедника А.А. Власову, заместителю директора по научной работе О.В. Рыжкову за содействие в организации полевых работ. Сотрудникам отдела Агроэкологической оценки почв и проектирования агроландшафтов и лаборатории эрозии почв Почвенного института им. В.В. Докучаева за помощь в сборе полевых материалов и модельных расчетах.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 19-29-05277_мк; 18-35-20011_ мол_а_вед, проекта ФЦП «Глобальный климат и агроландшафты России: разработка системы оценки и управления рисками деградации Русских черноземов» (Соглашение №075-15-2019-1689), Крупных Научных Проектов «Актуальные научные задачи стратегии адаптации потенциала землепользования России в современных условиях беспрецедентных вызовов (экономический кризис, изменения климата, кризис глобальных тенденций природопользования)» (Соглашение №075-15-2020-805) и «Разработка и научное обоснование системы – цифровой двойник почв в структуре агроландшафта, как элемент Индустрии 5.0 для экономики России» (Соглашение № 075-15-2024-545).

1. СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА И ПОДХОДЫ К ЕЁ ИЗУЧЕНИЮ

1.1. Представление о структурно-функциональной организации почвенного покрова и геосистем

К концу прошлого века в географической науке утвердилось представление о необходимости совместного изучения структуры и функционирования почвенного покрова (Козловский, 2003) и геосистем (Сысуев, 2019). В современной науке о ландшафте под термином геосистема понимается природное тело, имеющее вертикальную и горизонтальную структуру, объединенное интегрирующими радиальными и горизонтальными потоками вещества и процессами переноса энергии (рис. 1.1.1) (Ретеюм, 1971, 1972; Сочава, 1962, 1978; Солнцев, 1981).

Согласно близкому представлению (Дьяконов, 1981), геосистемы – открытые динамические системы от фации до географической оболочки в целом, генетически и функционально с ней связанные; природные единства, образованные вещественно-

энергетическими компонентами (воздушными, водными, минерально-грунтовыми и биологическими массами), взаимодействие которых рождает новый тип существования и состояния материи – приземный слой воздуха, почву, часть коры выветривания (носители эмерджентных свойств).

Под вертикальной структурой геосистем обычно понимается структура геогоризонтов: воздушных масс, биоты, почвы, вод и горных пород (Солнцев, 1949). Горизонтальная структура ландшафта – «закономерно построенная система более мелких территориальных комплексов» (Солнцев, 1949; Мильков, 1954), то есть морфологическая структура ландшафта.

Представление об организации в системах достаточно сложно. В общих чертах она рассматривается как взаиморасположение и взаимосвязь элементов некоторого комплекса, их действие и взаимодействие, обусловленные единством цели или выполняемых ими функций в определенных обстоятельствах места и времени (Боголепов, 1968). В соответствии с другим определением под системой понимается множество связанных между собой компонентов той или иной природы, упорядоченное по отношениям и обладающее определенными свойствами (Гвишиани, 1983). В ландшафтоведении организацию нередко отождествляют со структурой и рассматривают ее как устойчивую упорядоченность связей компонентов целостного объекта (Сочава, 1974) или как строение ПТК (Геренчук, Исаченко, Солнцев, 1975).

Под понятием «организация» мы понимаем внутреннюю упорядоченность и взаимосвязанное функционирование морфологических единиц, отражающееся в дифференциации их составляющих и приводящее к определенному изменению природных комплексов и пространственных сочетаний (по: Сочава, 1973).

В различных науках о земле закрепились похожие системы описания пространственной и функциональной структуры ландшафтов. В физической географии широко распространено понятие пространственно-временной организации геосистем (физико-географической организации) - устойчивой упорядоченности, структурированности во времени и пространстве, проявляющуюся на земной поверхности в форме разнокачественных индивидуальных геокомплексов разного таксономического ранга и в закономерном чередовании их суточных, сезонных, годовых, внутривековых микро-, мезо- и макросостояний (режимов функционирования) (Дьяконов, 1981). В геохимии ландшафтов – катенарная структура и элементарный геохимический ландшафт (Глазовская 1988; Касимов, Перельман, 1999).

В науке о почвах структура и функционирования природных и природно-антропогенных ландшафтов рассматривается в рамках концепции структур почвенного

покрова (Фридланд, 1984). Под структурой почвенного покрова понимается пространственное расположение элементарных почвенных ареалов, в разной степени генетически связанных между собой и создающих определенный пространственный рисунок. Это специфическое расположение может быть обусловлено как составом почвообразующих пород, так и элементарными почвообразующими и ландшафтообразующими процессами (Козловский, 2003).

В условиях практически повсеместной вовлеченности ландшафтов в сельскохозяйственный оборот именно структура почвенного покрова выступает индикатором ландшафтной структуры, поскольку, как правило, границы элементарных почвенных структур и урочищ совпадают (Фишман, 1977).

Системообразующие потоки вещества и энергии обеспечивают связь компонентов геосистем и морфологических единиц ландшафта в единое целое и обеспечивают их наибольшую активность и устойчивость (Ретеюм, 1975).

При этом рельеф выступает фактором-ретранслятором свойств ландшафта и происходящих в нем процессов и, одновременно, индицирующим показателем этих процессов (Дьяконов, 1988).

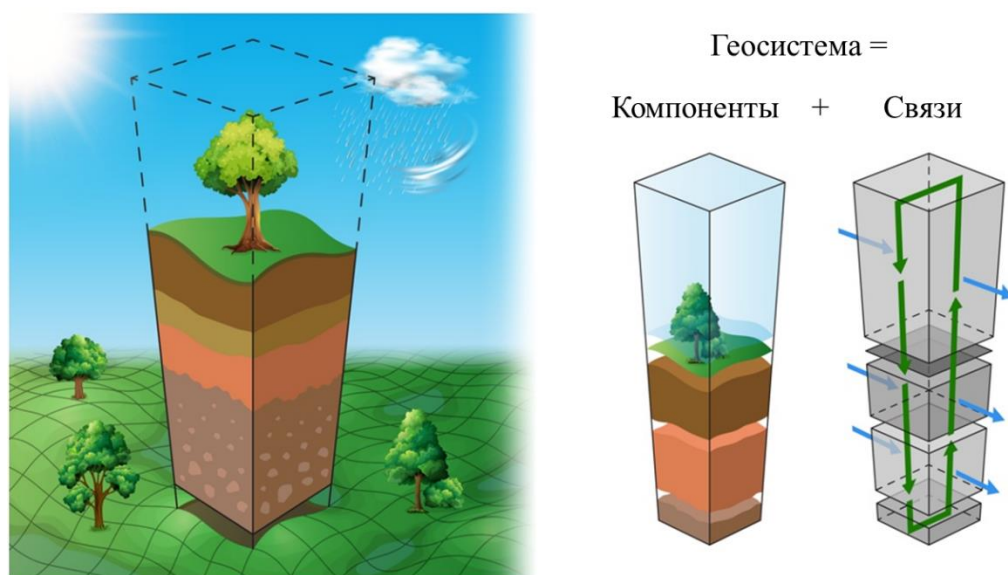


Рис. 1.1.1. Блок-схема строения геосистемы (по: Lozbennev et.al., 2021)

В тоже время, процессы функционирования могут выступать как структурообразующие, приводящие к формированию новых геосистем, выделение и описание которых – одна из основных задач в ландшафтоведении и опирается на понимание системного физико-географического устройства природной оболочки. Совокупное влияние процессов отражается в наборе почвенных свойств, которые, в сравнении с процессами, являются легко измеряемыми величинами (Bockheim, Gennadiyev, 2009).

Понимая ландшафт как природный комплекс, состоящий из связанного и целостного множества природных компонентов с особыми свойствами (эмерджентностью), В.Н. Солнцев (1977) предложил различать элементы процессов функционирования на «связи-взаимодействия» и «связи-отношения».

Связи-отношения возникают как некоторого рода ограничение для подчиненных геосистем. Например, в зоне широколиственных лесов сосновые леса не выходят за пределы ареала с лёгким составом отложений, поскольку являются ограниченными другими сообществами борьбой за свет.

Связи-взаимодействия имеют более функциональную природу, интересующую нас в данной работе. Они выявляются на основе изучения потоков вещества и энергии. Примером могут служить исследования, частично касающиеся влияния распахки на состояние ландшафтов Центрального Черноземья и потоки в них (Мильков, 1966). Или многочисленные работы лесоводов и гидрологов по изучению влияния рубок на лесную гидрологию и характер стока рек (Крестовский, 1986; Дмитриева, 2015). Интенсивность влияния одного параметра на другой зависит от буферности компонента, на который оказывается воздействие, его возможности усвоить это воздействие.

Существует три принципиальных подхода к решению задачи выделения природных комплексов: типологический, структурно-генетический и функциональный.

В основе типологической модели территории лежит дифференциация ландшафтного покрова по единичному свойству, либо их совокупности, устанавливается сходство и различие изучаемых свойств, строится их классификация. Результаты классификации переносятся на карту, где сходные объекты (например, по растительности или почвенному покрову) объединяются в один контур, а непохожие – разъединяются. Примером данного подхода выступают типы местности, выделяемые Ф.Н. Мильковым (1954), или типы ландшафтов А.Г. Исаченко (Исаченко, Шляпников, 1989).

Структурно-генетическая модель строится на основе «учета объектов по отношению к факторам среды» (Солнцев, 1949; Ретейом, 1975). Природные комплексы в рамках данного подхода могут состоять из компонентов разного типа и участвующих в разных функциональных потоках, но сходных по происхождению. На первый план здесь выходит индивидуализация – каждый регион специфичен, неповторим, и чем он сложнее, тем уникальнее. Этот подход эффективен при районировании и детальном картографировании ландшафтной структуры (Морфологическая структура..., 1962). К значимому недостатку этого подхода в прикладных целях является учет лишь историко-генетического аспекта формирования ПТК и недоучет функциональных особенностей, которые не всегда подчинены структурно-генетическим.

Функциональная модель строится на определении сущности динамики и функционирования ландшафта. Её цель - познание и моделирование ныне протекающих процессов. В данном случае объектом изучения служат вещественные потоки ландшафта, которые считаются первичными факторами дифференциации территории. В результате должны получиться геосистемы с однонаправленными потоками веществ. В зависимости от масштаба, исследователь рассматривает природно-территориальные комплексы, в которых существующие процессы одно направлены и едины, однако границы этих комплексов детерминированы процессами, проходящими в соседних геосистемах (Ретейом, 1975).

Если описание морфологической структуры в рамках структурно-генетического направления – довольно разработанное направление науки о ландшафте, то изучение функционирования – значительно более сложная задача. Его изучение на основе прямых методов – исключительно сложная и дорогостоящая работа, проведение которой в современных социально-экономических условиях возможно лишь на ограниченном числе научных стационарах. Это связано с рядом причин. Во-первых, процессы сложно наблюдаемы (Philps, 1998), их прямое изучение вызывает определенные затруднения, прежде всего, инструментального характера (Osman, 2013). Попытки прямого наблюдения за процессами функционирования ландшафтов предпринимаются уже давно. Самые успешные из них проводились под руководством Н.Л. Беручашвили (1986) и ведутся научными консорциумами до сих пор в рамках проектов, типа FLUXNET (www.fluxnet.ornl.gov). Во-вторых, прямое изучение процессов реализуется, как правило, в условиях лабораторных экспериментов или на очень локальном уровне (Bockheim, Gennadiyev, 2009). В-третьих, разные процессы могут приводить к формированию одинакового признака в почвах – например, осветление почвенной массы в результате кислотного гидролиза или оглеения (Zaidel'man, 2010). В-четвертых, областью развития каждого почвообразовательного процесса и его замыкания является индивидуальное почвенное тело, а не почвенный покров в целом (Козловский, 2003; Bockheim, Gennadiyev, 2009).

Преодолеть подобные ограничения позволяют косвенные методы изучения функционирования в рамках концепции о структурно-функциональной организации ландшафтов.

Впервые эта модель была предложена почвоведом и геохимиком Ф. И. Козловским (1972) в виде концепции «миграционной структуры ландшафта». Дальнейшее развитие этой идеи нашло место в трудах М.А. Глазовской (1988), А.А. Крауклиса (1977) и В.Н. Солнцева (1974, 1981, 1997). Общим во всех концепциях является утверждение огромной

роли трех типов круговоротов вещества и энергии (биоциркуляционного, геоциркуляционного и гидроциркуляционного) как системообразующих процессов, порождающих соответствующие им составляющие процесса организации ландшафта — инертную, мобильную и биолого-биогеохимическую.

Инертная составляющая представлена минеральным субстратом и выполняет функцию обособления геосистемы в пространстве и задания направления потоков. Она определяет принципиальную возможность картографирования геостационарной ландшафтной структуры. Мобильная составляющая имеет потоковую природу, присущую воздушным, водным и движущимся минеральным (субстратным) массам. В организации геосистем потоковая составляющая выполняет обменно-транзитную функцию, и даёт возможность выделения геоциркуляционных ландшафтных структур, перекликающихся с функциональными моделями А.Ю. Ретеюма (1975). Биолого-биогеохимическая составляющая представляет собой основу радиального биогеохимического круговорота веществ, организующего биоциркуляционную ландшафтную структуру, который позволяет картографировать экосистемы, биомы, зоны (Макунина, 2010). Исследования структурно-функциональной организации почвенного покрова таежной зоны (Структурно..., 2001) также показало ведущую роль процессов латеральной миграции влаги и эрозии в дифференциации таксонов почв, при этом прямая оценка интенсивности процессов остается крайне сложной задачей.

В косвенном изучении циркуляционных процессов в ландшафте помогает триада И.П. Герасимова «фактор-процесс-свойство» (Герасимов, 1975), которая добавляет в традиционную модель ландшафтных связей функциональную составляющую, в явном виде выражающую неоднородность ландшафтного покрова от особенностей вещественно-энергетических потоков, трансформированных компонентами ландшафта (факторами). Интенсивность и направленность процессов Ф.И. Козловский (2003) предложил выражать через изменение свойств, являющихся прямым результатом этого процесса — основных диагностических показателей (ОДП). Позднее для совместного изучения эволюции почв и дифференциации почвенного покрова он предложил различать элементарные почвообразовательные (ЭПП) и элементарные ландшафтообразующие процессы (ЭЛП). К последним он относил процессы латеральной миграции вещества и энергии, ведущие к дифференциации почвенного покрова, например, водно-миграционными потоками и/или перемещением твердого вещества по поверхности почвы, вызванными перераспределением атмосферных осадков по элементам микро-, мезорельефа. Пространственная неоднородность инертных компонентов (фактор) определяет своеобразие внутриландшафтного переноса веществ и энергии (процесс) и формирование

миграционной структуры мобильных компонентов, фиксируемой биогеохимическим круговоротом в виде мозаики элементарных почвенных ареалов (свойство).

Изучению связи процессных характеристик со свойствами почв и уровнем грунтовых вод посвящено множество работ по моделированию перераспределения влаги в ландшафте (Murphy, 2009). Однако сопоставление результатов моделирования с структурой почвенного покрова в классическом понимании практически не проводится (Yugova et.al., 2021). В связи этим есть определенная научная ниша, изучение которой может быть полезна в научном и прикладном плане.

Вопросам сопоставления интенсивности эрозионных процессов и структур почвенного покрова посвящены некоторые работы российских эрозиоведов (Голосов и др., 2019; Жидкин и др., 2023), в которых рассматривается формирование эрозионных структур почвенного покрова разных регионов, в том числе, в пределах лесостепной зоны (Lozbenev et.al., 2023). Даются оценки интенсивностей смыва, при которых происходит качественное изменение свойств склоновых почв.

Ботанический состав древостоя и травостоя как основной диагностический показатель структурно-функциональной организации ландшафтов работает только в целинной лесостепи, участки которой сохранились лишь в Центрально-Черноземном, Воронинском и некоторых других заповедниках. Подобные работы уже были проведены (Lozbenev et.al., 2019), но распространять эти результаты на целые ландшафтные провинции не представляется корректным.

В качестве основного диагностического показателя (ОДП) в диссертационной работе рассматриваются почвы, их свойства и структура почвенного покрова, поскольку в них фиксируются результаты среднесезонных режимов функционирования ландшафтов.

Выбор структуры почвенного покрова и свойств почв как диагностического показателя структурно-функциональной организации ландшафтов связано с высокой степенью распаханности лесостепных регионов. Вследствие этого нет возможности использовать пространственное варьирование состава и состояния растительности как индикатора структурно-функциональной организации. Это возможно только на детальном уровне при учете внутривополевого варьирования урожайности и состояния сельскохозяйственных культур, но из-за разнообразия применяемых агротехнологий применение этого подхода в среднем масштабе не представляется возможным.

Зачастую встречается не до конца осмысленный методический вопрос, связанный с переходом от пространственных единиц организации почвенного покрова к ландшафтным. Согласно представлениям московской школы ландшафтоведения (Ландшафтный..., 2013),

при распашке не происходит принципиальной смены природного комплекса, а лишь его антропогенная модификация. При этом в классическом определении агроландшафта говорится, что это не новый комплекс, а ПТК «того же геосистемного уровня, который свойственен природному ландшафту (в его региональном понимании)» (Николаев и др., 2008). Поэтому пространственная структура агроландшафта фактически приравнивается к морфологической структуре природного ландшафта, оценка структурно-функциональной организации которого – задача представленной работы.

1.2. Структурно-функциональная организация почвенного покрова лесостепи

Восточно-Европейской равнины

Специфика функционирования лесостепных ландшафтов определяется различным соотношением элементарных почво- и ландшафтообразующих процессов (ЭПП и ЭЛП, соответственно) в пределах каждой ландшафтной провинции. К ЭПП относятся гумусово-аккумулятивный процесс (степень выраженности которого определяется по мощности гумусового горизонта и содержанию в нем органического углерода), выщелачивание карбонатов и их аккумуляции (по глубине обнаружения в пределах почвенного профиля и формам нахождения), оглеение (по морфохроматическим признакам и размерам новообразований), элювиально-глеевый процесс, фиксируемый по наличию осветленного материала в почвенном профиле (Козловский, 2003; Зайдельман и др., 2013).

К ЭЛП относятся процессы перераспределения влаги по элементам рельефа, грунтового питания и эрозионно-аккумулятивный (Козловский, 2003). При возрастании степени как поверхностного, так и грунтового увлажнения в почвах происходит усиление выраженности процессов выщелачивания карбонатов и оглеения, а также сокращение мощности гумусово-аккумулятивного горизонта и смена таксона почвы в связи с эрозионными процессами, сопровождающееся изменением структурно-функциональной организации склоновых ландшафтов (Подобед, 2013). При грунтовом увлажнении карбонаты выщелачиваются до верхней границы капиллярной каймы, ниже которой встречаются в виде дисперсных, миграционных и сегрегационных форм. При увеличении интенсивности эрозионных процессов снижается мощность гумусово-аккумулятивного горизонта и биологическая продуктивность.

Также к региональным показателям функционирования относятся: количество надземной фитомассы, соотношение подземной и надземной фитомассы, ботанический состав травостоя. Вопросы пространственного варьирования фитоценозов региона рассмотрены в работах Н.И. Базилевич (Базилевич, Титлянова, 1978; Базилевич, 1993), а также автора (Lozbenev et.al., 2019). К сожалению, в связи с повсеместной распаханностью лесостепи использование геоботанических показателей естественных экосистем

ограничено целинными участками. В условиях агроландшафтов урожайность сельскохозяйственных культур может выступать ОДП морфологической структуры и/или процессов функционирования ландшафтов (Нестеренко, Лозбенев, 2024).

Интенсивность проявления элементарных почво- и ландшафтообразующих процессов определяется типом структурно-функциональной организации. Для однородных в плане почвообразующих пород участков в условиях северной лесостепи ($KY=1$) доминируют два типа: водно-миграционный и эрозионно-аккумулятивный (Козлов, Лозбенев, Левченко, 2017). Необходимо отметить, что современный климат характеризуется высокой межгодовой изменчивостью, что влияет на интенсивность водно-миграционных процессов в ландшафте (Базыкина, Бойко, 2008) и динамику гумусового и карбонатного профилей почвы (Чендев и др., 2015).

В условиях целинных ландшафтов и на плоских междуречьях первенство в формировании ландшафтной структуры принимают водно-миграционные процессы. На Среднерусской возвышенности региональными индикаторами увеличения интенсивности процесса миграции влаги являются ареалы почв возрастающей степени гидроморфизма (Lozbenev et.al., 2021): черноземы типичные карбонатные – черноземы типичные – черноземы выщелоченные – луговато-черноземные выщелоченные – луговато-черноземные оподзоленные почвы. Каждый из ареалов характеризуется не только отличным от других количеством перераспределенного стока и структурой фитоценоза (Lozbenev et.al., 2019), но и продуктивностью сельскохозяйственных культур (Лозбенев, 2022). Наиболее чувствительны к внутриландшафтной неоднородности увлажнения кукуруза и сахарная свёкла, наименее – многолетние травы и горох (Базилевич, 1993; Утехин, Фишман, 1968).

На Окско-Донской низменности водно-миграционные структуры формируются по сходному принципу, однако вследствие широкого распространения гидроморфизма таксоны почв меняются в следующем порядке: чернозем – луговато-черноземные – лугово-черноземные – черноземно-луговые – влажнолуговые.

Водно-миграционные структуры почвенного покрова Бугульминско-Белебеевской возвышенности формируют сходную структуру со структурами Среднерусской возвышенности. В классических древовидных и пятнисто-древовидных структурах, по мере накопления влаги, друг друга последовательно сменяют чернозем выщелоченный – луговато-черноземная почва – лугово-черноземная почва – влажнолуговая почва.

Значительную роль в формировании структурно-функциональной организации имеют потускулы (Высоцкий, 1960) – депрессии рельефа (блюдца, западины, потяжины), где периодически наблюдается сквозное промачивание почвенно-грунтовой толщи. Они

одновременно являются неотъемлемой частью морфологической структуры междуречных ландшафтов обеих возвышенностей и влияют на её функционирование через регулирование уровня грунтовых вод и запасов влаги в почвах, переводя поверхностный сток во внутрипочвенный (Ахтырцев, Ахтырцев, 1993).

Еще одним фактором, формирующим морфологическую структуру ландшафта и трансформирующим функциональные потоки, выступает роющая деятельность сурков и слепышей. Создаваемые ими положительные формы рельефа перераспределяют потоки и являются микро- или нано-водоразделами. Колонии сурков, жившие ранее на Среднерусской возвышенности, создавали формы микрорельефа, представляющие собой полноценные природно-территориальные комплексы уровня фации.

Приводораздельные и прибалочные распаханые склоны подвержены влиянию обоих типов процессов, и внутриландшафтная неоднородность в таких условиях формируется в их диалектическом единстве. Первичная дифференциация происходит под влиянием перераспределения влаги на междуречьях, которые при критических величинах накопленного потока вызывают миграцию твердофазного вещества почвы. Аккумуляция вовлеченного в поток вещества трансформирует структуру потоков, и формирование водно-миграционной морфологической структуры начинается заново. Распространение и сложность протекания эрозионных процессов продолжает оставаться одним из ключевых направлений современной почвенной и географической науки, что подчеркивается множеством региональных и обобщающих работ (Ларионов, 1993; Литвин, 2003; Renard, 1997 и др.)

Несмотря на общность процессов, основные диагностические показатели (ОДП) параметров структурно-функциональной организации двух возвышенностей несколько отличаются. Общим у них является только показатель структуры – типизированные почвенные комбинации (ПК), границы которых совпадают с границами природно-территориальных комплексов (ПТК). При этом ОДП функционирования ландшафтов различаются. Интенсивность миграции влаги по элементам рельефа и инфильтрации на Среднерусской и Бугульминско-Белебеевской возвышенностях диагностируется по глубине вскипания вторичных карбонатов. Это возможно благодаря тому, что лессовидные суглинки при осадконакоплении исходно были карбонатными, а сейчас их глубина варьирует в связи с особенностями водного режима разных элементов мезо- и микрорельефа (Козлов и др., 2016).

На Окско-Донской низменности в связи с близким залеганием почвенно-грунтовых вод и периодического подъема капиллярной каймы с минерализованными водами глубина карбонатов оказывается не столь эффективным показателем. Более информативным

региональным показателем здесь выступает коэффициент степени гидроморфизма (KI-II), выражающий фракционный состав гумуса пахотного горизонта через соотношение оптических плотностей вытяжек гумусовых кислот I и II фракции (Левченко, Козлов, Лозбенев, 2017; Степанцова, 2012). Значение коэффициента закономерно возрастает по мере увеличения продолжительности поверхностного переувлажнения не минерализованными (например, дождевыми или талыми) водами. Диагностические возможности KI-II исследованы как по отношению к почвам возрастающей степени переувлажнения, так и относительно топографических факторов дифференциации поверхностного стока. Помимо этого, сам уровень грунтовых вод и глубина проявления признаков оглеения в почвах являются четкими индикаторами режима функционирования природного комплекса.

Результатом совместного действия ЭПП и ЭЛП выступают собственно почвенное тело и структура почвенного покрова. Их особенности в условиях широко воздействия распашки остаются одними из наиболее удобных и простых в определении свойствами компонентов ландшафта. В морфологическом профиле почвы сохраняются результаты функционирования – ОДП в виде набора генетических горизонтов, их мощностей и проявлений признаков гидроморфизма и эрозии. Они выступают ОДП процессов локального и регионального функционирования ландшафта. Набор горизонтов и проявления признаков гидроморфизма – индикаторы интенсивности перераспределения влаги. Мощность гумусового горизонта склоновых почв – индикатор интенсивности эрозионных процессов.

Структура почвенного покрова, выступающая в условиях лесостепи диагностическим показателем морфологической структуры ландшафтов, формируется под воздействием двух физико-географических процессов – перераспределения влаги и миграции твердофазного вещества почв. Процессы, в свою очередь, индицированы и контролируются морфолитогенной основой ландшафта. Описание структуры почвенного покрова в условиях относительной однородности почвообразующих пород с функциональных позиций дает возможность определить причины формирования конкретных рисунков СПП и граничные условия появления отдельных почвенных комбинаций.

1.3. Методическая основа моделирования структурно-функциональной организации почвенного покрова и её ограничения

В настоящее время изучение региональных механизмов ландшафтной дифференциации опирается на методы статистической ординации изменчивости состава растительных сообществ по градиенту экологических факторов (Хорошев, Еремеева, Меркалова, 2013) или анализу межкомпонентных связей в моделях, связывающих

факторы почвообразования и структуры почвенного покрова (Сорокина, 1998; Сорокина, Козлов, 2012). Развитие цифровых технологий пространственного анализа открыло новые возможности содержательного анализа межкомпонентных связей как основы картографирования почвенного покрова и косвенного изучения структурно-функциональной организации ландшафтов (McBratney et al., 2003; Minasni, McBratney, 2016). Широкое применение цифровых технологий, именно почвенного картографирования в земледельчески освоенных территориях, связано со сложностью использования других индикаторов для описания пространственно-временной организации ландшафтов.

Идеи В.В. Докучаева (1899) о взаимосвязи компонентов ландшафта, переработанная в последующие годы Х. Йенни (Jenny, 1941), стали основой для развития современной цифровой почвенной картографии. В качестве новой теоретической базы, учитывающей территориальное соседство, предложена модель SCORPAN, окончательно сформулированная А. МакБратни (McBratney et al., 2003). При этом она не предполагает включение функциональных характеристик, что было бы усовершенствованием по сравнению с классической формулировкой (Lozbennev et.al., 2021). В трансформированном виде она представляет собой описание взаимосвязей между факторами почвообразования, миграционными процессами и почвами:

$$Sc,a = f(s,c,o,r,p,a,n,F,E),$$

где Sc – почвенные таксономические единицы, Sa – количественные почвенные параметры, s – почва (её характеристики), c – климатические особенности, o – живые организмы, r – рельеф и производные характеристики, p – литологические особенности и материнская порода, a – возраст, n – положение в пространстве, F – показатель перераспределённого стока, E – интенсивность эрозионных процессов.

Похожее направление – Predictive soil mapping (PSM, прогнозное почвенное картографирование) (Sculla et.al. 2003; Hengl, MacMillan, 2019) – развивается под эгидой проекта GlobalSoilMap. Прогнозное почвенное картографирование – это междисциплинарная область, объединяющая статистику, почвоведение, физическую географию, дистанционное зондирование, геоинформатику и ряд других наук. Подход основан на применении статистических методов, методов машинного обучения для составления моделей пространственной структуры почв или их свойств на разных масштабных уровнях.

Суть анализа межкомпонентных связей в рамках представленных концепций заключается в поиске наилучшей зависимости пространственной изменчивости почвенных классов либо отдельных почвенных свойств от факторов почвообразования,

охарактеризованных по элементам регулярной сетки. В многочисленных исследованиях показано, что соответствие почв и факторов почвообразования никогда не бывает однозначным (Bishop, Minasny, 2006; Malone et al. 2011). Обычно к источникам неопределенности межкомпонентных связей относят неполный учет факторов почвообразования и масштаба их проявления (Vermeulen, Niekerk, 2017), ограничения использованных методов моделирования, неточности источников пространственной информации и их совмещения в процессе анализа. Их совокупное влияние выражается в наблюдении в локальной области признакового пространства разных почвенных классов или значений почвенных свойств. Снижение неопределенности связывается с расширением состава картографической модели, повышением детальности ковариат, сгущением сети почвенного опробования, использованием высокоуровневых методов моделирования: методы машинного обучения и нейронные сети (Scarpone et al., 2016).

Однако, помимо методических и технических источников неопределенности, «наггет-эффект» межкомпонентных отношений связан с естественной комплексностью почвенного покрова, из-за чего каждый пиксель на местности соответствует комбинации двух и более почв. В таких случаях снижение неопределенности почвенной карты невозможно без повышения детальности ЦМР, дистанционного изображения или других ковариат, определяющих или отражающих почвенное варьирование. При значительном охвате территории повышение детальности переменных часто экономически не оправдано. Кроме того, изменчивость почв может не иметь адекватной ландшафтной индикации в условиях конкретного региона, например, при рассогласовании межкомпонентных связей в результате агрогенной трансформации микрорельефа.

Методическая основа определения межкомпонентных связей – единство территориального и признакового пространств межкомпонентных связей в триаде «фактор-процесс-свойство» (рис. 1.3.1). Территориальное пространство картографической модели задается регулярной сеткой (растром) с фиксированным шагом. Для каждого элемента сетки (пикселя) рассчитываются значения потенциальных факторов дифференциации геосистем, контролирующих миграционные потоки (например, свойства рельефа – крутизна, форма, площадь водосбора и др., почвообразующие породы – пески, суглинки, глины или др.). Направленность и интенсивность потоков влаги и миграции твердофазного вещества по поверхности почвы (эрозии) рассчитывается для каждого элемента сетки в соответствии с существующими имитационными моделями перераспределения поверхностного стока и плоскостной эрозии.



Рис. 1.3.1. Концепция «фактор-процесс-свойство» - методическая основа изучения структурно-функциональной организации ландшафтов. В левой части рисунка приведена принципиальная схема организации данных при цифровом картографировании, в правой - примеры: а) факторной основы (абсолютные высоты, м), б) процессных характеристик (перераспределенный сток, м), в) свойств (почвы)

Строение почвенного профиля, его морфология и аналитические значения, пространственная конфигурация элементарных почвенных ареалов используются в качестве ОДП элементарных почвообразовательных процессов, формируемых внутриландшафтным перераспределением жидкого и твердого стока. Цифровой анализ связей (рис. 1.3.2, справа) позволяет изучить степень детерминированности отношений, обосновывать пороговые значения факторов дифференциации или миграционных процессов, влияющих на качественную смену ОДП. Установленные зависимости позволяют получать картографические отображения пространственного варьирования факторов ландшафтной дифференциации и диагностических показателей на разных масштабных уровнях.

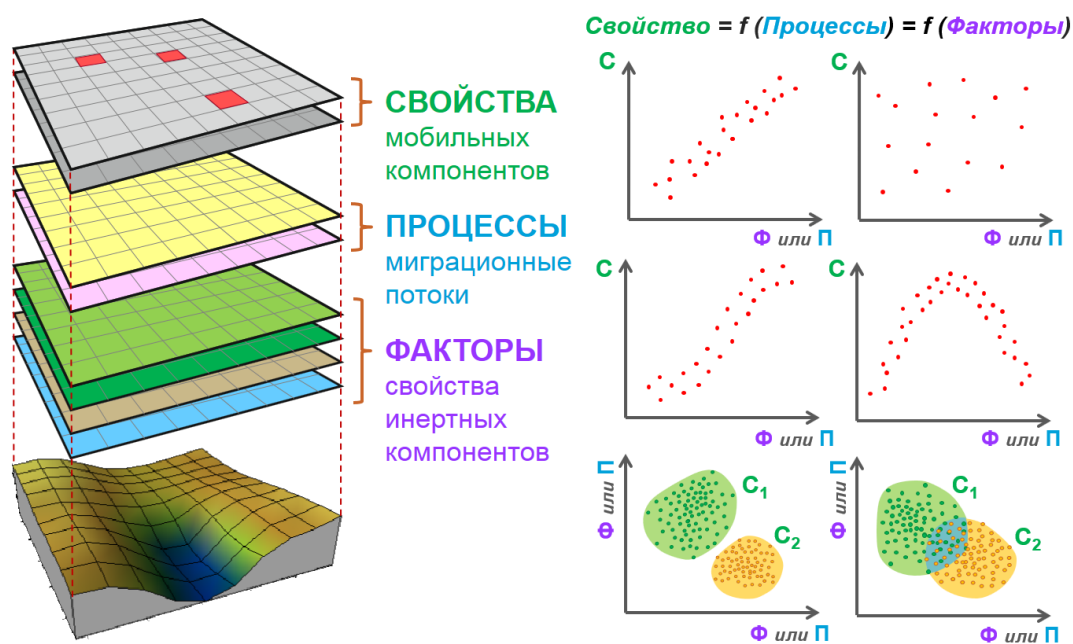


Рис. 1.3.2. Единство территориального (левая часть) и признакового (правая часть) пространства межкомпонентных связей как методическая основа изучения структурно-функциональной организации

Суть анализа межкомпонентных связей в рамках представленной концепции заключается в поиске наилучшей зависимости пространственной изменчивости почвенных таксонов либо отдельных почвенных свойств от факторов почвообразования и миграционных процессов, охарактеризованных по элементам регулярной сетки. Поиск зависимости производится методами статистики, машинного обучения или нейросетевого анализа. При этом, чем проще метод, тем более ясно можно определить роль каждого фактора или процесса в формировании ландшафтной структуры региона.

Результатами моделирования межкомпонентных взаимодействий выступают: а) форма и степень детерминированности межкомпонентных связей, отражающая сложность морфологической структуры; б) регионально-специфичный ряд факторов дифференциации в порядке убывания их предсказательной силы, например: форма поверхности → крутизна → площадь водосбора; в) пороговые значения параметров функционирования, при которых происходят качественные изменения в структуре почв или модель, рассчитывающая доленое участие каждого таксона в пикселе; г) прогнозная карта доминантной почвы (элементарных почвенных ареалов) и неопределенность прогноза.

Предложенные подходы позволяют на новом методическом уровне объяснить пространственные особенности взаиморасположения почв или наблюдаемое разнообразие морфологической структуры ландшафтов, выразив их в количественном виде от факторов и процессов ландшафтной дифференциации.

В данной работе используется методический подход, обеспечивающий переход от вероятности встречи предсказываемых категорий почв к категориям структуры почвенного

покрова. Он был предложен и апробирован в работах Д.Н. Козлова (2009), а затем на отдельных ключевых участках в пределах лесостепной и степной зон Европейской части России (Смирнова и др., 2020). Близкие по сути подходы используются в рамках работ научной школы Ю.Г. Пузаченко (2004; Пузаченко М.Ю., 2009) в части анализа ландшафтной структуры лесных территорий и в классическом лесоведении (Беляева и др., 2018).

В данной работе вероятность встречи каждой категории рассматривается как долевое участие данного таксона почвы в конкретной ячейке раstra. Такой подход позволяет обосновать переход от вероятности обнаружить те или иные категории почв в данном сочетании условий рельефа к категориям структуры почвенного покрова. Это обеспечивает корректное поднятие масштабного уровня исследований с локальных ключевых участков на уровень регионов, не теряя при этом характеристику взаиморасположения природно-территориальных комплексов низкого иерархического уровня и их взаимосвязи между собой. Обоснование корректности подхода рассмотрено в предыдущих работах (Lozbenev, Kozlov, 2017), а также представлено в разделе 4.1 на конкретных примерах.

В предыдущих методологически близких работах (Козлов, 2009; Шилов, 2023) не в полной мере рассматривался следующий этап - переход от элементарных почвенных ареалов (ЭПА) к природно-территориальным комплексам (ПТК). Согласно классическим представлениям, ЭПА приурочен к участку земной поверхности, занятой одной почвой на уровне вида и характеризующегося однородным составом почвообразующих пород в пределах одной микроформы рельефа (Кирюшин, 2013). В такой формулировке ЭПА близок к классическому структурно-генетическому определению фации, данному Н.А. Солнцевым (1949). Объединение ЭПА в ЭПС по принципу генетической, морфологической или функциональной близости соответствует иерархическому переходу от фации к урочищу в ландшафтной школе. Переход от ЭПС к внутренне неоднородным, но функционально или территориально связанным типам структур почвенного покрова по В.М. Фридланду (1977) близко к классическому представлению о типах местности Ф.Н. Милькова (1966, 1976, 1981) и В.Б. Михно (2020), на уровне которых возможно производить сравнение структурно-функциональной организации ландшафтов в связи с единой методической основой их выделения.

Цифровой подход к моделированию ландшафтной структуры имеет некоторые преимущества перед традиционным картографированием (Arrouays et.al., 2017; Nikiforova et.al., 2020). Он упростил переход от точечных данных полевых описаний к пространственно-распределенным данным, позволил давать оценку точности и

неопределенности, а модельный подход позволяет воспроизводить результаты по мере уточнения входных данных и развития методического аппарата. При этом не отрицается наработанный ранее опыт и материалы. Связь между цифровым картированием и традиционными картами и связанные с ними продукты дополняют друг друга и действуют синергично.

Тем не менее использованный подход имеет существенные риски и ограничения (Козлов, Сорокина, 2012; Terribile et.al., 2011; Agrouays 2020). Во-первых, составление цифровых моделей с картографическим отображением требует навыков не только описания природы, но и статистики, информатики и других. Во-вторых, результаты цифрового картографирования никак не стандартизированы и не закреплены. Использование таких продуктов для государственного или частного заказчика сильно ограничены. В-третьих, плохо разработанные цифровые карты контрпродуктивны, они могут давать крайне искаженную картину реальности при недостаточной подготовленности специалиста.

На основе авторского опыта можно отметить, что предлагаемый подход применим для детального ландшафтного картографирования и анализа в условиях однородных почвообразующих пород и наличия детального цифровой модели рельефа высокого качества, построенной на основе БПЛА-съёмки или высотных отметок топографических карт. Также обязательным условием является наличие десятков или сотен точек описаний, охватывающих всё разнообразие ландшафтных условий региона.

Применение функциональных моделей вне зависимости от их типа и назначения требует региональной параметризации, которая либо трудоёмка физически, в связи с необходимостью отбора и анализа большого количества образцов, либо требует специальных знаний в области математического анализа.

В случае совпадения всех трёх указанных выше критериев для изучаемого региона возможно установление четких связей между компонентами ландшафта с их последующим выражением в виде цифровых карт. При недоучете какого-либо из критериев возможно создание низкокачественных моделей, которые не будут описывать реальные процессы в ландшафте и его пространственную структуру. Современные разработки в этой области направлены как раз на повышение количества и качества входных данных, точности составляемых моделей (Hengl et.al., 2017).

1.4. Структурно-функциональный анализ ландшафта в научно-прикладных исследованиях

Рациональное природопользование – один из приоритетов в мировой практике ландшафтного планирования в начале XXI в. Повышающееся давление на биосферу актуализирует ландшафтно-экологические задачи оптимизации технологий

землепользования для сохранения ландшафтного и биологического разнообразия; определения оптимальных пропорций хозяйственных угодий в ландшафтах; принятия пространственных решений в связи с ландшафтной иерархией; определения приоритетов землепользования и интенсивности антропогенных нагрузок на основе прогноза цепных реакций между компонентами ландшафта и многих других (Хорошев, 2023).

Интенсивно происходящая технологическая модернизация крупнейшего землепользователя лесостепи - сельского хозяйства - осуществляется путем освоения систем земледелия нового поколения, наукоемких агротехнологий, противоэрозионных, оросительных и осушительных мелиораций, развития животноводства, особенно скотоводства, и гармонизации его с земледелием (Иванов и др., 2018; Доктрина..., 2020; Государственная..., 2021). Важнейшим условием реализации этих мероприятий является их проектирование применительно к разнообразным ландшафтным условиям (Швебс, 1986; Лопырев, 1996). Эта работа требует организации на локальном, региональном и федеральном уровнях. Исходной позицией в данном отношении является структурно-функциональный анализ ландшафта, включающий анализ структуры ландшафта, межкомпонентных отношений и процессов функционирования ландшафта (Кирюшин, 2018). Цифровой структурно-функциональный анализ ландшафта позволит решить прикладные вопросы в части комплексной оценки земель (Кирюшин, 2020), задач оптимизации сельскохозяйственного природопользования, проектирования наукоемких агротехнологий, мелиоративных и лесомелиоративных мероприятий, кадастровых работ, землеустройства.

Законодательной основой планировочных работ выступает ФЗ о Землеустройстве (№78, 2021). Землеустройство - мероприятия по изучению состояния земель, планированию и организации рационального использования земель и их охраны, описанию местоположения и (или) установлению на местности границ объектов землеустройства, организации рационального использования гражданами и юридическими лицами земельных участков для осуществления сельскохозяйственного производства.

На верхнем уровне землеустроительной иерархии разрабатывается Генеральная схема использования и охраны земельных ресурсов страны, затем схема землеустройства территории субъектов Федерации, схема землеустройства административно-территориального образования, проекты межхозяйственного землеустройства, проекты внутрихозяйственного землеустройства, рабочие проекты использования и охраны земель. Через землеустройство государство должно осуществлять земельную политику, основанную на ландшафтно-экологическом подходе, и регулировать социально-экономические показатели регионов (Волков, 2020). Вопросы оценки качества

территориальных единиц отдаётся на откуп бонитировки почв (Востокова и др., 2010) и кадастровой оценки (Сапожников, 2004).

В рамки землеустройства хорошо ложится концепция структурно-функциональной организации и анализа ландшафта. Исследования структуры ландшафта, интенсивности и направленности процессов, а также природы их происхождения и изменения состояния во времени помогают оценить риски или преимущества для распределения типов землепользования или сельскохозяйственных культур в конкретных ландшафтных условиях.

Еще в послевоенные годы началось активное изучение вопросов картографирования и оценки качества почв и пригодности земель к различным типам сельскохозяйственного землепользования на основе ландшафтного подхода (Цесельчук, 1952; Зворыкин и др., 1958; Видина, Цесельчук, 1961; Низовцев, 2022). Территориальная основа в этих работах задавалась картами урочищного уровня, позволяющими ранжировать территории по потенциальной продуктивности с позиций консервативных условий среды: морфолитогенной основы и структуры почвенного покрова и, частично, учитывая интенсивность и направленность процессов деградации земель. Часть результатов этих работ легли в основу землеустроительных экспедиций Росгипрозема.

В комплексной оценке сельскохозяйственных земель, опирающейся на достижения географии и почвоведения, основной упор делается на учет потребностей растений в влаге, элементах питания и условий произрастания, возможности и эффективности применения агротехнологий различного уровня интенсивности, требований землеустройства, формирования социальной среды для жизни на селе (Черногоров, 2012; Кирюшин 2020).

Принципиальная схема (рис. 1.4.1.) формирования адаптивно-ландшафтной системы земледелия на основе структурно-функционального анализа ландшафта выглядит следующим образом (Кирюшин, 2011, 2015):

1. инвентаризация ландшафтных условий с определением морфологической структуры ландшафта, функций и функционирования компонентов природно-антропогенного ландшафта (рис. 1.4.1.а);
2. агроэкологическая оценка с построением карт групп и видов земель (рис. 1.4.1.б);
3. определение оптимального типа использования земель каждой группы с построением карт пригодности земель к типу целевого использования (рис. 1.4.1.в);
4. проектирование агротехнологий нормального и интенсивного уровня применительно к каждой агроэкологической группе земель (рис. 1.4.1.г);
5. расчет эколого-экономической эффективности их внедрения;

6. разработка паспортов производственных участков и технологических карт их возделывания, внедрение проекта в производство.

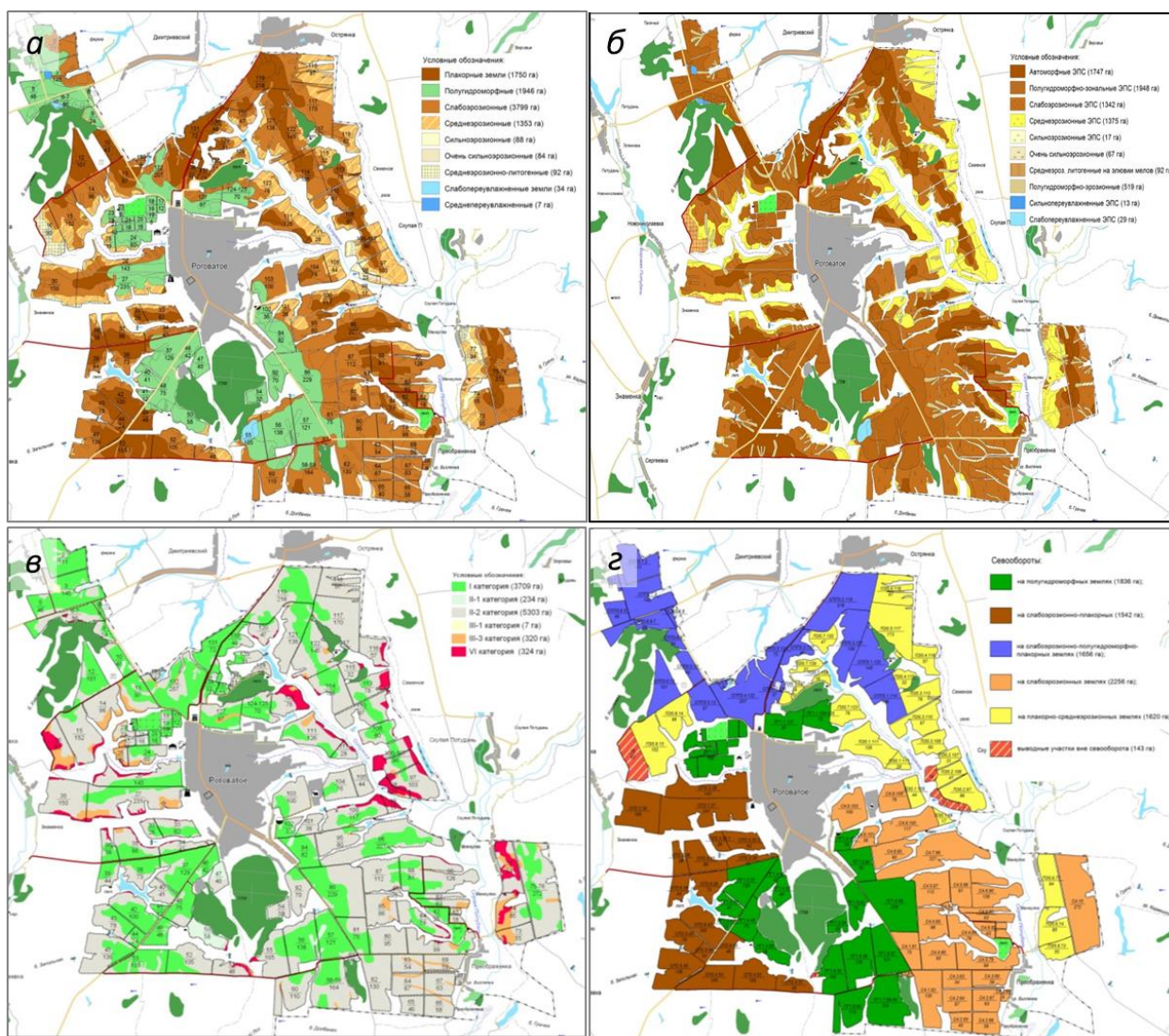


Рис. 1.4.1. Принципиальная схема формирования адаптивно-ландшафтной системы земледелия на основе анализа ландшафта (по: Кирюшин, 2019): а – карта структур почвенного покрова; б – карта агроэкологических групп земель, в – карта пригодности земель под культуры, г – карта севооборотов и производственных участков

Крупномасштабный анализ ландшафтной структуры позволяет идентифицировать потенциальное пространственное варьирование урожайности в пределах полевого участка (Дубачинская и др., 2007; Медведев, 2007) или целых предприятия (Кирюшин, 2019). Второй элемент комплексной оценки земель – агроэкономическая оценка, которая позволяет ранжировать рентабельность возделывания культур в зависимости от агроэкологических условий и снизить общие затраты предприятия (Нестеренко, Лозбенев, 2024). Это возможно, например, за счет перераспределения затрат на земли с более высоким естественным потенциалом или полного отказа от наименее благоприятных земель.

Структурно-функциональный анализ ландшафтов применим в задачах ландшафтной экологии (Forman, Godron, 1986). Определение размеров, пространственного соотношения

ландшафтных единиц, направленность и интенсивность процессов в них позволяют разделить анализируемый ландшафт на классические ландшафтно-экологические единицы: матрицу, состоящую из пятен и коридоров. Оптимизация взаиморасположения единиц, уточнение их функциональной роли и порядка использования (охраны) выступают одними из многих задач прикладной ландшафтной экологии (Khoroshev, 2022).

2. РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЛАНДШАФТОВ ЛЕСОСТЕПИ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ РАВНИНЫ

Ключевые участки расположены в подзоне северной лесостепи в юго-западной части Среднерусской возвышенности (рис. 2.1., цифра 1), центральной части Окско-Донской низменности (рис. 2.1., цифра 2) и восточной части Бугульминско-Белебеевской возвышенности (рис. 2.1., цифра 3). Несмотря на нахождение в одной природной зоне, эти участки значительно отличаются друг от друга по морфологии ландшафтов и составу компонентов структуры почвенного покрова.

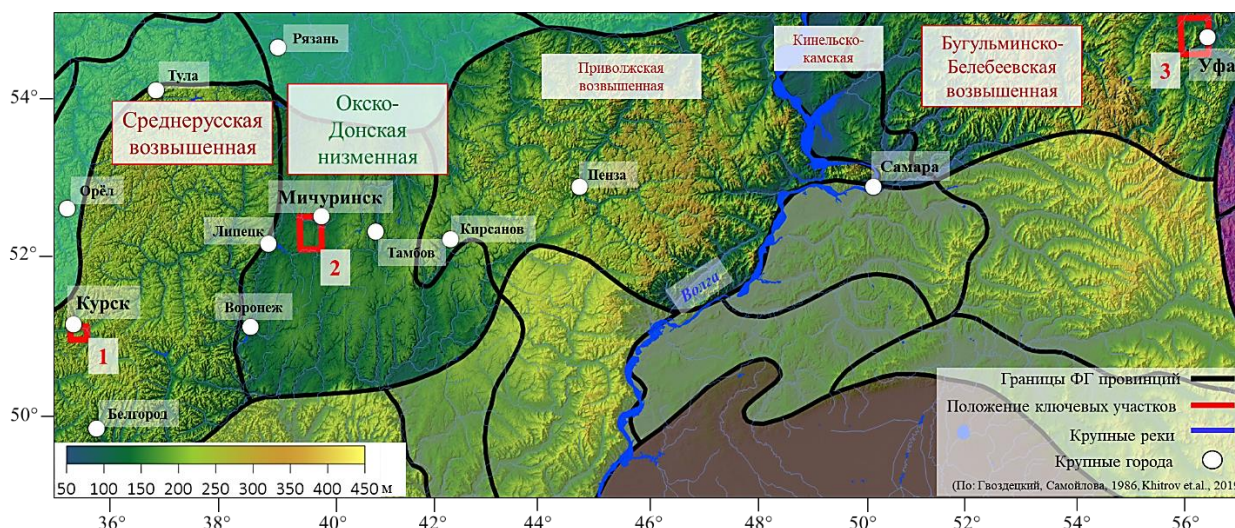


Рис. 2.1. Положение ключевых участков (красные прямоугольники) на фоне цифровой модели местности части Восточно-Европейской равнины. Цифрами обозначены физико-географические провинции в пределах лесостепной области Восточно-Европейской равнины: 1 – Среднерусская возвышенная, 2 – Окско-Донская низменная, 3 – Бугульминско-Белебеевская возвышенная

При составлении карт ландшафтной структуры используются как региональный подход московской школы ландшафтоведения (Солнцев, 1949), так и ландшафтно-типологический подход, развиваемый в стенах Воронежского государственного университета (Мильков, 1977; Михно, Быковская, Горбунов, 2020).

Ландшафтная структура лесостепных провинций наиболее подробно рассмотрена в работах Воронежских ландшафтоведов (Схематическая..., 1961; Мильков, 1976, 1977; Михно и др., 1986). Более мелкой единицей, чем провинция, является физико-географический район. Физико-географический район – это геоморфологически

обособленная часть провинции, в пределах которой сохраняется целостность и специфика ландшафтной структуры (Мильков, 1956). Физико-географические районы, в свою очередь, подразделяются на универсальные типологические единицы ландшафта - типы местности: плакорный, склоновый, междуречный недренируемый, водораздельно-зандровый, останцово-водораздельный, надпойменно-террасовый, пойменный, аквальный. (Ландшафтная, 2010; Михно и др., 2010).

Плакорный тип местности занимает приподнятые и дренируемые основные поверхности междуречий, сложенные лессовидными суглинками мощностью более 3 метров, подстилаемые карбонатными или водно-ледниковыми отложениями. В нём преобладают черноземы оподзоленные, выщелоченные, типичные и луговато-черноземные почвы в слабовыраженных ложбинах. Интенсивность эрозионных процессов невелика из-за малых уклонов. Перераспределение влаги происходит интенсивно, переводя значительную часть стока в верховья ложбинной сети. Плакоры почти полностью заняты полевыми севооборотами и полезащитными лесными полосами в связи с их самым высоким потенциалом плодородия.

Склоновый тип местности занимает пологие и покатые приовражные и прибалочные склоны (крутизной более 3°). Его особенностями являются повышенная интенсивность оттока влаги, высокие темпы смыва почв и слабо- или средневрезанная овражно-балочная сеть. Для склонового типа местности характерно преобладание эродированных вариантов черноземов и луговато-черноземных почв. Склоновый тип местности также значительно распахан, за исключением участков, приуроченных к сильноэродированным почвам и выходам коренных пород на склонах.

Междуречный недренируемый тип местности приурочен к субгоризонтальным междуречьям с широкими проявлениями гидроморфизма. В классическом варианте он подразделяется на 2 литолого-гоморфологических варианта: более сухой – возвышенный и более влажный – пониженный. В данной работе мы подразделяем его на 3 литолого-геоморфологических варианта, выстраивающихся в ряд возрастающего гидроморфизма: *междуречный замедленно-дренируемый*, собственно, *междуречный недренируемый* вариант типа местности и *плоскоместный озерно-болотный*. *Междуречный замедленно-дренируемый* вариант приурочен к субгоризонтальным междуречьям, сложенным лессовидными суглинками со слабым проявлением гидроморфизма. Здесь доминируют луговато-черноземные обычные и выщелоченные почвы с единичными признаками переувлажнения в нижней части профиля. Доля западинного комплекса с сильнопереувлажненными почвами и лесными колками в его пределах не превышает 25%. Глубина почвенно-грунтовых вод в сухой сезон – более 5 метров. *Междуречный*

недренируемый вариант типа местности характеризуется плоским рельефом и долей западин 25-50% от общей площади территории. На фоновых участках преобладают лугово-черноземные обычные и выщелоченные почвы с яркими признаками переувлажнения в средней и нижней частях профиля. В западинах преобладают почвы гидроморфного ряда – влажнолуговые осолоделые, луговые солоды, болотные перегнойно-торфянистые. Глубина почвенно-грунтовых вод в сухой сезон у фоновых почв – 3-5 метров. Он также преимущественно распахан за исключением крупных западин. *Плоскоместный озерно-болотный* вариант типа местности приурочен к самым плоским участкам междуречий, где доля западинного комплекса более 50% площади. Здесь доминируют лугово-черноземные и черноземно-луговые почвы с уровнем почвенно-грунтовых вод в сухой сезон выше 3 метров. Почвы имеют яркие признаки переувлажнения по всему профилю за счет активного перераспределения влаги к элементам западинного комплекса данного варианта типа местности. *Водораздельно-зандровый* тип местности встречается ограниченно и приурочен к высоким долинным зандрам и междуречьям, сложенным песками с участием западинного комплекса в ландшафтной структуре. Преобладают естественные и саженные сосняки с очень небольшой площадью сельскохозяйственных земель. *Останцово-водораздельный* тип местности приурочен к междуречьям, сложенным дочетвертичными легкими каменистыми отложениями практически без западин. Фоновыми почвами выступают серые и темно-серые песчаные почвы. Для него характерны практически нулевые темпы смыва и невысокие темпы притока перераспределенных осадков в связи с преобладанием внутрипочвенного стока. Аналогично с предыдущим типом местности в нем преобладают сосновые леса с единичным вкраплением пахотных угодий. *Надпойменно-террасовый* тип местности приурочен к надпойменным террасам рек, сложенным древнеаллювиальными песками с серыми и темно-серыми лесными почвами. В связи с лёгким гранулометрическим составом почв преобладает внутрипочвенный сток, а темпы смыва стремятся к нулю. Здесь преобладают серые и темно-серые лесные почвы под сосновыми лесами. *Пойменный* тип местности приурочен к поймам рек с аллювиальными дерновыми, луговыми и болотными почвами. Они испытывают переувлажнение разной продолжительности и характеризуются значительными признаками гидроморфизма. Преобладает естественная древесная растительность из широколиственных пород деревьев, сельское хозяйство распространено фрагментарно в форме сенокосных угодий, реже пашни. *Аквальный* тип местности приурочен к заболоченным поймам водохранилищ с мелководной растительностью.

Региональные особенности морфолитогенной основы, климатические показатели и состав литолого-геоморфологических вариантов типов местностей приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Физико-географическая характеристика ключевых участков в пределах лесостепных провинций

Провинция	Среднерусская	Окско-Донская	Бугульминско-Белебеевская
ΣT_{10}° , средняя сумма осадков, K_y	2550° t_{cp} : + 5,7°, осадки: 580 мм, K_y : 1,	2500° t_{cp} : + 5,4°, осадки: 530 мм, K_y : 0,9	2300° t_{cp} : + 5,4°, осадки: 500 мм, K_y : 0,9
Рельеф, K_p (км/км ²)	Возвышенная эрозионная равнина, K_p =1,3- 1,4	Низменная водно- ледниковая равнина, K_p = 0,7-0,9	Возвышенная эрозионно- пластовая равнина, K_p = 1,4-1,5
Отложения	Лессовидные СС- ТС на мелах с глубины 1-20 м	ТС-Гл, подстилаемые лёгкими водноледниковыми отложениями с глубины 3 и более метра	СС-ТС на коренных породах или песках
Физико- географические провинции и районы по Ф.Н. Милькову (1960)	Среднерусская возвышенная, Суджанский район	Окско-Донская равнинная, Центральный плоскоместный район	Высокого Заволжья, Левобережный Прибельский район
Литолого- геоморфологические варианты типов местности	Плакорный; Междуречный замедленно- дренируемый; Склоновый; Пойменный.	Плакорный; Междуречный замедленно- дренируемый; Междуречный недренируемый; Плоскоместный озерно- болотный Склоновый; Надпойменно- террасовый; Пойменный.	Плакорный; Междуречный замедленно- дренируемый; Междуречный недренируемый; Склоновый; Останоцовой- водораздельный; Пойменный.

Рассмотрим каждую провинцию в разделах 2.1 - 2.3 более подробно.

2.1. Ландшафты лесостепи Среднерусской возвышенности

Согласно карте физико-географического районирования СССР (Карта..., 1986), исследуемая территория располагается в физико-географической стране Русская равнина, Лесостепной области, Среднерусской провинции (рис. 2.1.2, цифра 1). С севера к ней примыкает Приокская провинция лесной области Русской равнины (2), а с юга – Донецко-Донская провинция Степной области Русской равнины (3). На западе она граничит с Левобережно-Днепровской провинцией Лесостепной области (4), а на востоке – с Окско-Донской провинцией той же области (5). Согласно физико-географическому районированию Ф.Н. Милькова (1960), данная провинция называется Среднерусская возвышенная.

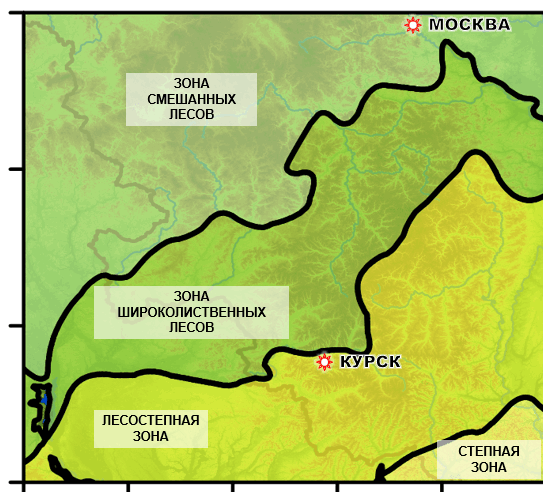


Рис. 2.1.1. Схема зонального деления Восточно-Европейской равнины и положение района исследований (Курск)

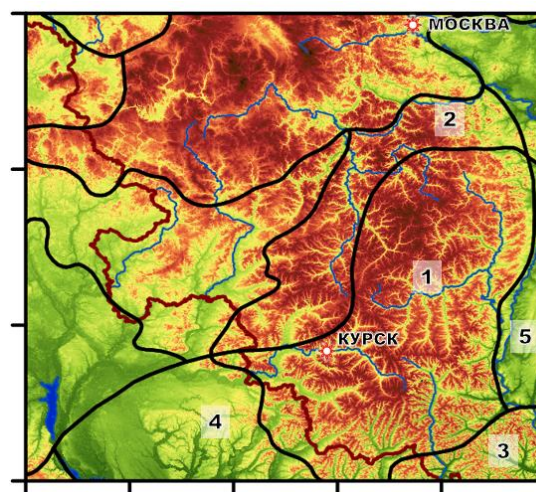


Рис. 2.1.2. Физико-географическое районирование Восточно-Европейской равнины (Карта..., 1986) и положение района исследований (Курск)

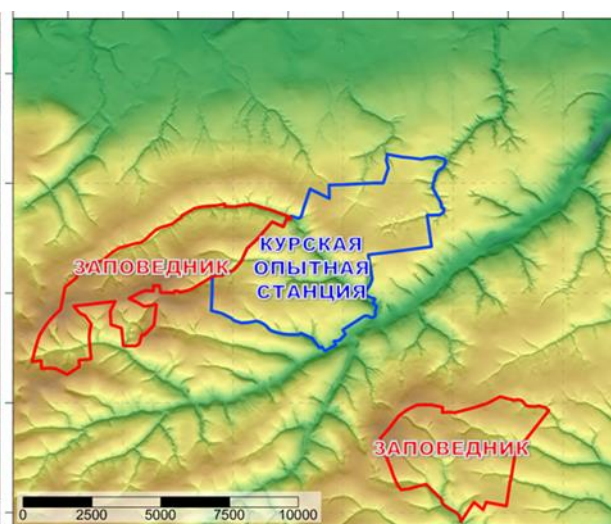
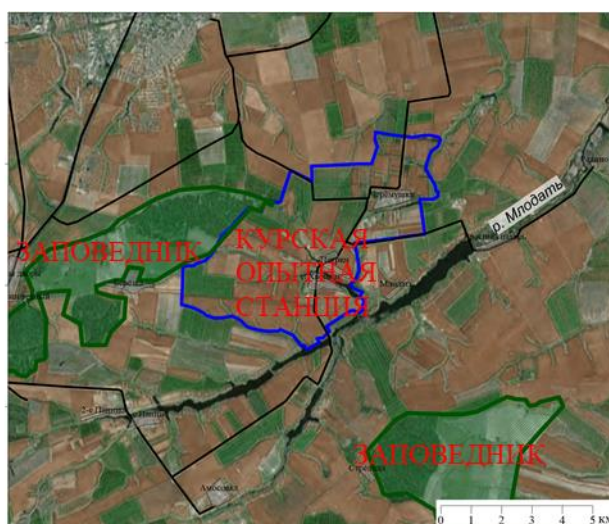


Рис. 2.1.3. Положение ключевого участка на фоне космического снимка (слева) и цифровой модели рельефа (справа)

Ландшафты региона формируются в умеренно-тёплых и умеренно-влажных климатических условиях. Среднегодовая температура воздуха $+5.7^{\circ}\text{C}$, средняя температура самого тёплого месяца (июля) $+19,7^{\circ}$. Среднегодовое количество осадков около 580 мм (<https://ru.climate-data.org>), сумма активных температур 2550° , коэффициент увлажнения около 1.

В тектоническом отношении территория располагается в пределах древней Восточно-Европейской платформы, в центральной части - Воронежской антеклизы. Четвертичные отложения представлены толщей писчего мела, перекрытой лессовидными суглинками мощностью 1-8 метров. Они имеют трёхчленное строение. С поверхности и до глубины 2,5 – 3 метра залегает тяжёлый лессовидный суглинок московского и валдайского времени. Под ним залегает средний суглинок донского и

днепровского времени. Широкое распространение легкоразмываемых лессовых пород во многом способствовало активному развитию овражно-балочной сети на склонах и формированию западинного микрорельефа суффозионного генезиса на плоских междуречьях. Для региона характерно высокое эрозионное расчленение – коэффициент расчленения рельефа достигает 1.3-1.4 км/км². Лессовидные породы, повсеместно залегающие на междуречьях и склонах в пределах Среднерусской возвышенности, имеют все характерные признаки типичных лёссов: они карбонатные, пылеватые и пористые. Отличие состоит лишь в меньшей доле пылеватых частиц в породе, относительно типичных лёссов.

Состав, генезис и взгляды на формирование лёссовых и лессовидных пород подробно рассмотрен в работе «Лёссовые породы СССР» (1986). Все представленные идеи о генезисе таких отложений можно свести к трём гипотезам. Эоловая гипотеза говорит о том, что стоковые ветры с ледников развеивали ледниковые отложения и уносили пыль далеко от ледникового покрова, где она и образовывала лёсс. Рассматриваются разновидности этой гипотезы: почвенно-элювиальная и криогенно-элювиальная. Флювиальная концепция предполагает, что образование толщи пылеватых осадков происходило в результате смыва отложений с междуречий и склонов с последующим переотложением пород, переносом и накоплением минерального материала в речных долинах и озерах, а также во флювиогляциальных потоках. Однако в рамках этой гипотезы не вполне ясно, как формировались лёссы со своими особыми признаками. В соответствии с почвенно-элювиальной гипотезой (Берг, 1922) пылеватые отложения могут накапливаться любым путем, а их превращение в лёсс со всеми специфическими признаками этой породы происходит в результате почвообразования и выветривания. Обобщая существующие в настоящее время гипотезы о происхождении лёссов можно сказать, что процесс формирования лёссовых пород состоит из этапа накопления минерального пылеватого осадка и превращения накопленного осадка в лёссовую или лессовидную породу (Герасимов, 1939).

Изучению доминирующих в регионе черноземных почв были посвящены работы еще в довоенный период (Розов, 1939). В них было определено основное разнообразие почв, их морфологическое строение, физико-химические показатели, пригодность к ведению сельского хозяйства. В послевоенные годы активизировались работы на детальных участках. Особую роль здесь сыграли целинные участки Центрально-Черноземного Заповедника им. В.В. Алёхина, на которых были описаны микроструктуры почвенного покрова (Афанасьева, 1961; Дайнеко, 1968). Пахотные участки были описаны на прилегающих к заповеднику участках (Сорокина, 1966; Фишман, 1971). Всеобъемлющее

обобщение о черноземных почвах Среднерусской возвышенности дано в соответствующем томе монографии В.М. Фридланда (1981). Современные работы направлены на изучение не до конца ясных аспектов микроструктуры почвенного покрова (Ахтырцев, Ахтырцев, 1993), динамики водного режима и карбонатного профиля почв (Базыкина, Овечкин, 2012; Кречетов, 2017). Широко изучается проблематика эрозии почв региона (Сухановский, 2016; Голосов и др., 2019) и технологий защиты почв от эрозии (Почвозащитное..., 1983). В региональных работах рассматриваются вопросы развития гумусового и карбонатного профиля черноземных и серых лесных почв в голоцене (Чендев и др., 2015), а также влияние полевых защитных лесных полос на свойства черноземов (Чендев и др., 2020).

С ландшафтных позиций регион изучался Воронежскими ландшафтоведом. Их работы обобщены в нескольких комплексных монографиях, в том числе, в работе В.Б. Михно (1983). В ней лесостепные ландшафты Среднерусской возвышенности включают четыре типа местности: плакорный, склоновый, надпойменно-террасовый и пойменный.

Плакорный тип местности занимает приподнятые субгоризонтальные или слегка наклонные (до 3°) пологоволнистые междуречья, в основании которых залегают меловые отложения. На долю этого типа местности приходится более половины всей площади. Плакорный тип местности включает несколько урочищ. Урочища водоразделов и приводораздельных склонов под разнотравно-злаковыми лугами на черноземах сохранились на ограниченной территории, в основном, в Стрелецкой и Казацкой степи Центрально-Черноземного заповедника.

Как было установлено ранее (Lozbenev et.al., 2021), ведущий процесс дифференциации почвенно-растительного покрова на детальном уровне исследований – перераспределение влаги по элементам микрорельефа (рис. 2.1.4). Гипотез происхождения микрорельефа в лесостепи несколько (табл. 2.1.1), однако, на наш взгляд, наиболее точной является полигенетическая, включающая в себя криогенно-термокарстовую и эрозионную. Современный рельеф был заложен в ледниковое время, когда в условиях вечной мерзлоты и разреженной растительности происходило солифлюкционное течение на склонах крутизной более 1° и формировались термокарстовые западины, а затем этот рельеф был доработан эрозионными и суффозионными процессами во флювиальные эпохи.

Таблица. 2.1.1 Гипотезы образования западинного микрорельефа на водоразделах

Гипотеза	Публикации
Дефляционная	В. Н. Бублясь (1993)
Суффозионно-просадочная	Л. С. Берг (1960)
Криогенно-термокарстовая	А.А. Величко и др. (1996), Алифанов и др. (2010)
Эрозионная	Е.А. Еременко, А.В. Панин (2010)
Полигенетическая	Ф. Н. Мильков (1978)

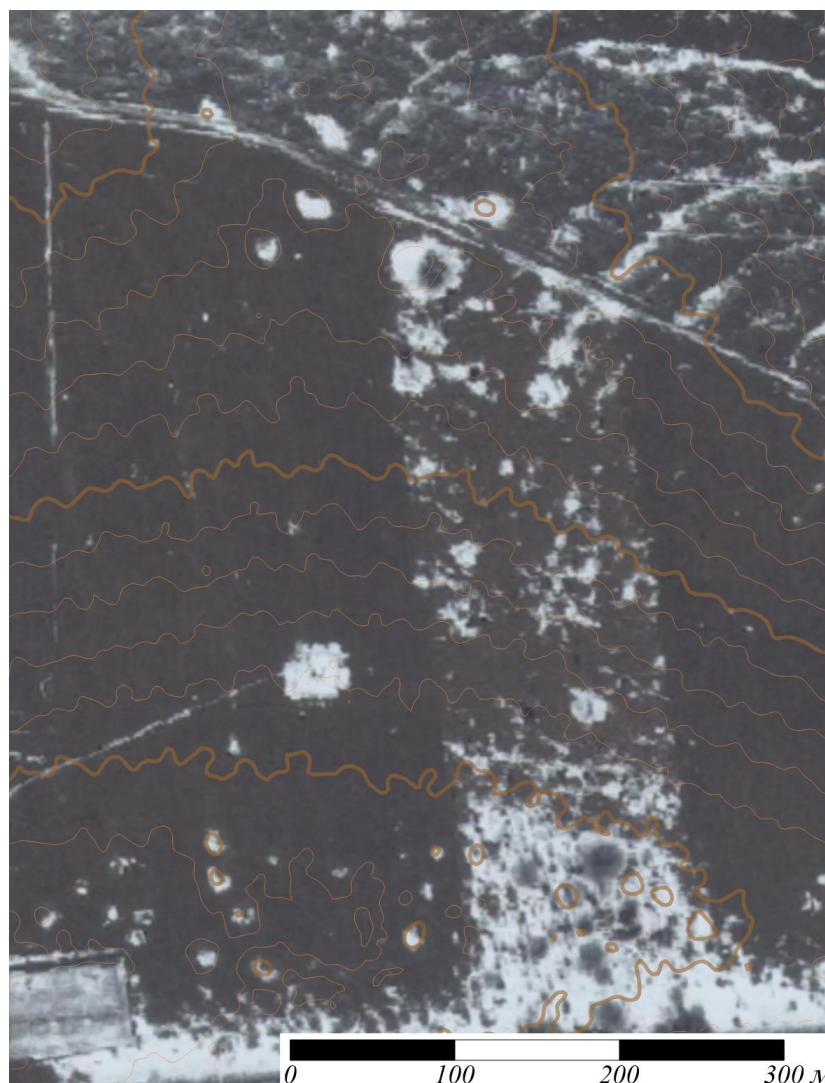


Рис. 2.1.4. Рельеф междуречья (горизонтالي проведены через 0,5 м на фоне космического снимка высокого разрешения)

Подавляющая часть плакоров Среднерусской возвышенности распахана. В связи с этим основным индикатором морфологической структуры урочищ данного типа местности является структура почвенного покрова (СПП). Она, в целом, описывается специфической для подзоны северной лесостепи структурой почвенного покрова: древовидные эрозионные сочетания, умеренно сложные и умеренно контрастные (Фридланд, 1984). Субгоризонтальные участки междуречья занимают слабоконтрастные пятнистости округло-кучнопятнистой формы из черноземов выщелоченных (Чв) и луговато-черноземных почв (Чл1) в небольших западинах на фоне черноземов типичных (Чт). Наиболее выпуклые позиции в микрорельефе (как правило, зоогенного происхождения) заняты черноземами типичными карбонатными (Чтк).

Обобщенный профиль пахотных выщелоченных черноземов, сформированных на тяжелых лессовидных суглинках (Чв, рис. 2.1.5а), имеет следующий набор горизонтов: Апх (0...30 см) – пахотный горизонт, с порошистой или мелкоглыбистой структурой темно-серого цвета, выщелоченный от карбонатов с ясной и ровной нижней границей; А

(30...50(60) см) – гумусовый горизонт темно-серого цвета с мелкокомковатой структурой, выщелочен от карбонатов; АВ (50(60)... 90(130)см) - переходный горизонт от гумусового к иллювиальному, буровато-темно-серого цвета с комковато-ореховатой структурой, также бескарбонатный; В (90(130)...150 и более см) - иллювиальный горизонт темно-бурого или палево-бурого цвета, ореховатый или ореховато-призматический, зачастую встречаются гумусовые затеки; граница вскипания карбонатов опущена на более, чем 10 см от верхней границы горизонта; карбонаты представлены густым псевдомицелием или карбонатными стяжениями, особенно ярко по верхней границе вскипания.

Обобщенный профиль пахотных типичных черноземов, сформированных на тяжелых лессовидных суглинках (Чт, рис. 2.1.5б), имеет следующий набор горизонтов: Апах (0...30 см) – пахотный горизонт, с порошистой или мелкоглыбистой структурой темно-серого цвета, выщелоченный от карбонатов с ясной и ровной нижней границей; А (30...50(60) см) – гумусовый горизонт темно-серого цвета с мелкокомковатой структурой, выщелочен от карбонатов; АВ (50(60)...90(130) см) - переходный горизонт от гумусового к иллювиальному, буровато-темно-серого цвета с комковато-ореховатой структурой, карбонаты, как правило, выражены в форме псевдомицелия и единичных стяжений; В (90(130)...150 и более см) - иллювиальный горизонт темно-бурого или палево-бурого цвета, ореховатый или ореховато-призматический, изредка встречаются гумусовые затеки, вскипает от соляной кислоты, карбонаты представлены густым псевдомицелием и карбонатными стяжениями.

Обобщенный профиль пахотных типичных карбонатных черноземов, сформированных на тяжелых лессовидных суглинках (Чтк, рис. 2.1.5в), имеет следующий набор горизонтов: Апах (0...30 см) – пахотный горизонт, с порошистой или мелкоглыбистой структурой темно-серого цвета, иногда вскипающий с поверхности, с ясной и ровной нижней границей; А (30...40(50) см) – гумусовый горизонт темно-серого цвета с зернисто-комковатой структурой, бурно вскипает от соляной кислоты, карбонаты выражены в форме псевдомицелия, обильные следы копания животными; АВ (40(50)...70(100) см) - переходный горизонт от гумусового к иллювиальному, буровато-темно-серого цвета с комковато-ореховатой структурой, очень бурно вскипает, обильные карбонаты выражены в форме псевдомицелия и единичных стяжений; В (70(10)...150 и более см) - иллювиальный горизонт темно-бурого или палево-бурого цвета, ореховатый или ореховато-призматический, вскипает от соляной кислоты, карбонаты представлены густым псевдомицелием и карбонатными стяжениями.

Обобщенный профиль луговато-черноземных выщелоченных почв, сформированных на тяжелых лессовидных суглинках (Чл1, рис. 2.1.5г), имеет следующий

набор горизонтов: Апах (0...30 см) – пахотный горизонт, с порошистой или мелкоглыбистой структурой темно-серого цвета, выщелоченный от карбонатов с ясной и ровной нижней границей; А (30...50(60) см) – гумусовый горизонт темно-серого цвета с мелкокомковатой структурой, выщелочен от карбонатов; АВ (50(60)... 100(140)см) – переходный горизонт от гумусового к иллювиальному, буровато-темно-серого цвета с комковато-ореховатой структурой, бескарбонатный; В (100(140)...150 и более см) – иллювиальный горизонт темно-бурого или палево-бурого цвета, ореховатый или ореховато-призматический, иногда встречаются гумусовые затеки и глинистые кутаны; в горизонте могут встречаться признаки элювирования – отмытые зерна кварца (ОЗК), граница вскипания карбонатов опущена на более, чем 10 см от верхней границы горизонта, а зачастую весь профиль отмыт от карбонатов.

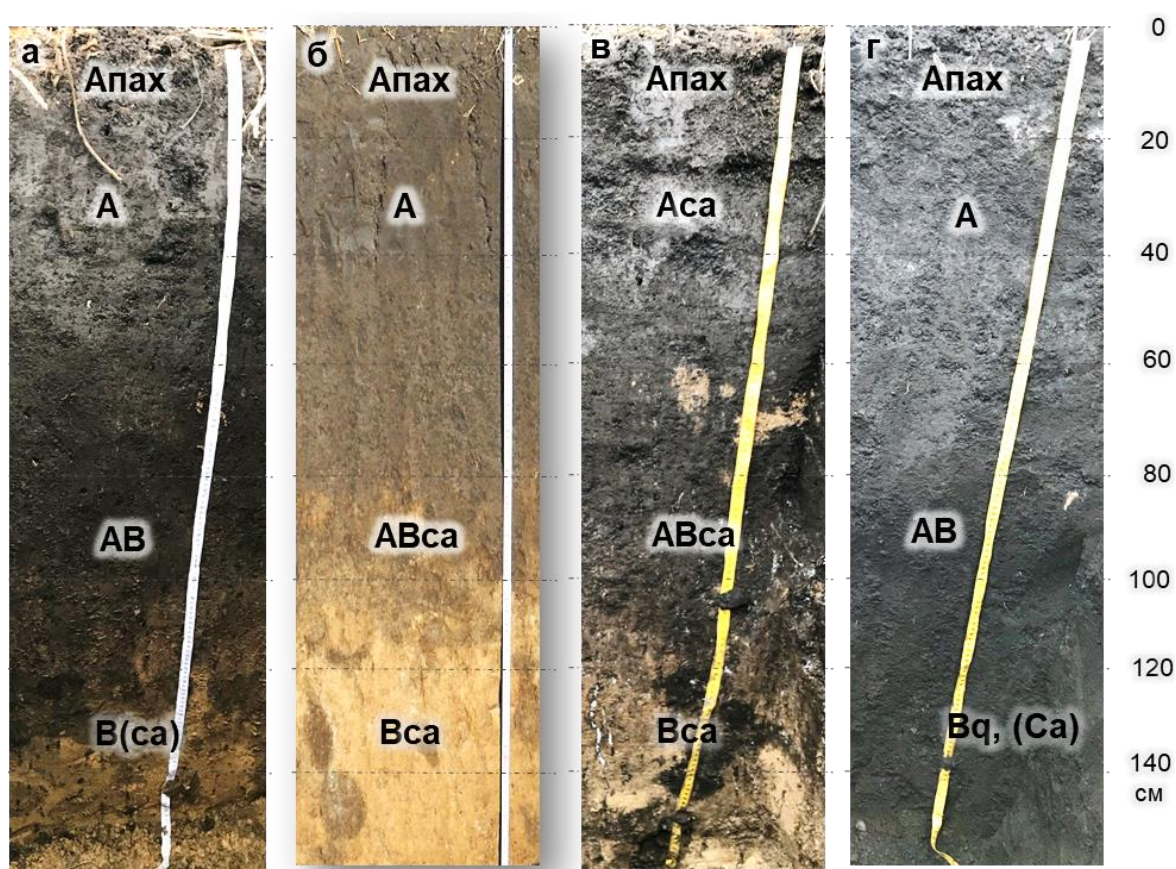


Рис. 2.1.5. Основные зональные почвы плакорного типа местности: чернозем выщелоченный (а), чернозем типичный (б), чернозем типичный карбонатный (в), луговато-черноземная выщелоченная, почва (г). Все фото – автора.

Почвенному покрову Среднерусской возвышенности посвящено большое количество работ, начиная с середины XX века. В них раскрываются наиболее общие закономерности строения почв и почвенного покрова провинции (Афанасьева, 1968, Черноземы СССР, 1974; Ахтырцев, 1982, Ахтырцев, Ахтырцев, 1993), локальные особенности структуры почвенного покрова изучаемого района (Фишман, 1977; Сорокина,

1976, 2000), а также некоторые особенности функционирования почв (Базыкина, Бойко, 2008; Кухарук и др., 2017).

В лесостепи Среднерусской возвышенности сохранились участки целинной степи в пределах Центрально-Черноземного заповедника (рис. 2.1.6). Здесь существует несколько режимов заповедования: косимая степь, некосимая степь, черный пар. В косимой степи проводится регулярный покос, который имитирует вытаптывание и скусывание трав копытными животными. Это приводит к небольшому снижению фитомассы и уменьшению биоразнообразия травянистых растений по сравнению с абсолютно заповедными участками. Некосимая степь отличается повышенной биопродукцией и зарастает плодовыми видами деревьев: яблоней, дикой грушей, а также кустарниками: тёрн, боярышник, шиповник.

На долю разнотравья приходится большинство видов растений. Среди них широко распространены двудольные с ярко обрамлёнными цветками (прострел, горицвет, шалфей и др.). Большую роль играют и злаки: костёр береговой, полевица степная, ковыль перистый, типчак.



Рис. 2.1.6. Целинная степь Центрально-черноземного заповедника: в левой части – абсолютно заповедный участок, в правой – ежегодно косимый. Фото автора.

Склоновый тип местности включает пологие и покатые (3° - 7°) приовражные и прибалочные склоны. Его особенностями являются повышенная эродированность, расчлененность рельефа и сравнительно высокая залесенность. Тип местности включает в себя урочища присетевых склонов теплых или холодных экспозиций под разнотравно-злаковыми степями. Они представляют собой волнистые склоны на делювиальных лессовидных суглинках под лугами со значительной долей ксерофитов (ковыль волосатик, житняк гребенчатый) на склонах тёплых экспозиций на черноземах типичных,

выщелоченных по ложбинам и типичных карбонатных по микроповышениям, в т.ч. по сурчинам. Северный и южный приводораздельные склоны заняты перисто-древовидными эрозионно-суффозионными элементарными почвенными структурами (ЭПС) с преобладанием Чт на южном склоне и Чв - на северном, осложненных ложбинами и верховьями балок с Чв (рис. 2.1.7). ЭПС распаханых прибалочных склонов имеет параллельно-струйчатую форму с преобладанием слабо- или среднесмытых типичных черноземов на северном склоне и типичных карбонатных на южном и с участием выщелоченных черноземов в днищах ложбин. Пологие приводораздельные и прибалочные склоны, как правило, также распаханы. Покатые и крутые – чаще под залежью. Распаханные склоны в большой степени эродированы, на них формируются слабо-, средне- и изредка сильносмытые аналоги всех родов чернозёмов и луговато-черноземных почв в зависимости от микроформ рельефа (рис. 2.1.8).



Рис. 2.1.7. Ложбинный микрорельеф склонового типа местности в пределах заповедной степи. Фото автора с БПЛА.



Рис. 2.1.8. Ложбинный микрорельеф склонового типа местности на сельскохозяйственных землях. Фото автора с БПЛА.

В пределах склонового типа местности встречаются урочища, приуроченные к крутым склонам долин рек, ручьев и балок, сложенных дочетвертичными меловыми отложениями, преимущественно песками или мелями, покрытыми ксерофитными или кальцефильными лугами с черноземами остаточно-карбонатными или черноземами типичными разной степени смытости.

Междуречный замедленно-дренируемый вариант недренируемого типа местности приурочен к междуречьям, но с заметным (более 10%) участием западинного комплекса в ландшафте (рис. 2.1.9). Фоновыми почвами выступают черноземы типичные и выщелоченные в комплексе с луговато-черноземными выщелоченными, глубокоглееватыми, зачастую сверхмощными, почвами. Луговато-черноземные почвы образуются в результате периодически-повышенного поверхностного увлажнения. Они располагаются в депрессиях, у подножий склонов и на выположенных частях высоких долинных зандров, где возможно задержание влаги.



Рис.2.1.9. Пример космического снимка участка междуречного замедленно-дренируемого варианта типа местности с обильными западинами

Большая часть междуречий распахана, за исключением самых глубоких западин, использование которых ограничено возможностями сельскохозяйственной техники и полевых защитных лесных полос.

2.2. Ландшафты лесостепи Окско-Донской низменности

Согласно карте физико-географического районирования СССР (Карта..., 1986), исследуемая территория располагается в физико-географической стране Русская равнина, Лесостепной области, Окско-Донской провинции (рис. 2.2.1, цифра 1). С севера к ней примыкает Мещёрская провинция лесной области Русской равнины (2), с востока – Приволжская провинция лесостепной области (3), с юга – Хопер-Медведицкая (4) и Донецко-Донская (5) провинции Степной области, с запада – Среднерусская провинция (6). Согласно физико-географическому районированию Ф.Н. Милькова (1960), данная провинция называется Окско-Донская равнинная.

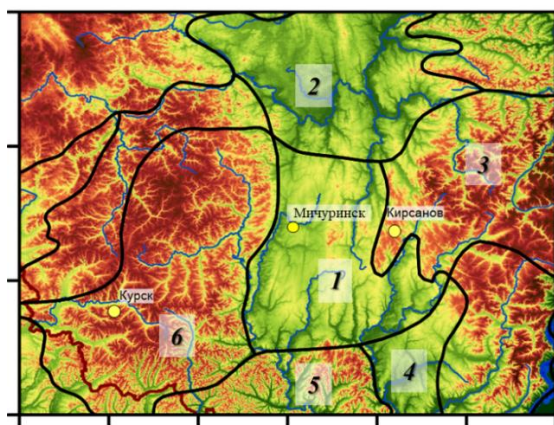


Рис. 2.2.1. Физико-географическое районирование Восточно-Европейской равнины (Карта..., 1986) и положение района исследований (Мичуринск)



Рис. 2.2.2. Схема зонального деления Восточно-Европейской равнины и положение района исследований (Мичуринск)

Окско-Донская низменность в палеогене представляла собой приподнятую, по сравнению с современными Приволжской и Среднерусской возвышенностями, равнину, которая в миоцене подверглась тектоническому опусканию с накоплением мощных толщ рыхлых отложений и перестройкой речной сети. Покровные оледенения не обошли Окско-Донскую низменность стороной: на междуречьях залегает валунно-суглинистая морена донского возраста (с 2-3 метров), перекрытая толщей флювиогляциальных (в результате таяния московского ледника) и аллювиальных отложений. Повсеместно, за исключением поймы, надпойменных террас, долинных зандров и выходов коренных пород, залегает толща лессовидных покровных суглинков. Современный рельеф сформирован в результате тектонических поднятий, в результате которых углублялись речные долины и формировались надпойменные террасы (Мильков, 1976; Тамбовская лесостепь, 2014). Особенностью современного рельефа междуречий являются очень широкие плоские пространства с обилием западин. Крутизна даже придолинных склонов не превышает 5° , а преобладающие уклоны составляют всего $0-3^\circ$.

Климат Центральной части Окско-Донской низменности, согласно классификации Кёппена, относится к группе континентального с теплым летом и без сухого сезона. Среднегодовые температуры положительные и составляют порядка $+5.4^\circ\text{C}$, среднегодовое количество осадков, в среднем, 530 мм с варьированием от 450 до 700 мм. Самый теплый месяц года ($+19.7^\circ\text{C}$), июль, отличается максимумом выпадающих осадков – 77-80 мм. Самым сухим месяцем является март (около 27 мм), затем количество осадков закономерно увеличивается к июлю. Наиболее низкие температуры характерны для января и составляют в среднем -9.8°C . Снежный покров устанавливается после 23 октября и может сохраняться до поздней весны, вплоть до 31 мая, как это было зафиксировано в 2012 году. Его

характерная высота составляет порядка 26 см (<https://ru.climate-data.org/>). Средняя сумма активных температур составляет 2500°, коэффициент увлажнения – 0.9.

Гранулометрический состав почвообразующих пород и пахотного горизонта, определенные на основе данных из очерков к крупномасштабным почвенным картам и собственных измерений методом лазерной дифракции в пределах Окско-донской низменности Тамбовской области (рис. 2.2.3), слабо варьирует: основной массив точек свидетельствует о доминировании пылевой фракции (60 – 75%) и пониженном содержании песчаных частиц (10 – 40%); глинистая фракция составляет от 25 до 45%. Таким образом, основная доля классифицируется как пылеватый глинистый суглинок (SiClLo). В почвообразующих породах наблюдается несколько облегченный состав (SaClLo – опесчаненный глинистый суглинок, SaLo – опесчаненный суглинок) в отличие от пахотного горизонта (Lo – суглинок) из-за уплотнения последнего в результате распашки и наличия плаща покровных суглинков, залегающих на исходных супесях или песках.

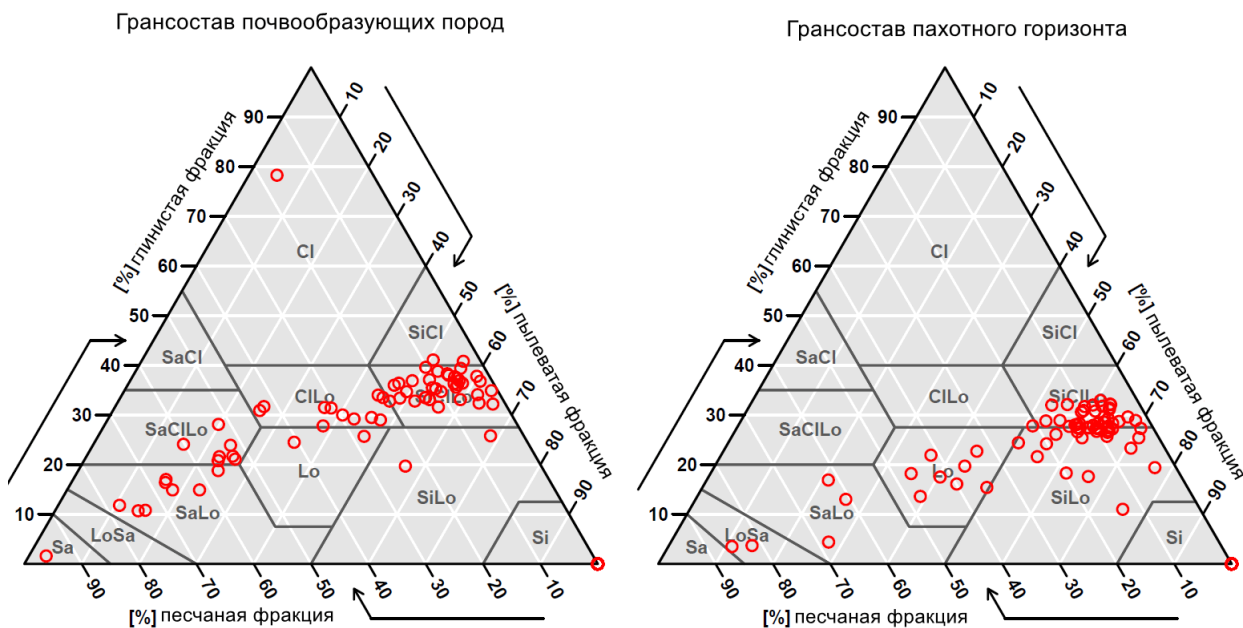


Рис. 2.2.3. Гранулометрический состав почвообразующих пород (слева) и пахотного горизонта (справа) на основе данных из очерков к крупномасштабным почвенным картам и собственных измерений методом лазерной дифракции

Разнообразие ландшафтных условий Окско-Донской низменности заметно выше, чем на Среднерусской возвышенности. В условиях разнообразного рельефа от западных плоских междуречий до пологих и покатых придолинных склонов реализуются условия для формирования нескольких контрастных типов почв.

История изучения переувлажненных почв черноземного ряда Окско-Донской низменности начинается с работ В.В. Докучаева (1883), Н.Н. Розова (1939), А.А. Роде и В.А. Ковды (1939) и некоторых других ученых, которые предложили выделять черноземы избыточного увлажнения на одном из самых высоких таксономических уровней.

Наиболее подробно вопросы широко распространения лугово-черноземных и иных гидроморфных вариантов черноземных почв описаны в работах А.Б. и Б.П. Ахтырцевых (1981, 1982, 1993, 1999). Кроме того, большое внимание привлекали почвы западин, их морфология и генезис (Роде, 2008; Зайдельман, 2013).

Ландшафтная типология для данного региона предложена в работах Воронежских ландшафтоведов (Мильков, 1976, 1981) и включает несколько литолого-геоморфологических вариантов типов местностей. *Междуречный недренируемый тип местности* приурочен к центральным, абсолютно плоским, участкам междуречья. Перенос влаги и растворенных веществ здесь затруднен, в связи с чем создаются условия для застоя влаги и формирования почв гидроморфного ряда (рис. 2.2.4). Суффозионно-термокарстовые западины в еще большей степени способствуют переувлажнению и ограничениям в использовании (рис. 2.2.5).

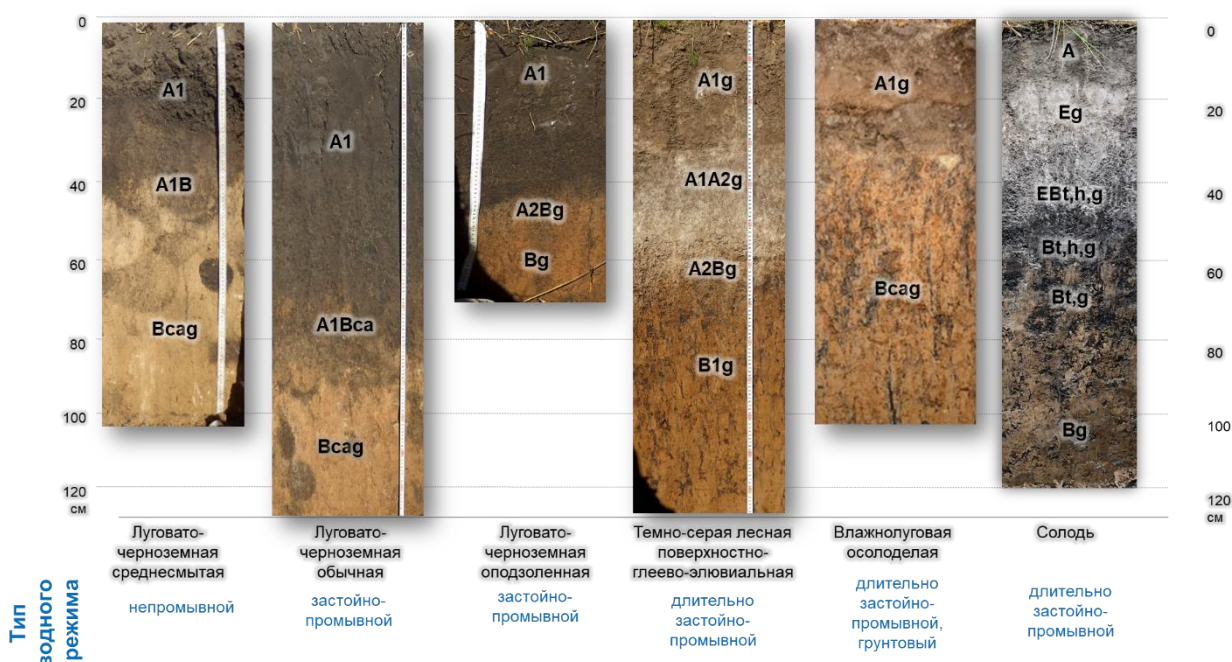


Рис. 2.2.4. Почвы возрастающего ряда гидроморфизма Окско-Донской низменности

Его характерной особенностью является замедленный дренаж ввиду небольших уклонов поверхности и наличия водоупора из средних и тяжелых суглинков (местами глин), близкое залегание грунтовых вод (3 – 6 м). Коренная растительность представлена луговыми злаково-разнотравными и разнотравно-злаковыми степями в сочетании с дубовыми лесами, однако она сильно трансформирована в результате антропогенной деятельности. Фоновыми почвами являются лугово-черноземные, которые формируются из-за замедленного оттока и являются полугидроморфными вариантами черноземов. В целом, для почвенно-растительного покрова характерна комплексность ввиду развития западин и специфического водного режима. Фоновыми почвами недренируемого типа

местности являются лугово-черноземные тяжелосуглинистые (**Чл2**). Они представляют собой полугидроморфные аналоги черноземов, формируясь в условиях плоских недренируемых или слабодренируемых междуречий, подстилаемых мореной, с залеганием грунтовых вод на глубине 3 – 6 м. Типичный профиль состоит из горизонтов $A \rightarrow AB \rightarrow B_{ca}(q) \rightarrow C_{sa}q$. Свидетельства частого переувлажнения – обильное количество марганцевых примазок и конкреций в профиле, начиная с переходных горизонтов AB : AB_{ca} , AB_{qca} , AB_q (по данным собранных полевых материалов минимальная глубина их встречаемости в пределах региона исследования составляет 31 см). В верхней части почвенного профиля повсеместно присутствуют следы потечности гумуса.



Рис. 2.2.5. Междуречный недренируемый тип местности. Фото автора с БПЛА.

Еще более гидроморфный вариант почв – черноземно-луговые (**Лч**), формируются в условиях залегания грунтовых вод на глубине 1.5-3 м. Дополнительная влага в них сохраняется за счет замедленного дренажа ввиду плоского рельефа и тяжелого механического состава, а также из-за соседства с более гидроморфными местообитаниями (западинами). Кроме того, в отличие от лугово-черноземных почв, в которых влияние грунтовых вод проявляется в нижней части профиля, в черноземно-луговых воздействие грунтовых вод оказывается на весь профиль, и испарение грунтовых вод также проходит через все горизонты. Таким образом, необходимые условия для их формирования – наличие водоупора на небольшой глубине и западин, плоский рельеф, повышенное увлажнение, травяная растительность. В общем случае профиль состоит из следующих горизонтов: $A \rightarrow AB \rightarrow B_g$. Характерна карбонатность по всему профилю в виде журавчиков и конкреций,

присутствие железистых конкреций и гумусовых потеков. В сочетании с черноземно-луговыми часто в более пониженных позициях встречаются черноземно-влажнoluговые почвы (**ЧлВл**). Грунтовые воды в них находятся на глубине 1 – 1.5 м в течение всего периода вегетации, а поверхностное затопление весенними водами продолжается до 3 недель. Строение почвенного профиля схоже с Чл, но признаки оглеения (сизые и бурые пятна оглеения, железомарганцевые конкреции) наблюдаются уже в переходном горизонте: $A \rightarrow AB_g \rightarrow B_g \rightarrow C_g$. В пределах плоского междуречья активное развитие получили блюдцеобразные западины и небольшие понижения с луговой и кустарниковой растительностью. Их формирование связано с суффозионными процессами и близким залеганием грунтовых вод. Для них характерен особый тип почв – солоды (**Сд**), который образуется под действием сезонного поверхностного переувлажнения и подтягивания грунтовых вод. Профиль солодей сильно дифференцирован, представлен следующим набором генетических горизонтов: $A_d \rightarrow A \rightarrow El_g \rightarrow ElB_g \rightarrow V_{ca,t,g} \rightarrow C_{ca,g}$. Элювиальный горизонт белесого цвета с комковато-плитчатой структурой (бесструктурный) и возможным наличием ржавым пятен железа. Ниже залегает горизонт с обилием железных и гумусовых примазок и конкреций, которые вымываются из верхних частей профиля; ниже он переходит в текстурный горизонт $V_{ca,t,g}$, характеризующийся тяжелым механическим составом, темно-бурой окраской и повышенной плотностью, также обогащенный железогумусовыми пятнами и потеками, железо-марганцевыми конкрециями. Хозяйственное использование солодей затруднено ввиду неблагоприятного водного и химического режима, а также их положения в понижениях рельефа, поэтому на них сохраняется луговая и древесная растительность. Помимо солодей, в западинах формируются серые лесные поверхностно-глеёво-элювиальные почвы (**Л2пгэ**), в которых грунтовые воды залегают на глубине 1 – 3 м. После весеннего снеготаяния и в конце осени западины заполняются водой, а в засушливый летний период пересыхают. Для них характерен промывной тип водного режима и выраженный белесый горизонт, формирующийся в результате чередования условий избыточного поверхностного увлажнения за счет миграции влаги с окружающих пространств и обсыхания западин.

Почвы болотного ряда – **лугово-болотные** (Бл) и **болотные** (Бт) индицируются в более глубоких западинах с УГВ на глубине 1 – 2 м от поверхности, в которых практически постоянно сохраняется влага. Набор горизонтов имеет следующий состав: $A_v \rightarrow A_{1g} \rightarrow B_g \rightarrow C$. Для них типичны луговые влаголюбивые виды: щучка, мятлик болотный, некоторые осоки, вейник седеющий, тростник (во влажные периоды) и др.

Еще более гидроморфным вариантом междуречного недренируемого типа местности выступает *плоскоместный озерно-болотный* вариант. Он занимает самые

высокие и плоские позиции рельефа с абсолютным преобладанием западин с болотными торфянисто-перегнойно-глеевыми почвами под колками и слабовыпуклыми распаханными участками с черноземно-луговыми почвами.

Междуречный замедленно-дренируемый вариант также приурочен к междуречьям, но с заметно меньшей долей западинного комплекса в ландшафте. Большая часть междуречья занята пашней, где основными выращиваемыми культурами являются зерновые: пшеница (озимая и яровая), ячмень, кукуруза, а также соя, подсолнечник, сахарная свекла, рапс и люцерна. Ограничения в использовании земель связаны с повышенным увлажнением в некоторых позициях рельефа, и это негативно отражается на урожайности. Фоновыми почвами являются лугово-черноземные в комплексе с луговато-черноземными на самых дренируемых позициях. Луговато-черноземные почвы (Чл1) – подтип лугово-черноземных – образуются в результате периодически-повышенного поверхностного увлажнения. Они располагаются в депрессиях, у подножий склонов и на надпойменных террасах, где возможно задержание влаги. Помимо повышенного содержания гумуса наблюдается большая растёчность его окраски в иллювиальном горизонте и присутствие слабовыраженных форм оглеения (примазки, ржаво-бурые жилки), которые при уменьшении увлажнения могут исчезать. Строение почвенного профиля такое же, как у лугово-черноземных почв, различия проявляются в глубине залегания грунтовых вод: луговато-черноземные характеризуются отсутствием постоянного стояния вод и имеют признаки переувлажнения в нижней части профиля от стояния сезонной верховодки.

Плакорный тип местности занимает самые дренируемые позиции рельефа Окско-Донской низменности, приуроченные, преимущественно, к придолинным пологим склонам. Характеризуется нормальными условиями увлажнения без западин и проявления эрозии. Фоновыми почвами выступают черноземы выщелоченные (Чв) и типичные (Чт), причем выщелоченные черноземы занимают лишь слабовогнутые позиции: ложбины микрозападины и др. Для этих почв характерно формирование темного гумусового и иллювиального горизонтов и максимальное развитие профиля с интенсивным накоплением гумуса. В черноземах выщелоченных происходит вынос карбонатов и осветление горизонтов в нижних частях, наблюдается языковатость и растёчность окраски в результате периодического промывания (Мильков, 1986). Данный тип местности в годы со средней влагообеспеченностью обладают наивысшим потенциалом плодородия относительно всех остальных, благодаря отсутствию высокой внутриландшафтной контрастности.

Склоновый тип местности включает довольно крутые (более 3°) присетевые склоны. Его особенностями являются повышенная эродированность, расчлененность

рельефа и сравнительно высокая залесенность. Преобладают черноземы и луговато-черноземные почвы разной степени эродированности. В годы с повышенной влагообеспеченностью данный тип местности, наряду с плакорным, обладает наивысшим потенциалом плодородия, поскольку остальные типы будут испытывать сильное переувлажнение.

Отдельно выделяется овражно-балочный комплекс (ОБК). Почвы овражно-балочного комплекса представлены различными типами и подтипами с наложенными процессами смыва и намыва, аккумуляции материала с вышележащих позиций (в основном с распахиваемых полей): смытые, намывные, переотложенные и малоразвитые категории. В днищах к зональным процессам почвообразования прибавляются делювиальный и аллювиальный, в то время как на склонах – процессы денудации и эрозии. В таких почвах возрастает роль почвообразующих пород и интенсивности экзогенных процессов. Намывные почвы характеризуются увеличенной мощностью горизонтов и оструктуренностью, в переотложенных к данным признакам добавляется слоистость.

2.3. Ландшафты лесостепи Бугульминско-Белебеевской возвышенности

Согласно карте физико-географического районирования СССР (Карта..., 1986), исследуемая территория располагается в физико-географической стране Русская равнина, Лесостепной области, Бугульминско-Белебеевской провинции (рис. 2.3.1., цифра 1). С севера к ней примыкают Вятско-Камская (2) и Уфимско-Сылвинская (3) провинции Лесной области Русской равнины, с востока – Бело-Икская провинция (4) Южно-Уральской области Уральской горной страны, с юга – провинция Общий Сырт (5) Степной области, с запада – Кинельско-Камская провинция (6) Лесостепной области. Согласно физико-географическому районированию Ф.Н. Милькова (1960), данная провинция провинцией Высокого Заволжья.

Изучаемая территория расположена в пределах Прибельской увалисто-волнистой равнины, в 100 км западнее макросклонов хребта Южного Урала – отрогов Бугульминско-Белебеевской возвышенности (рис. 3.4.2). Гидрографическая сеть территории представлена рекой Белая и ее притоками: Уфа, Уршак, Дема. Такое географическое положение, и в частности, обилие пойменных участков и возвышенностей обусловили сильную расчлененность рельефа. Например, только среди сельскохозяйственных угодий (70 % общей площади) более 42 % расположено на склонах крутизной 1–5° (Габбасова, Хабиров, 2010). Хотя известно, что под земледелие в первую очередь отводят территории, где местность наименее пересечена. Климат в пределах территории исследований умеренно континентальный, достаточно влажный. Среднегодовая температура воздуха: +3,8 °С. Коэффициент увлажнения составляет 0,9. Среднегодовое количество осадков: 510 мм,

около 2/3 из них выпадает летом (Абдрахманов и др., 2002). Повторяемость дождей с интенсивностью 5–7 мм/мин не превышает 5%. Зима в регионе умеренно холодная и продолжительная. Период с устойчивым снежным покровом в среднем длится около 5,5 месяцев (с ноября по апрель), средняя мощность снега – 0,5 м. Глубина промерзания почвы достигает 94 см (Халевицкая и др., 1976), что в сочетании с другими агроклиматическими факторами способствует развитию эрозии почв при снеготаянии (Комиссаров, 2014). Возвышенный рельеф с глубоко врезанными речными долинами обусловил высокий коэффициент расчленения – 1,4 км/км². В районе распространены широколиственные леса с примесью берёзы и дуба. Несмотря на невысокую лесистость (8,4%), развитие ветровой эрозии в регионе минимальное (Соболь, Габбасова, Комиссаров, 2015).

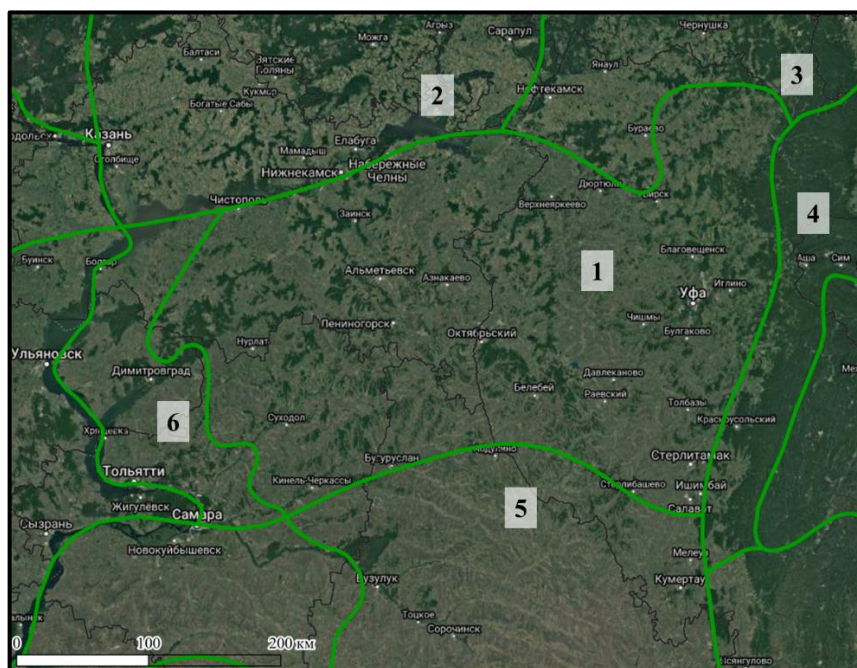


Рис. 2.3.1. Положение Бугульминско-Белебеевской провинции на фоне космического снимка и крупных населённых пунктов

Наряду с развитием водно-эрозионных процессов в регионе протекает и карстообразование. В республике Башкортостан суффозионным процессам подвержено около 50 % территории, почти 30 % из них поражено поверхностными карстопоявлениями. Десятки новых карстовых провалов фиксируются ежегодно, аномально крупные обвалы диаметром более 15 м и глубиной >10 м происходят один раз в 5–6 лет (Смирнов, Дурнаева, Абдрахманов, 2018). Таким образом, лесостепная зона Предуралья и, в частности Уфимский район Республики Башкортостан, характеризуются выраженным мезо- и микрорельефом, формирование которого обусловлено комплексным воздействием различных экзогенных процессов. Наличие таких процессов и расчлененный рельеф Уфимского района осложняет проведение почвенного и ландшафтного картографирования.

Рельеф и состав отложений являются ведущими факторами в формировании структуры почвенного покрова региона (Габбасова, Хабилов, 2010; Почвы Башкортостана, 1995). Рельеф территории значительно расчленен в связи с большими перепадами высот. Абсолютные высоты варьируют от 90 м в долине реки Белая до 280 м на междуречьях. В составе отложений преобладают дочетвертичные карбонатные и бескарбонатные коренные отложения палеогенового и неогенового возраста: известняки, мергели и галечники (рис. 2.3.2). Верхние части холмов перекрыты рыхлой толщей плиоценовых опесчаненных глин с камнями и каменистых песков. Склоны холмов и долины рек перекрыты маломощным (первые метры) чехлом лессовидных средних и тяжелых суглинков.

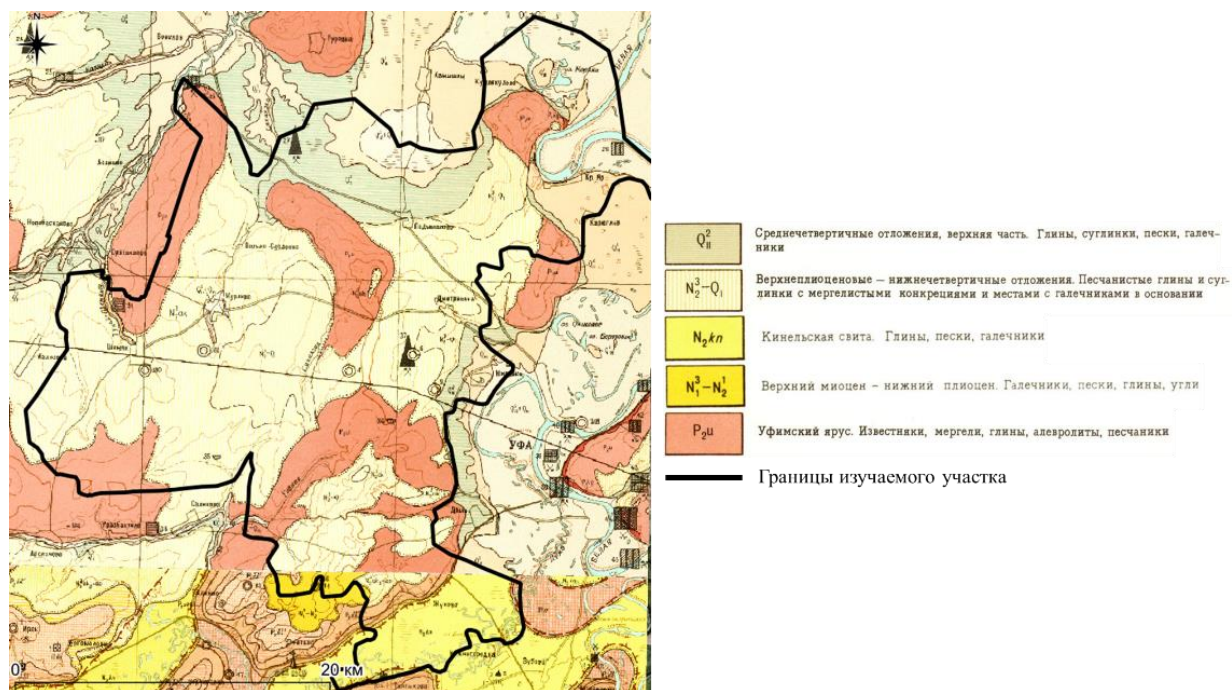


Рис. 2.3.2. Фрагмент геологической карты ключевого участка на Бугульминско-Белебеевской возвышенности

Почвенный покров в пределах исследуемого участка неоднороден и многообразен. Его изучение было начато в конце XIX века. Первые упоминания о почвах есть в работах В.В. Докучаева (1883), детальность которых была уточнена в работах Н.М. Сибирцева (1953). В послевоенные годы была проведена массовая инвентаризация почвенных ресурсов республики с составлением крупномасштабных почвенных карт. Обобщающий труд о почвах и их пространственному варьированию в связи с особенностями отложений и климата республики опубликованы в монографии В.П. Богомоллова (1954). В последующие годы большим коллективом авторов был опубликован труд о Почвах Башкортостана (1995). Современные исследования направлены на изучение почв и микроструктур почвенного покрова в условиях развития эрозионных и карстовых процессов, физики и химии почв (Габбасова, Хабилов, 2010).

Согласно современным представлениям, почвенный покров включает черноземы оподзоленные, выщелоченные и типичные; серые лесные и темно-серые лесные; лугово-черноземные, влажно-луговые, аллювиальные лугово-болотные, торфяные и почвы овражно-балочного комплекса.

Наивысшие элементы рельефа Прибельской возвышенности занимают дочетвертичные каменисто-песчаные отложения, выходящие на поверхность. В таких условиях формируются серые лесные и темно-серые лесные песчаные и каменистые почвы. *Останцово-водораздельный тип* занят, преимущественно, лесными фитоценозами, частично сажеными. В породном составе преобладают сосняки с редкими примесями мелколиственных пород.

В верхних частях приводораздельных и присетевых склонов формируется *плацкартный тип местности*. Почвенный покров представлен черноземами типичными и выщелоченными с развитой ложбинной сетью, в которой формируются луговато-черноземные почвы. Этот тип наиболее благоприятен для земледелия и поэтому, по большей части распахан. Лесные массивы представлены широколиственными породами с примесью сосны обыкновенной.

Склоновый тип местности занимает присетевые склоны крутизной более 3° с активным оттоком влаги и проявлениями как линейной, так и плоскостной эрозии. Местами под лесом или лугами, но, в основном, распахивается. Почвенный покров сильноконтрастный. На склонах обильно развиты глубоковрезанные овраги и балки со смыто-намытыми почвами и представлен эродированными вариантами зональных почв. При этом сплошных ареалов смытых почв, как на Среднерусской возвышенности, не формируется, основные ареалы смытых почв приурочены к элементам эрозионной сети. Иногда на склонах встречается подстиление карстующимися породами, из-за чего локально проявляются целые серии глубоких зелесённых западин (Абдрахманов и др..., 2002)

Небольшие ареалы занимает *междуречный замедленно-дренируемый вариант* типа местности, для которого характерны небольшие суффозионные западины на субгоризонтальных поверхностях, либо множественные слабоогнутые верховья ложбин. В данном типе местности преобладают пашни на луговато-черноземных почвах и колки на гидроморфных вариантах почв в западинах.

Для нижних выположенных частей склонов и днищ широких ложбин характерны постоянно переувлажненные почвы — черноземно-луговые и влажно-луговые. Преимущественно они заняты сенокосами, лугами или мелколиственными лесами. Такие урочища относятся к *междуречному недренируемому* типу местности.

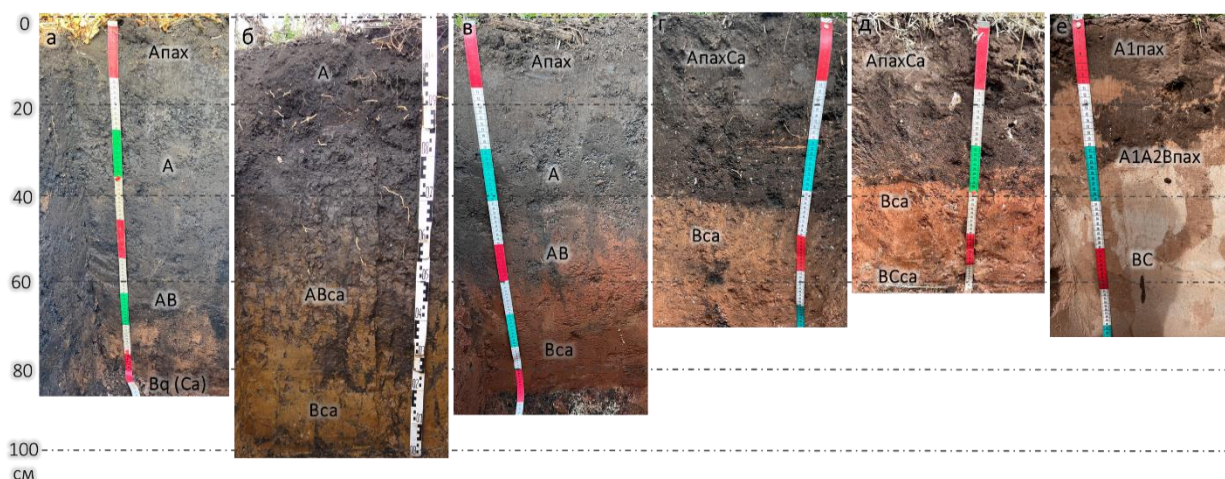


Рис. 2.3.3. Доминантные почвы ключевого участка на Бугульминско-Белебеевской возвышенности: а- луговато-черноземная суглинистая пахотная, б – чернозем типичный суглинистый старопашотный, в – чернозем выщелоченный глинистый пахотный, г – чернозем типичный карбонатный слабосмытый пахотный, д – чернозем типичный среднесмытый щебнисто-суглинистый пахотный, е – темно-серая лесная пахотная супесчаная

В связи со сложными геоморфологическими условиями территории отдельно выделяется овражно-балочный комплекс. Он включает крупные мезоформы рельефа эрозионного генезиса. Это овраги и балки с широкими днищами, для которых характерно сезонное переувлажнение и гидроморфные почвы (лугово-черноземные и черноземно-луговые). Склоны оврагов и балок в значительной степени эродированы, местами до выходов коренных пород.

3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Методология выявления межкомпонентных связей методами цифровой почвенной картографии

При построении модели межкомпонентных связей, их картографическом выражении и межрегиональном сравнении использовалась группа методов, разработанных в рамках крупномасштабной почвенной картографии в методологии структур почвенного покрова (Фридланд, 1972; Сорокина, 2006), ландшафтно-типологического подхода (Мильков, 1966), цифрового картографирования и моделирования (McBratney et al., 2003; Цифровая почвенная картография..., 2012) на базе геоинформационных технологий пространственного анализа, эмпирического и имитационного геопространственного физико-математического моделирования (Mitas, Mitasova, 1998; Van Oost et.al., 2000) в рамках методологической концепции «фактор-процесс-свойство» (Герасимов, 1975). В работе используется почва как основной диагностический показатель процессов функционирования ландшафта, а структура почвенного покрова как основной диагностический показатель морфологической структуры ландшафта. В условиях относительно однородных почвообразующих пород и повсеместной распаханности ведущим

фактором дифференциации почвенного покрова выступает микро- и мезорельеф, поэтому его анализу уделяется особое значение (Сорокина, 1976; Фишман, 1977, Козлов, 2009; Левченко и др., 2017).

Общий алгоритм построения моделей межкомпонентных связей, их картографического выражения и межрегиональных сравнений включает следующие этапы.

1. Построение и анализ факторной основы моделирования (цифровой модели рельефа);
2. Полевое ландшафтное обследование для определения свойств почв и других компонентов как основных диагностических показателей структуры и функционирования ландшафтов;
3. Региональная параметризация и расчет процессных характеристик перераспределенного слоя осадков и темпов смыва почв;
4. Построение дискриминантной модели, связывающей описанные в поле почвы и их свойства с набором факторных и процессных характеристик;
5. Построение на основе моделей карт доминантного прогнозного таксона почв и неопределенности прогноза;
6. Типизация почв в почвенные комбинации согласно Общесоюзной инструкции (1972);
7. Группировка почвенных комбинаций в типы местности по принципу функциональной и генетической общности.

Межрегиональные сравнения включают две взаимосвязанные части: сопоставление морфологической структуры и функциональных показателей типов местностей разных ландшафтных провинций.

При сравнении морфологической структуры различия определяются по составу компонентов типов местностей (сочетанию доминантных и субдоминантных урочищ, набору таксонов почв, типов растительности), соотношению их площадей, взаиморасположению морфологических единиц, консервативным факторам ландшафтной дифференциации (рельефу и составу отложений), характерным масштабным уровням рельефа и их роли в формировании морфолитогенной основы ландшафтов.

Для верификации результатов крупномасштабного картографического моделирования проведены детальные топографическая и почвенная съемки ключей, применены почвенно-аналитические методы и методы статистического анализа данных, осуществлено картирование детальных участков цифровыми методами.

В условиях относительно однородных почвообразующих пород ведущим фактором дифференциации почвенного покрова выступает микро- и мезорельеф (Сорокина, 1976; Фишман, 1977, Левченко и др., 2017). На всех участках его характеристика как факторно-

индикационной основы дана по цифровой модели рельефа (ЦМР) разрешением 20 метров, построенной по высотным отметкам топографической карты.

Из-за недостаточного охвата территории топографическими картами при построении также частично (не более 10% площади) использовалась цифровая модель местности SRTM разрешением 1'' (около 30 м на местности), качество которой было повышено экспертной корректировкой горизонталей с использованием среднемасштабных топографических карт и космических снимков высокого разрешения. Разрешение моделей выбрано таким образом, чтобы средние размеры ЭПА были меньше шага сетки ЦМР. На её основе произведен расчет морфометрических величин, отражающих процессы перераспределения тепла и влаги (Сысуев, 2003; Weiss, 2001; Shary et.al., 2002; Zhou et.al., 2008; Olaya, Conrad, 2009). Всего рассчитано более 20 характеристик, часть из которых представлена в таблице 3.1.1.

Таблица 3.1.1. Факторно-индикационная основа, рассчитываемая по ЦМР

Переменная	Содержание	Индицируемый процесс
Крутизна (slope)	Скорость изменения высоты в гравитационном поле	Скорость латерального переноса вещества
Глубина замкнутых понижений (Closed depression (cdep))	Расположение В-депрессий	Расположение бессточных областей с повышенным увлажнением
Поперечная кривизна (Cross-Sectional Curvature)	Выпуклость/вогнутость (ступенчатость) склонов	Сток или аккумуляция вещества
Общая кривизна (General Curvature)	Выпуклость/вогнутость склонов	Сток или аккумуляция вещества
Плановая кривизна (Plan curvature)	Описывает градиент экспозиции вдоль заданного контура, влияет на конвергентность/ дивергентность поверхностного стока	Стекание или растекание воды
Общая площадь водосбора (Flow Accumulation (FlowAcc))	Суммарный вес всех ячеек, выпадающих в каждую следующую ячейку вниз по склону	Количество воды, приходящее в данную ячейку растра с водосбора
Топографический индекс влажности (Topographic wetness index (TWI))	Логарифм отношения площади водосбора выше ячейки растра к уклону ячейки	Степень увлажненности территории
Модифицированная площадь водосбора (Modified Catchment Area (MCA))	Сумма площадей ячеек, с которых стекает вода к данной ячейке	Площадь водосбора ячейки растра
Относительное превышение в окрестности	Сравнивает значение высоты каждого пикселя со средней высотой в окрестности	Сток или аккумуляция вещества

(Topographic Position Index(TPI))	пикселя. Рассчитывается для разных окрестностей с шагом возрастания 250 метров от 100 метров до 3 км	
Индекс шероховатости Terrain Ruggedness Index (TRI)	Индекс горизонтальной расчлененности в окрестности пикселя	Сток или аккумуляция вещества
Потенциальная приходящая солнечная радиация (Potential Incoming Solar Radiation)	Расчетные значения прихода годовой солнечной радиации при безоблачной погоде	Перераспределение солнечной энергии по элементам рельефа

Помимо геоморфометрических и инсоляционных величин в качестве переменной при моделировании использовался слой перераспределенных осадков (мм), рассчитанный по модели SIMWE. Модель **SIMWE** (**SIM**ulated **W**ater **E**rosion) (Mitas, Mitasova, 1998) создана для расчета поверхностного стока и интенсивности водной эрозии (движения наносов) на основе ЦМР и ее производных (*уклон, плановая и профильная кривизна*) с параметрами:

- количество избыточных осадков,
- скорость инфильтрации,
- коэффициент диффузии воды,
- коэффициент шероховатости поверхности (коэффициент Шези-Маннинга).

В расчетах используется стандартная система гидрологических уравнений в частных производных по пространственным координатам и времени. Очевидным недостатком модели является отсутствие регионализированной переменной, например, площади водосбора, описывающей увеличение потока влаги по мере движения по элементам микро- и мезорельефа. Расчётный блок модели реализован в открытом ГИС пакете GRASS GIS.

Для выявления функциональных связей между интенсивностью эрозионных процессов и структурой почвенного покрова на Среднерусской возвышенности были использованы расчеты темпов смыва почвы в модели **WATEM/SEDEM**. Модель состоит из двух расчетных блоков **WaTEM** (**W**ater and **T**illage **E**rosion **M**odel) (Van Oost et al., 2000) и **SEDEM** (**S**ediment **D**elivery **M**odel) (Van Rompay et al., 2001). Алгоритм расчета базируется на модифицированном универсальном уравнении смыва почв **RUSLE** (Renard, 1997) и имеет сходные входные параметры.

Для расчетов использована цифровая модель рельефа, производные от нее морфометрические величины (уклон, LS-factor). Остальные параметры (эрозионный индекс осадков, эродируемость почвы и почвозащитная способность растительности) были взяты по литературным данным (Ларионов, 1993; Литвин, 2002) в среднем для территории

исследования при участии сотрудников лаборатории Эрозии почв Почвенного института. Необходимо отметить, что алгоритм расчета подразумевает использование границ сельскохозяйственных полей, а для несельскохозяйственных земель темпы смыва составляют 0 т/га*год.

Картирование таксонов почв и структур почвенного покрова производилось на основе разнообразных морфометрических величин (МВ), показанных в таблице 3.1.1., путем нахождения математической связи между полевыми описаниями основных диагностических показателей в точках и набором МВ. Принципиальная схема цифрового почвенно-ландшафтного картографирования представлена на рис 3.1.1.

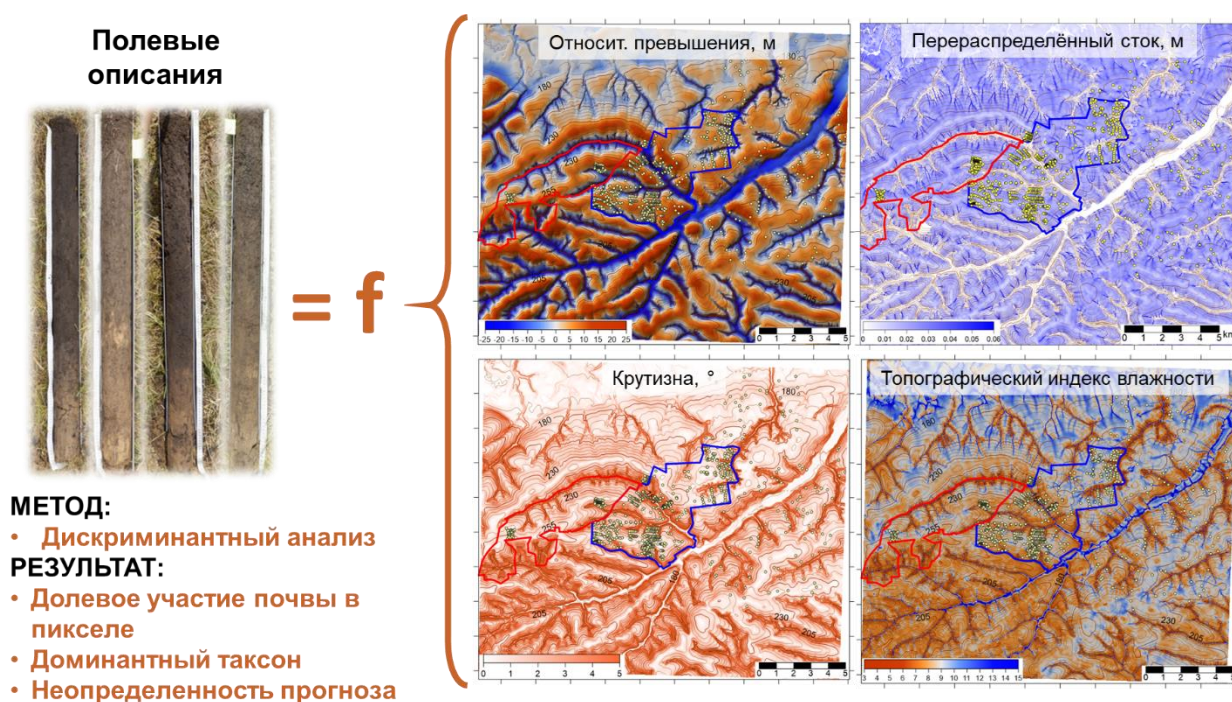


Рис. 3.1.1. Принципиальная схема цифрового почвенно-ландшафтного картографирования

Картирование континуальных показателей на детальном ключе (глубины вторичных карбонатов или мощности гумусового горизонта) проводилось множественным линейным регрессионным анализом.

Линейный регрессионный анализ — метод восстановления зависимости между двумя переменными (Пузаченко, 2004). Если дано распределение двух случайных величин Y и X , то регрессией Y по X называется любая функция называется любая функция $g(X)$ приближенно представляющая статистическую зависимость Y от X . Выводится уравнение, в котором есть несколько переменных X , подставляя которые можно найти Y . Его вид: $y = a + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + \dots \pm \varepsilon$, где $x_1, x_2, \dots$ — переменные, в нашем случае — морфометрические величины, a, b — коэффициенты линейной регрессии, ε — аддитивная случайная величина, неописанная часть регрессии. Предполагается, что случайная

величина распределена нормально с нулевым математическим ожиданием и фиксированной дисперсией, которая не зависит от переменных x , y . При таких предположениях параметры регрессионной модели вычисляются с помощью метода наименьших квадратов.

Для отбора наиболее значимых показателей рельефа использовалась пошаговая регрессия, производящая отбрасывание неинформативных показателей в соответствии с заданными F-уровнями значимости.

Регрессионные модели строились в программе STATISTICA, где были отобраны значимые переменные, достоверно описывающие варьирование изучаемого параметра и имеющие четкий физический смысл. Регрессионное уравнение из программы STATISTICA переносилось в программу SAGA GIS, и карты строились на основании точек полевых описаний и морфометрических показателей в ячейках сетки.

Установление отношений между таксонами почв и морфометрическими величинами производилось стандартным статистическим методом – линейным дискриминантным анализом.

Линейный дискриминантный анализ (ЛДА, англ. Linear Discriminant Analysis, LDA) – метод статистики, применяемый для нахождения линейных комбинаций признаков, наилучшим образом разделяющих два или более класса объектов или событий (дискретных величин), в нашем случае – таксонов почв (Webster, Burrough, 1974; Пузаченко, 2004).

ЛДА тесно связан с дисперсионным анализом и регрессионным анализом, также пытающимися выразить какую-либо зависимую переменную через линейную комбинацию других признаков или измерений, поэтому считается одним из простейших методов классификации.

Для каждого образца объекта или события с известным классом Y рассматривается набор наблюдений X (называемых независимыми переменными или измерениями). Набор таких образцов называется обучающей выборкой. Задачи классификации состоит в том, чтобы построить хороший прогноз класса Y для всякого так же распределённого объекта (не обязательно содержащегося в обучающей выборке), имея только наблюдения X (www.machinelearning.ru).

В обучающей выборке дискриминантного анализа включаются полевые наблюдения таксонов почв и соответствующие им геоморфометрические характеристики. Для каждого таксона находится положение в признаковом пространстве максимально отличное от другого таксона. Критерием достоверности отличия классов является критерий Фишера – отношение межгрупповой дисперсии к внутригрупповой. Чем он больше, тем достовернее различие между классами.

Для отбора наиболее значимых показателей рельефа использовалась пошаговая регрессия, производящая отбрасывание неинформативных показателей в соответствии с заданными F-уровнями значимости.

Дискриминантные модели строились в программе STATISTICA, где были отобраны значимые переменные, достоверно описывающие варьирование изучаемого параметра и имеющие четкий физический смысл.

Первичным результатом моделирования выступает апостериорная вероятность каждого из предсказываемых таксонов почв в каждом пикселе цифровой модели рельефа, рассматриваемая как их доленое участие. Во-вторых, для каждого элемента сетки рассчитывается неопределенность прогноза, показывающая элементы рельефа с наиболее простым и точно предсказываемым компонентным составом почвенного покрова и места с высокой степенью комплексности морфологической структуры.

Доленое участие таксонов типизируется в элементарные почвенные структуры (ЭПС), границы которых, в целом, соответствуют границам подурочищ. Для типизации микроструктур почвенного покрова, основываясь на утвержденных методических рекомендациях (Общесоюзная инструкция..., 1976), составляется классификационная таблица, и всем элементам растровой сетки, согласно соотношению доленого участия почв в них, придается соответствующий номер ЭПС. Последующая типизация почв в почвенных комбинации осуществлялась на основе постулата, что апостериорные вероятности встречи таксонов почв в пикселе – это доленое участие данной почвы в каждой ячейке растра. Последующая проверка показала достаточную точность для целей исследования.

Проверка качества моделей проводится экспертно-визуальным методом, а также путем количественного сопоставления доленых участков почв в пределах ключевых участков по результатам детальной почвенно-топографической съемки и моделирования. Общая точность модели внутриландшафтных связей оценивалась по точности предсказания индивидуальных таксонов почв и квадрату коэффициента корреляции.

3.2. Материалы и факторно-индикационная основа модели для Среднерусской возвышенности

Изучению данной части Среднерусской возвышенности посвящено множество работ, основная часть которых касается почв и почвенного покрова (Целищева, Дайнеко, 1966; Афанасьева, 1966; Сорокина, 1966, 1976; Фишман, 1971, 1977). В ходе многолетних исследований структуры почвенного покрова и его агрогенной трансформации собран большой массив данных, включающий результаты маршрутных обследований, профилирования и детального картографирования ключевых участков.

Массив почвенного опробования, который включает 1182 описания с точностью географической привязки до 10 метров, составлялся в течение последних 40 лет сотрудниками Почвенного института имени В.В. Докучаева и лично автором (табл. 3.2.1, положение точек описания показано на рис. 3.2.2). Диагностика почв производилась согласно Единому государственному реестру почвенных ресурсов (2014), основанного на классификации 1977 года с региональными дополнениями, внесенными Н.П. Сорокиной (1976). Фотографии некоторых профилей представлены на рис. 3.2.1.

Диагностическим показателем черноземных почв выступает соотношение глубины вскипания вторичных карбонатов и нижней границы гумусового горизонта. В черноземе типичном карбонатном (Чтк) карбонаты находятся в пределах гумусового горизонта, в черноземе типичном (Чт) – в горизонте АВ либо сопряжены с его нижней границей, в черноземе выщелоченном (Чв) – в горизонте В, в луговато-чернозёмных почвах – глубина вскипания находится за пределами почвенного профиля. Дополнительным диагностическим показателем для луговато-чернозёмных почв выступает наличие признаков оглеения в виде железо-марганцевых конкреций и примазок в иллювиальном горизонте. Диагностика смытых почв пахотных склонов (Сорокина, 1966) дана пропорционально сокращению мощности гумусового горизонта по сравнению с почвами субгоризонтальных междуречий (60-85 см). При его сокращении на 25% почва диагностировалась как слабосмытая (45-65 см; индекс э1), на 25-50% - как среднесмытая (35-50 см, индекс э2). Сильносмытых почв не обнаружено.

Таблица 3.2.1. Количество профилей каждого рода почв, описанных в поле или по почвенным картам*

Чл1	Чл1н	Чв	Чвэ1	Чвэ2	Чт	Чтэ1	Чтэ2	Чтк	Чткэ1	Чткэ2	Лчн	Ал	Всего
96	10	307	30	3	366	107	11	161	48	15	16	12	1182

*Чл1 – луговато-черноземная, Лчн – луговато-черноземная намытая, Чв – чернозем выщелоченный, Чвэ1 – чернозем выщелоченный слабосмытый, Чвэ2 – чернозем выщелоченный среднесмытый, Чт – чернозем типичный, Чтэ1 – чернозем типичный слабосмытый, Чтэ2 – чернозем типичный среднесмытый, Чтк – чернозем типичный карбонатный, Чткэ1 – чернозем типичный карбонатный слабосмытый, Чткэ2 – чернозем типичный карбонатный среднесмытый.

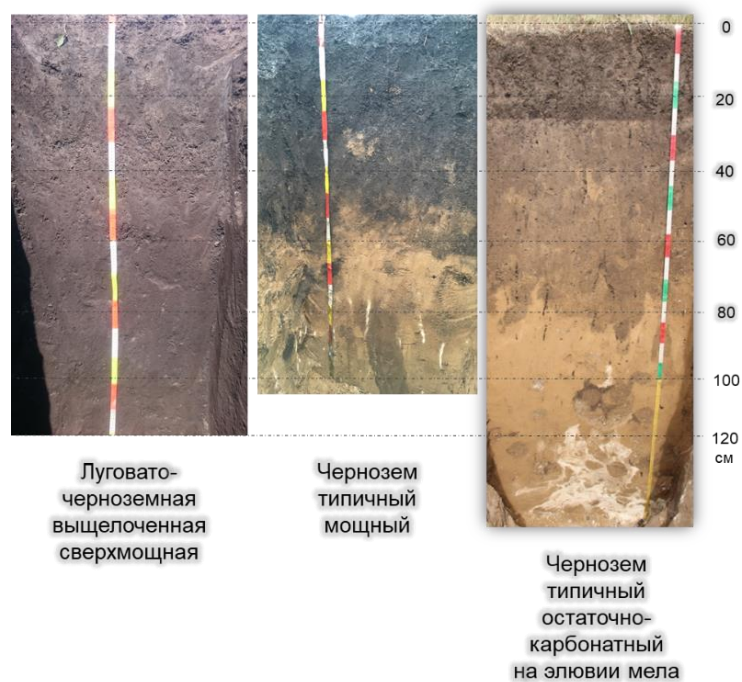


Рис. 3.2.1. Некоторые типы почв ключевого участка на Среднерусской возвышенности

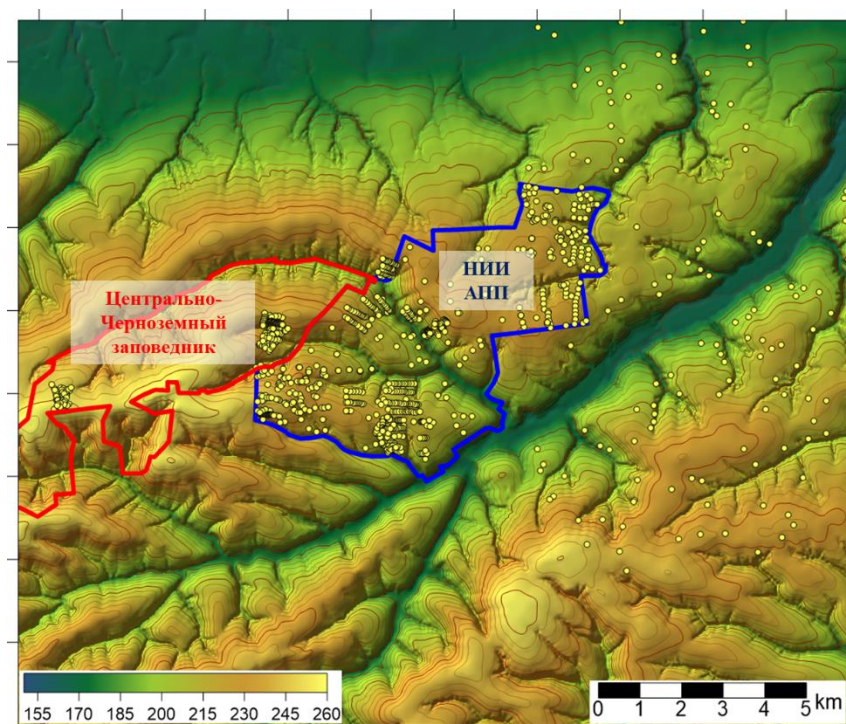


Рис. 3.2.2. Положение точек полевых описаний на ключевом участке Среднерусской возвышенности

Для участка построена цифровая модель рельефа (ЦМР) разрешением 20 метров по данным крупномасштабной топографической карты. По ЦМР рассчитано более 20 морфометрических величин (МВ) рельефа, использованных в качестве факторно-индикационной основы при составлении моделей межкомпонентных связей (рис. 3.2.3).

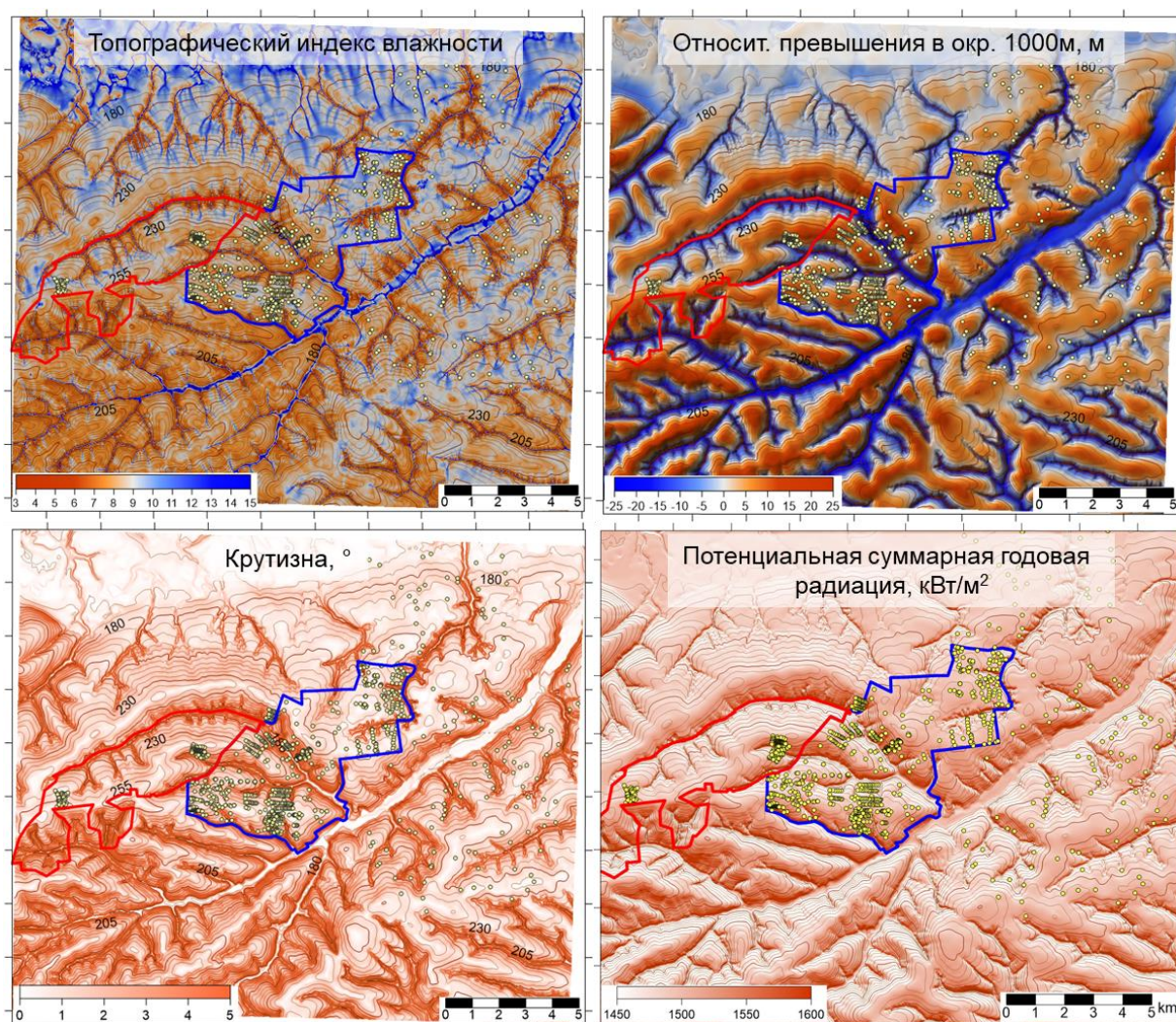


Рис. 3.2.3. Факторно-индикационная основа в модели межкомпонентных связей

Кроме морфометрических величин рельефа, были рассчитаны функциональные показатели: перераспределённый слой осадков по модели SIMWE и интенсивность смыва почв по модели WATEM/SEDEM.

Входные параметры для расчета эрозионной модели были следующие: почвозащитный фактор $C = 0.40$, фактор эродируемости почв $K = 35 \text{ кг} \cdot \text{ч} \cdot \text{МДж}^{-1} \cdot \text{мм}^{-1}$, эрозионный потенциал осадков $R = 290 \text{ МДж} \cdot \text{мм} \cdot \text{га}^{-2} \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$. Они были подобраны исходя из региональных условий при участии лаборатории эрозии почв Почвенного института им. В.В. Докучаева. Необходимо отметить, что расчет темпов смыва ведется только для участков, идентифицированных по космическим снимкам как сельскохозяйственные угодья. Карта темпов смыва представлена на рисунке 3.2.4. Она отражает высокую интенсивность эрозии на пологих и покатых склонах, низкие темпы эрозии в выположенной северной части участка. Необходимо отметить, что эрозионные процессы захватывают некоторые склоны практически целиком, формируя заметные пояса эрозии.

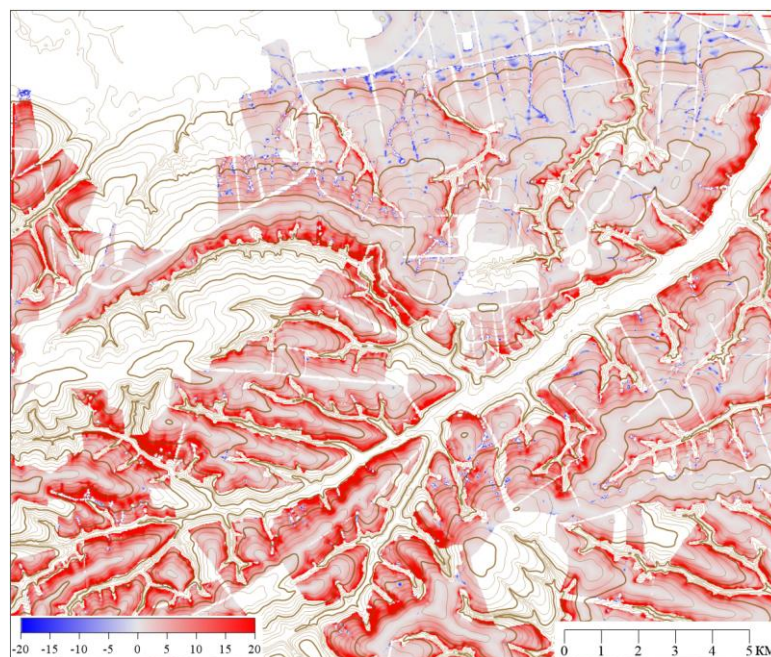


Рис. 3.2.4. Расчет темпов смыва почв по модели WATEM/SEDEM, т/га*год

Расчет перераспределённого слоя осадков произведен по модели SIMWE (рис. 3.2.5). Входные параметры модели описаны в статье (Lozbenev et.al., 2021) с небольшой корректировкой коэффициента шероховатости. Для расчетов он был уменьшен на 10% в связи с тем, что в указанной статье параметризация производилась для целинных условий, но изучаемый ключевой участок, преимущественно, распахан.

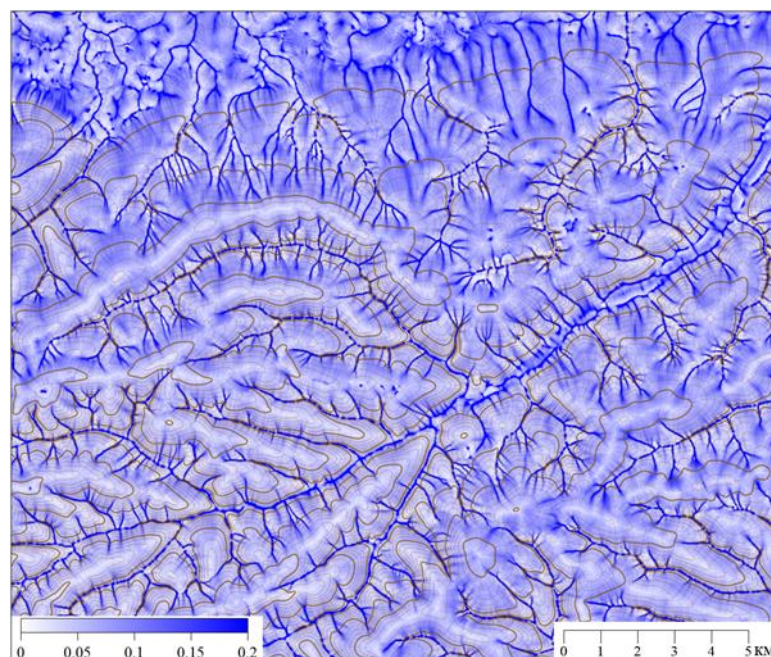


Рис. 3.2.5. Расчет перераспределённого слоя осадков по модели SIMWE, м

Верификация результатов региональных исследований проведена на целинном детальном ключевом участке «Метеоплощадка» в пределах Центрально-Черноземного заповедника им. В.В. Алехина. Участок «Метеоплощадка» приурочен к плоской междуречной поверхности, плавно переходящей в склон в северной части с углом наклона

до 1,5°. Абсолютные высоты участка составляют 268-275 м. Плоское междуречье осложнено реликтовыми сурчинами высотой до 30 см и замкнутыми западинами диаметром порядка 30 метров и глубиной до 3 метров. Пологие склоны имеют ложбинный микрорельеф сложного генезиса с параллельно-струйчатой структурой. Ширина ложбин до 5 метров, глубина до 50 см, расстояние между ложбинами 10-15 метров.

Рельеф ключевого участка определен методом детальной топографической съемки геодезическим комплексом спутникового позиционирования STONEXS9 GNSS - 10000 пикетов площадью 32 га (рисунок 3.2.6.а). Точность измерений – 0,5 см для плановых координат и 1 см для высотных. По результатам топографической съемки методом ординарного кригинга (ordinary kriging) в программе SAGA GIS построена цифровая модель рельефа участка (размер пикселя 2,5х2,5 метра) (рисунок 3.2.6.б), рассчитаны основные морфометрические величины (крутизна, площадь водосбора, топографический индекс влажности и др.) и проведено подробное почвенное обследование (рисунок 3.2.6.с).

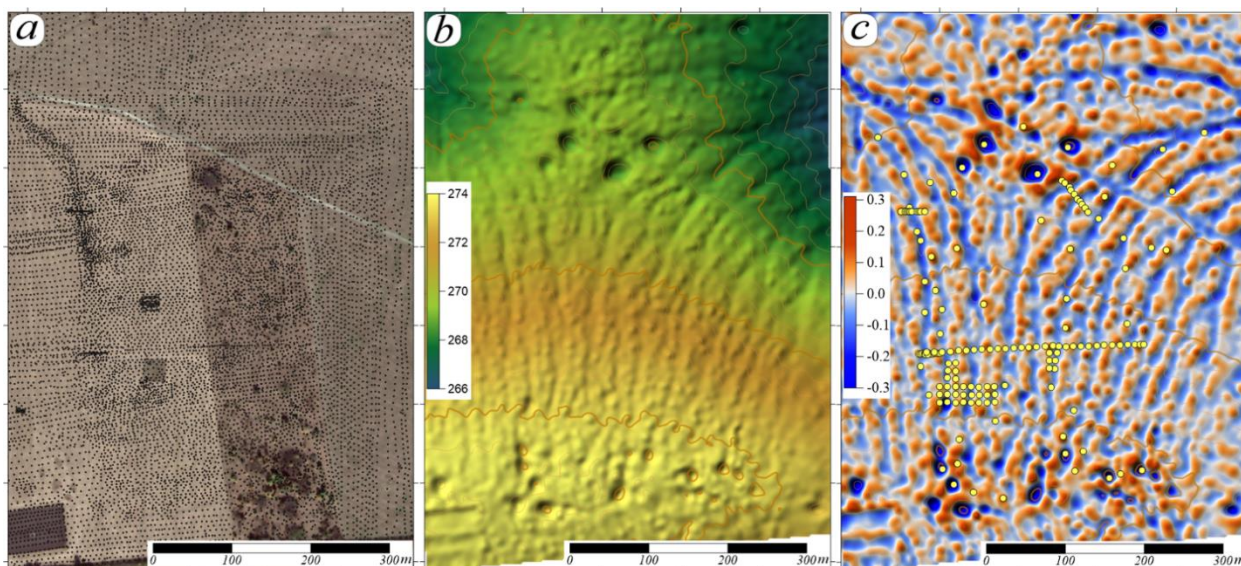


Рис. 3.2.6. Детальный ключевой участок «Метеоплощадка»: а) положение пикетов детальной топографической карты; б) детальная цифровая модель рельефа разрешением 2,5 метра; с) положение точек обследования почв (желтые точки) на фоне индекса относительных превышений

В пределах ключевого участка описано 157 буровых колонок, в которых определена глубина вскипания вторичных карбонатов, а также таксономические категории почв. Всего выделено 5 подтипов почв: черноземы типичные карбонатные, черноземы типичные, черноземы выщелоченные, луговато-черноземные обычные и выщелоченные почвы.

Также на 34 площадках геоботанических описаний площадью 1м² выполнены подробные геоботанические описания: зафиксирован видовой состав растений и обилие видов. Описанные фитоценозы характеризуются высоким уровнем флористической насыщенности (среднее значение – 23 вида на пробную площадь 1 м²). Растительный

покров ключевого участка представлен фоновыми для плакоров лесостепи луговыми степями. Фитоценозы представлены сообществами с доминированием рыхлодерновинных мезофитных злаков: райграсса (*Arrhenatherum elatius*), костра (*Bromopsis riparia*), местами – ежи (*Dactylis glomerata*) и вейника (*Calamagrostis epigeios*). Сопутствующими видами (иногда выступая в роли содоминантов) являются плотнодерновинные ксерофитные злаки: ковыль (*Stipa pennata*) и типчак (*Festuca valesiaca*) (Lozbenev et.al., 2019).

На описанном ключевом участке производилась параметризация модели перераспределения стока SIMWE (Lozbenev et.al., 2021). Подбор параметров модели производился методом Монте-Карло путем перебора входных параметров и выбора наиболее описывающих фактического разнообразия основного диагностического показателя функционирования ландшафта на локальном уровне – глубины вскипания вторичных карбонатов (рис. 3.2.7).

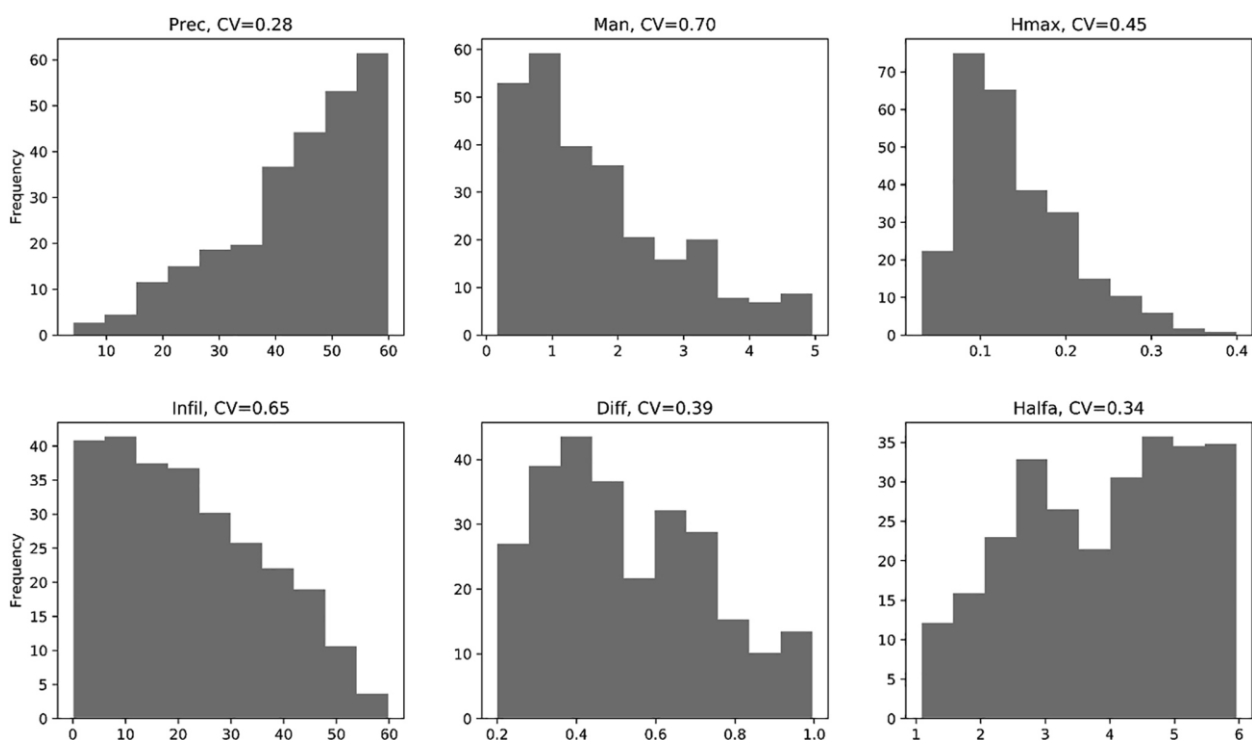


Рис. 3.2.7. Гистограммы апостериорных вероятностей модельных параметров

Составленная детальная карта перераспределенного слоя осадков представлена на рисунке 3.2.8. На ней заметна западная структура на водоразделах в южной и северной частях участка и ложбинная сеть сложного, скорее всего, криогенного генезиса.

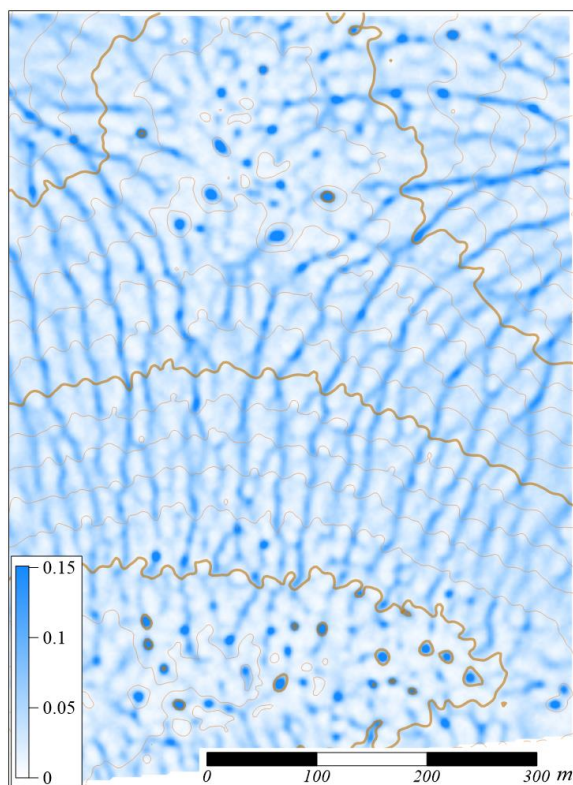


Рис. 3.2.8. Расчет перераспределенного стока по модели SIMWE, м для детального ключевого участка «Метеоплощадка»

В связи с тем, что на целинном ключевом участке не встречаются природные комплексы на пологих и покатых склонах с эродированными почвами было решено изучить пахотный ключевой участок в охранной зоне Центрально-Черноземного заповедника. Детальный ключевой участок «Фишман» (по имени аспиранта В.М. Фридланда, работавшего здесь в 1960-х годах) расположен на выпуклом междуречье с единичными западинами и склонах северной и южной экспозиции, расчлененных палеокриогенно-эрозионными ложбинами (Фишман, 1977). В 2016-2022 годах была проведена детальная съемка ключевого участка с БПЛА и построена цифровая модель рельефа разрешением 5 метров (рис. 3.2.9а). С учетом микрорельефа были расположены 90 точек полевых описаний почв (желтые пунсоны). Для участка были рассчитаны значения перераспределенного стока по модели SIMWE (рис. 3.2.9б) и темпы смыва почв по модели WaTEM/SEDEM (рис. 3.2.9в).

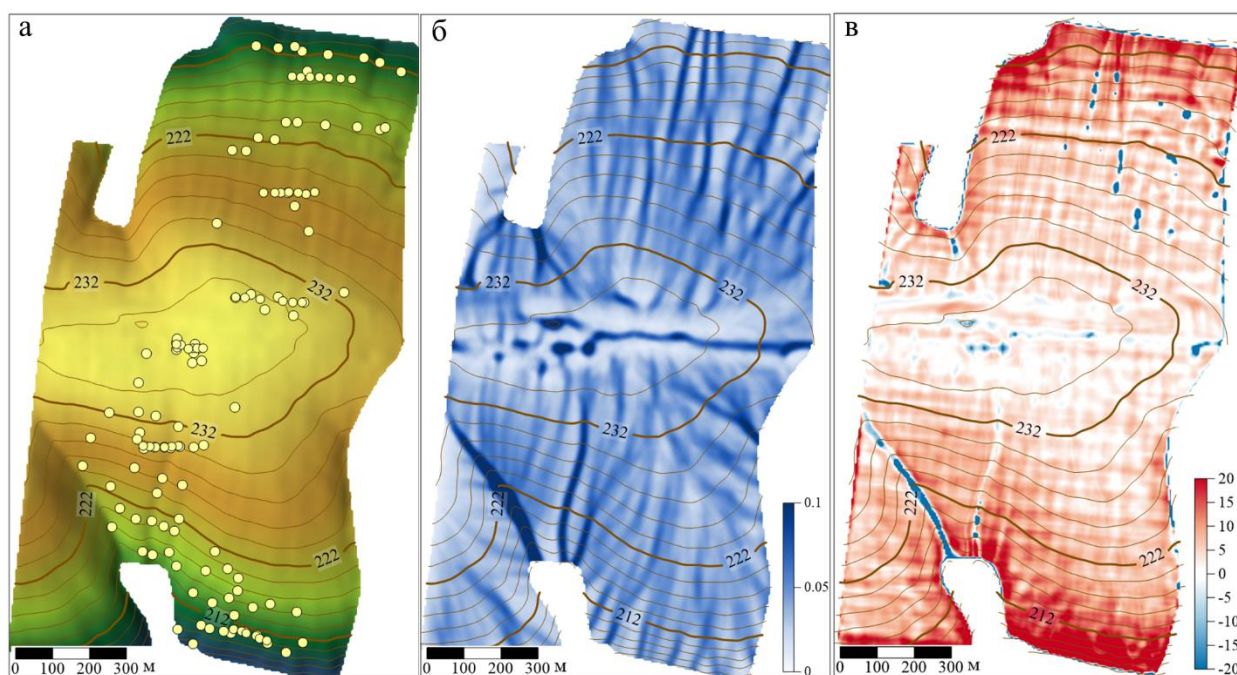


Рис. 3.2.9. Детальный пахотный ключевой участок «Фишман»: а – цифровая модель рельефа с разрешением 5м с положением точек описания почв, б – расчетный сток по модели SIMWE (м); в – расчетная интенсивность эрозии по модели Watem/Sedem (т/га*год)

3.3. Материалы и факторно-индикационная основа модели для Окско-Донской низменности

Изученный участок расположен в Петровском и Мичуринском районах Тамбовской области (рис. 3.3.1 А) и приурочен к междуречьям и долинам двух рек – Воронежа и Матыры (рис. 3.3.1 Б).

В условиях относительно однородных почвообразующих пород ведущим фактором дифференциации является рельеф, поэтому для составления моделей межкомпонентных связей на первом этапе была построена цифровая модель рельефа на основании крупномасштабных топографических карт колхозов или отдельных листов. Они были привязаны в программе «Global mapper» (<https://www.blumablegeo.com/global-mapper/>) по координатной сетке методом триангуляции, исключая искажения в каждой контрольной точке привязки. Последующая оцифровка и простановка высот производились в ПО «Easy trace» (<http://www.easytrace.com/>). Полученные в результате проведенных действий горизонтали были загружены в программу «Surfer» (<https://www.goldensoftware.com/products/surfer>), позволяющую создавать ЦМР на их основе. Плотность горизонталей позволяет составлять цифровые модели рельефа разрешением 20×20 м. Такой размер подходит для отображения морфологических единиц ландшафта уровня урочище. На основании цифровой модели рельефа (рис. 3.3.1.Б) были рассчитаны геоморфометрические величины рельефа, описывающие перераспределение

тепла и влаги: крутизна склонов, форма поверхности, площадь водосбора и другие (рис. 3.3.3. и другие). Эти величины были использованы для составления моделей межкомпонентных связей.

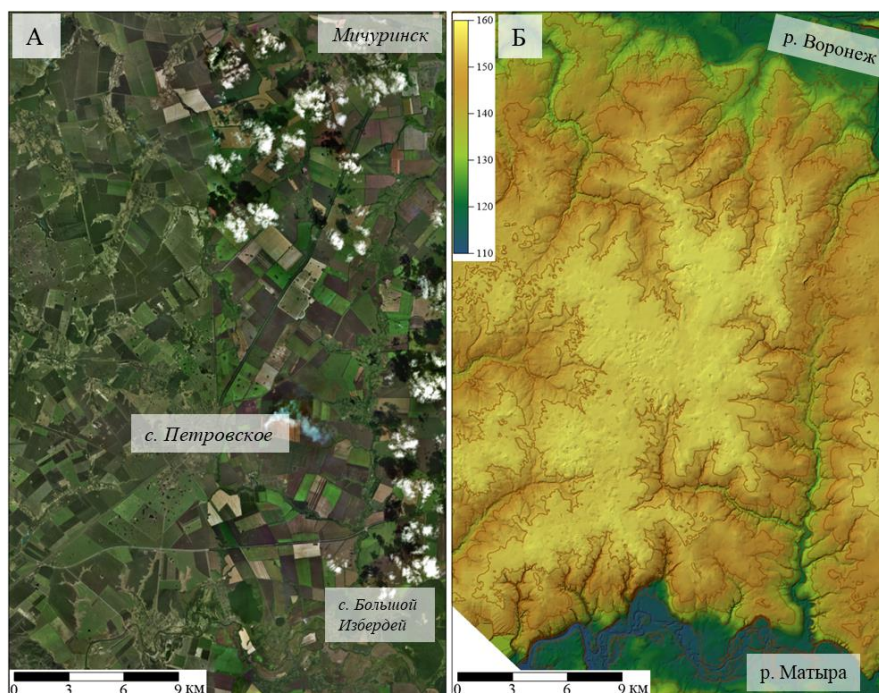


Рис. 3.3.1. Участок исследования на Окско-Донской низменности: А – обзорный снимок, Б – цифровая модель рельефа с разрешением 20м

Помимо морфометрических величин в работе использованы материалы по составу и строению толщи четвертичных отложений, взятые с листа среднемасштабной (1:200000) геологической карты (рис. 3.3.2.). В пределах участка отчетливо выделяются 3 контрастных типа отложений. Моренно-водноледниковые отложения днепровского возраста залегают сплошным плащом на междуречье рр. Матыра и Воронеж. Они представляют собой нерасчлененную толщу песков, супесей и суглинков с обильными включениями камней разного размера. В долине р. Матыры и ее притоков вскрывается морена днепровской стадии московского оледенения. Ближе к реке вскрываются более древние водноледниковые пески (реже суглинки и глины) времени наступания днепровского языка. Местами проявляются пески и суглинки 2 и 1 НПТ, которые переходят в отложения современных пойм. В бассейне р. Воронеж картина несколько другая: здесь хорошо выражены все НПТ, сложенные песками, супесями и суглинками, в то время как ледниковые отложения распространены на весьма ограниченной площади. Современная пойма р. Воронеж и ее притоков состоит из супесей, песков и суглинков. По данным Г.И. Раскатова (1969), было всего 3 эрозионно-аккумулятивных цикла, в результате которых сформировалось I, II и III НПТ, а то, что в настоящее время мы принимаем за междуречье,

представляет собой флювиогляциальную равнину. Повсеместно, за исключением поймы, I-III НПТ и коренных отложений, залегает толща лессовидных покровных суглинков.

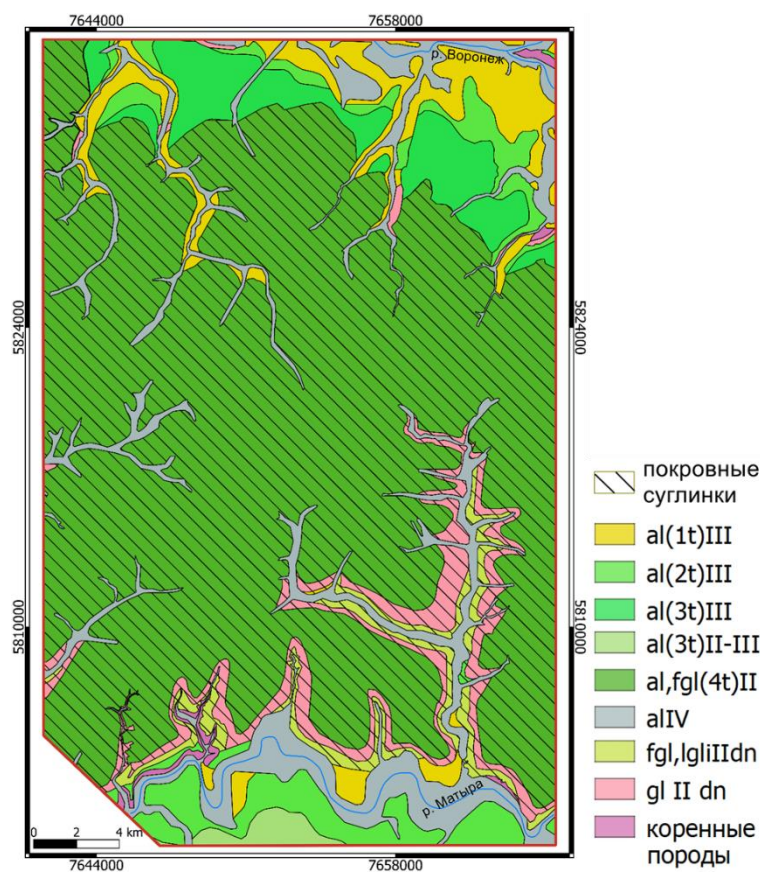


Рис. 3.3.2. Состав и возраст четвертичных отложений ключевого участка

Особенностью рельефа Окско-Донской низменности выступают широкие субгоризонтальные междуречья. Распространенность и крутизна склонов невелики (рис. 3.3.3.А) Изучению ландшафтной структуры и почвенного покрова Окско-Донской низменности посвящено большое количество работ Тамбовских, Воронежских, Московских и других исследователей, что описано в предыдущих главах. Наиболее полные данные о почвенном разнообразии региона получено в ходе последнего советского почвенного обследования колхозов и совхозов в 1985-1991 годах. В пределах изучаемого участка обследование было проведено географами Воронежского Государственного Университета. Результаты обследований обобщены в виде крупномасштабных почвенных карт масштаба 1:10000 с нанесенными на них положениями основных разрезов. Почвенные карты были привязаны по опорным точкам и с них сняты положения разрезов. В разрезах указаны полное название почвы, гранулометрический состав гумусового горизонта и почвообразующие породы. К некоторым описаниям в пояснительной записке даются физико-химические свойства почвы по генетическим горизонтам. Всего в пределах участка располагаются 256 таких описаний (оранжевые точки на рис. 3.3.3.Б). Помимо этого, в весенне-летний период 2019-2021 годов был проведен ряд собственных почвенно-

ландшафтный обследований для уточнения классификационной принадлежности и границ контуров почвенной карты. В разрезах и буровых определялись тип, подтип и род почвы, гранулометрический состав горизонтов и проявления оглеения. Кроме того, в некоторых разрезах определены гранулометрический состав по профилю до почвообразующей породы. Всего выполнено 39 полевых описаний (синие точки на рис. 3.3.3.Б).

Итоговая обучающая выборка составляет 295 описаний буровых и разрезов (табл. 3.3.1). Из них лугово-черноземные обычные (Чл2) – 101 описание, чернозёмы выщелоченные (Чв) – 27, Чернозёмы типичные (Чт) – 20, солонцы (Слн) – 2, чернозёмно-луговые – 34, чернозёмно-влажнoluговые – 9, луговые – 12, серые лесные поверхностно-глеево-элювиальные (Л2пгэ) – 10, лугово-болотные (Бл) – 18, болотные торфянистые (Бт) – 4, аллювиальные слоистые (Асл) – 7, аллювиальные дерновые (Ад) – 9, аллювиальные влажнoluговые (Авл) – 1, почвы ОБК – 41.

Таблица 3.3.1. Количество описаний по таксонам почв ключевого участка на Окско-Донской низменности

Чл2	Чв	Чт	Слн	Лч	Члвл	Л	Л2пгэ	Бл	Бт	Асл	Ад	Авл	ОБК	Всего
101	27	20	2	34	9	12	10	18	4	7	9	1	41	295

*Чл2 - лугово-черноземные обычные, Чв - чернозёмы выщелоченные, Чт - чернозёмы типичные, Слн - солонцы, Лч – черноземно-луговые, Члвл – черноземно-влажнoluговые, Л – луговые, Л2пгэ – серые лесные поверхностно-глеево-элювиальные, Бл – лугово-болотные, Бт – торфянисто-болотные, Асл – аллювиальные слоистые, Ад – аллювиальные дерновые, Авл – аллювиальные влажнoluговые, ОБК – почвы овражно-балочного комплекса.

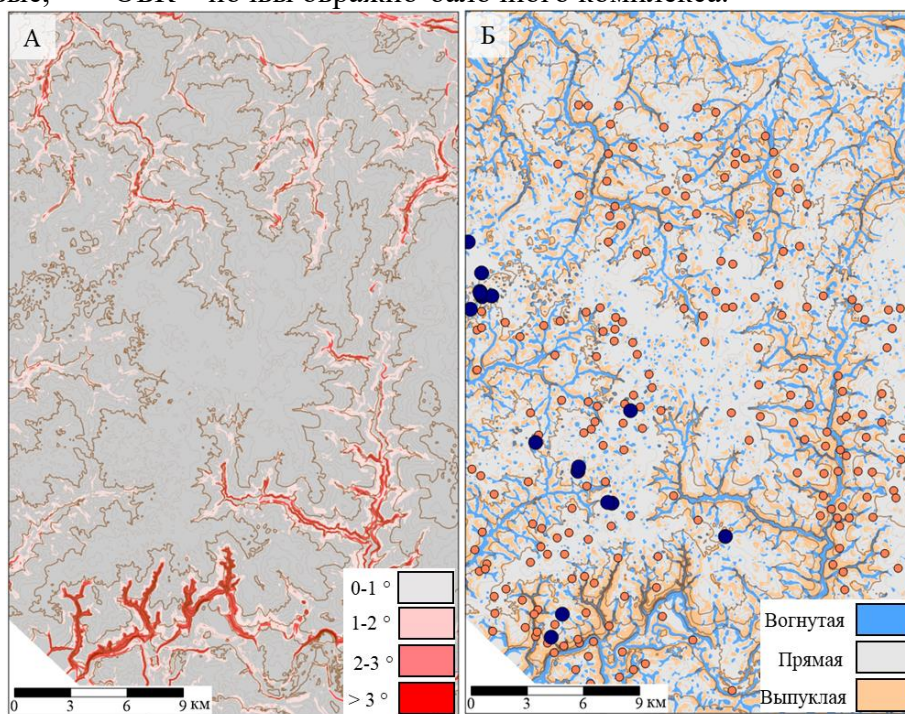


Рис. 3.3.3. Производные геоморфометрические характеристики: А) Крутизна склонов, Б) Форма поверхности с нанесенными разрезами с крупномасштабных карт (оранжевые точки) и собственных полевых описаний (синие точки)

Кроме морфометрических величин рельефа, были рассчитаны функциональные показатели: перераспределённый слой осадков по модели SIMWE и интенсивность смыва почв по модели WATEM/SEDEM.

Входные параметры для расчета эрозионной модели были следующие: почвозащитный фактор $C = 0.40$, фактор эродируемости почв $K = 35 \text{ кг} \cdot \text{ч} \cdot \text{МДж}^{-1} \cdot \text{мм}^{-1}$, эрозионный потенциал осадков $R = 230 \text{ МДж} \cdot \text{мм} \cdot \text{га}^{-2} \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$. Входные параметры были подобраны исходя из региональных условий при участии лаборатории эрозии почв Почвенного института. Карта темпов смыва представлена на рисунке 3.3.4 слева. Она отражает в целом достаточно низкие темпы смыва почв. Относительно высокие темпы характерны лишь для пологих склонов оврагов, приуроченных к долине реки Шехмань. Для остальной территории темпы невысокие, а в западинах и ложбинах широко распространена аккумуляция вещества.

Расчет перераспределённого слоя осадков произведен по модели SIMWE (рис. 3.3.4. справа). Входные параметры модели использованы близкие к описанным в статье (Lozbenev et.al., 2021). Для региональных условий были уменьшены коэффициент избыточного уровня осадков и коэффициент шероховатости.

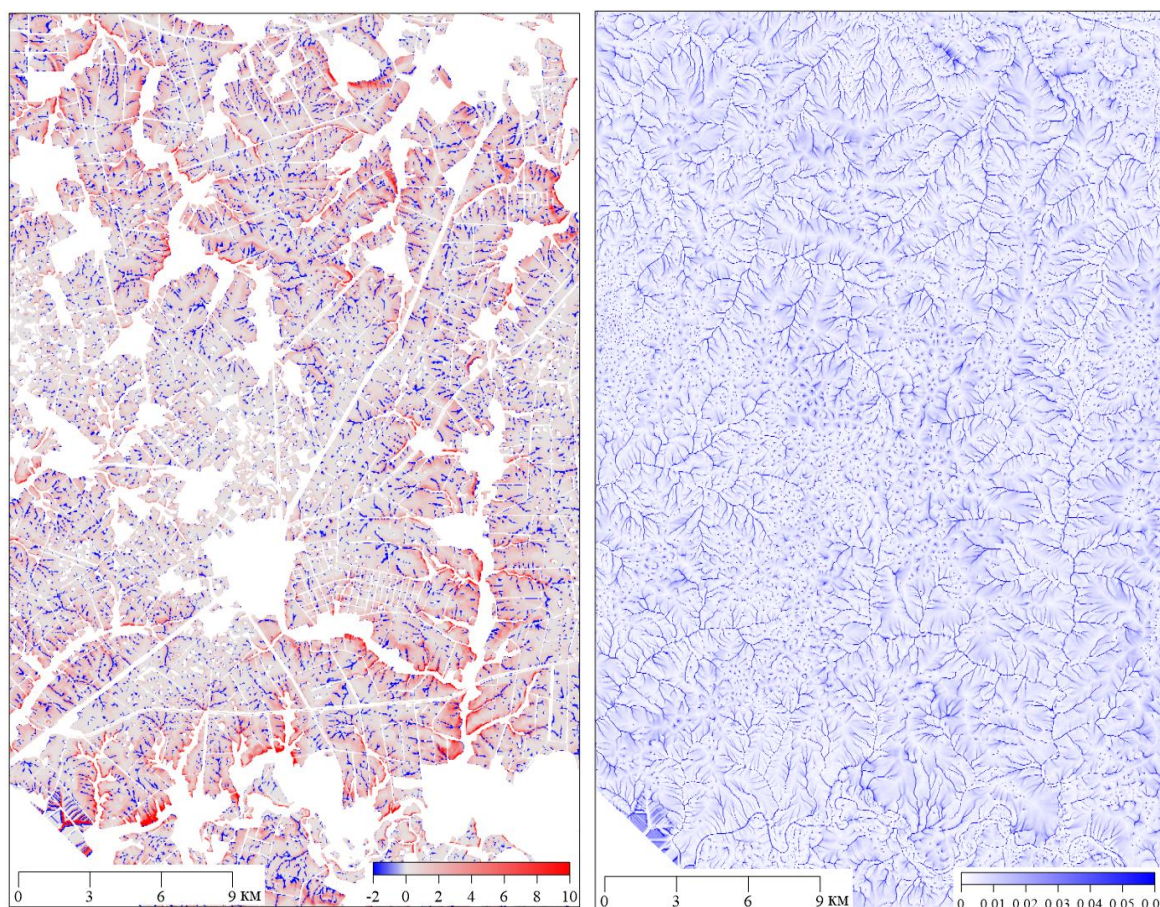


Рис. 3.3.4 Расчет темпов смыва почв по модели WATEM/SEDEM, т/га*год (слева) и перераспределенный слой осадков по модели SIMWE, м (справа)

Для *верификации* результатов цифрового картографирования был изучен ключевой участок «Ивановка» рядом с селами Ивановка и Новоситовка в Петровском районе Тамбовской области.

На ключе была проведена съемка с БПЛА с последующим построением ортофотоплана и цифровой модели местности разрешением 5 метров (рис. 3.3.5а). Участок занимает плоское междуречье с обильными, затапливаемыми весной западинами и хорошо врезанными ложбинами, дренирующими междуречье (рис. 3.3.5б). Как и для всей Окско-Донской низменности крутизна склонов не превышает 3° (рис. 3.3.5в). Расчет перераспределённого слоя осадков произведен по модели SIMWE (рис. 3.3.5г). Он показывает характерную для региона концентрацию стока в западинах на междуречье и множественные собирающие ложбины, дренирующие междуречья. В пределах ключевого участка описано 7 буровых колонок и разрезов (желтые пунсоны на рис. 3.3.5г), в которых определена морфология почв, глубина вскипания вторичных карбонатов, глубина подстилания облегченными породами, глубина грунтовых вод. В западинах описаны лугово-черноземные оподзоленные почвы, в ложбинах - лугово-черноземные выщелоченные, на склонах – луговато-черноземные слабосмытые. В долине малой реки Самовец описаны пойменные дерновые глеевые почвы.

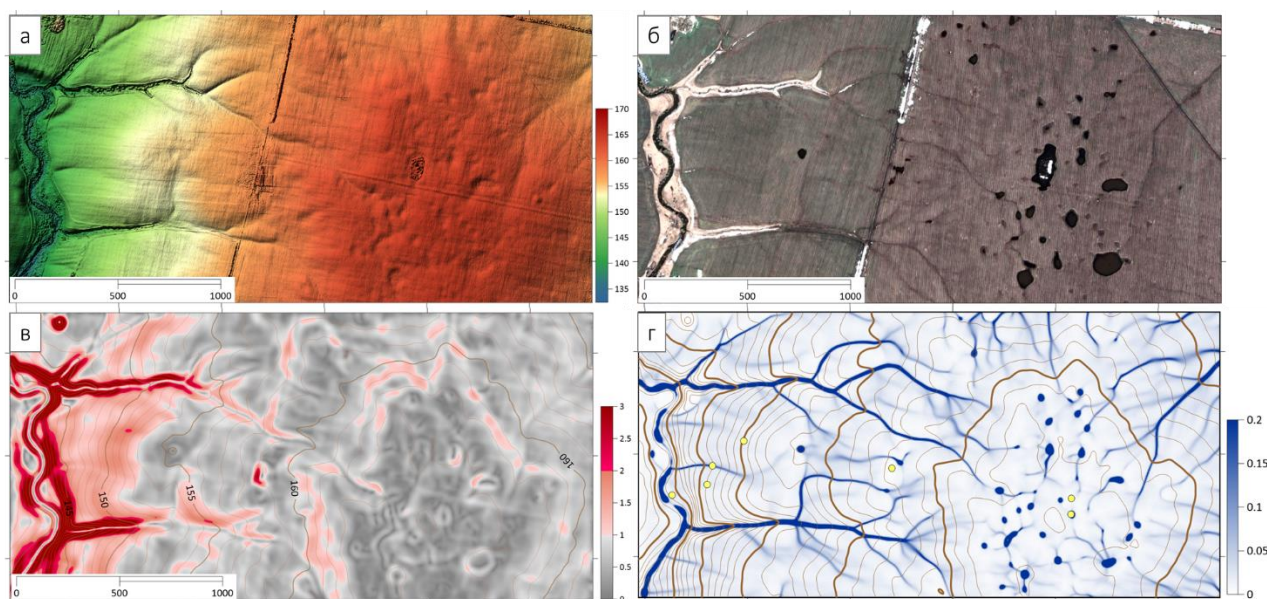


Рис. 3.3.5. Детальный ключевой участок «Ивановка»: а) детальная цифровая модель местности разрешением 5 метров; б) фрагмент весеннего космического снимка; в) крутизна склонов ключевого участка; г) положение точек обследования почв (желтые точки) на фоне расчетного перераспределенного слоя осадков по модели SIMWE (м)

3.4. Материалы и факторно-индикационная основа модели для Бугульминско-Белебеевской возвышенности

Ведущими факторами ландшафтной дифференциации в изучаемом регионе выступает мезо- и микрорельеф, а также неоднородность отложений. Для описания

особенностей рельефа в настоящей работе использованы детальные топографические карты с основным сечением горизонталей 2,5 м. На основе этих карт в программе QGIS были оцифрованы и сведены горизонтали (рис. 3.4.1.а), в программе SAGA GIS построена ЦМР с разрешением 20×20 м методом ординарного кригинга (рис. 3.4.1.б). Также в программе был проведен расчет более 20 морфометрических величин, отражающих процессы перераспределения тепла и влаги (Florinsky, 2015) (рис. 3.4.2.а). Стоит отметить, что с учетом детальности исходных топографических карт и размера пикселя ЦМР 20×20 м морфометрические величины характеризуют состояние земной поверхности с размерами не менее 60×60 м. Такой охват позволяет описать особенности мезо- и макрорельефа, что отвечает задаче отражения топографических условий формирования элементарных почвенных структур (Фридланд, 1972; Hole, Campbell, 1985).

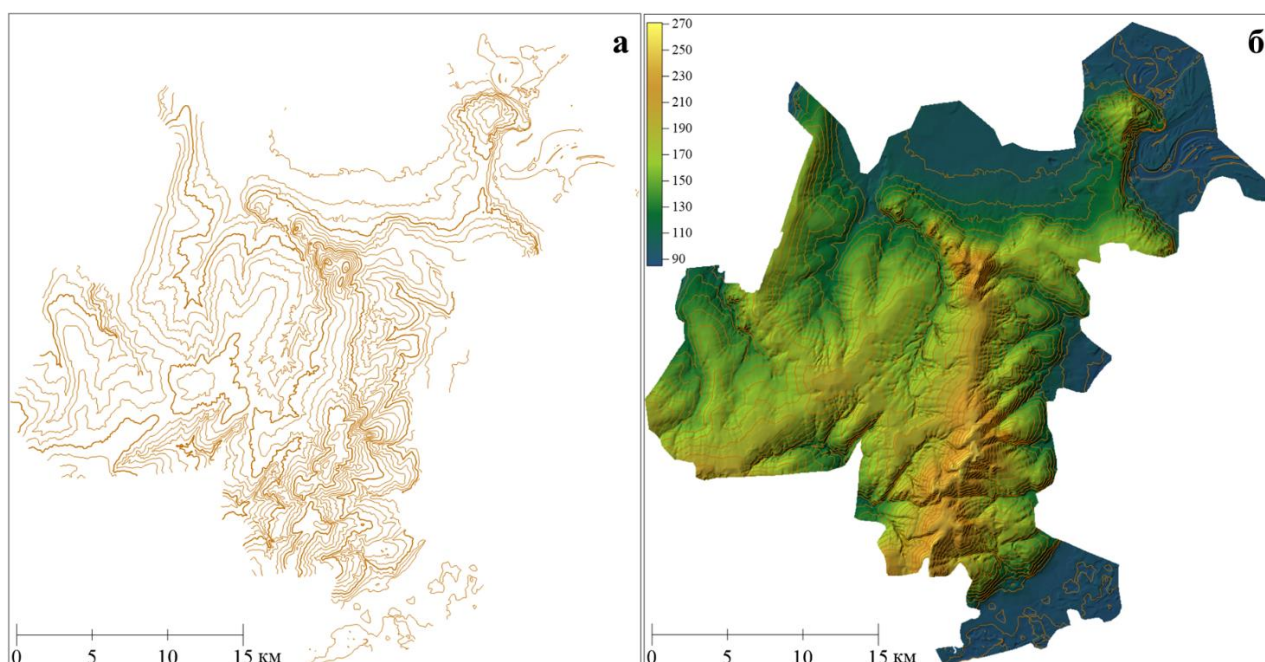


Рис. 3.4.1. Оцифрованные горизонтали (а) и цифровая модель рельефа разрешением 20м (б) ключевого участка в пределах Уфимского района

В 2019 гг. при участии автора проведено маршрутное почвенно-ландшафтное обследование ключевого участка. Кроме того, использованы материалы последнего тура почвенного обследования Уфимского района Республики Башкортостан. В целом, массив почвенного опробования включал 367 описаний (рис. 3.4.2а, табл. 3.4.1.) с точностью географической привязки до 10 метров, взятых с почвенных карт хозяйств (312 описаний) и в ходе собственного полевого обследования (55 описаний).

Таблица 3.4.1. Общее количество описаний почв в пределах ключевого участка

Почва	Л2 + Л3	Чоп	Чт	Чв	Чл1в	Чл2	Лч	Вл	Эр	Ал	Всего
Кол-во	67	15	117	37	34	12	7	12	64	7	367

* Л2 + Л3 – серая и темно-серая лесные, Чоп – чернозем оподзоленный, Чв – чернозем выщелоченный, Чт – чернозем типичный, Чл1в – луговато-черноземная выщелоченная, Чл2

– лугово-черноземная, Лч – черноземно-луговая, ВЛ – влажнолуговая, Эр – комплекс смытых почв, Ал – аллювальные.

На основании построенной цифровой модели рельефа рассчитаны производные функциональные характеристики: интенсивность эрозии почв по модели WATEM/SEDEM (рис. 3.4.2.б) и расчетный сток по модели SIMWE. (рис. 3.4.3).

Ареалы эродированных почв были выделены также цифровым методом на основе данных полевого обследования почв и математической эрозионной модели WATEM/SEDEM согласно методике, описанной ниже. На основе WATEM/SEDEM был проведен расчет темпов эрозионно-аккумулятивных процессов. Использованы следующие входные параметры: данные об эрозионном индексе дождевых осадков равны $240\text{--}265 \text{ МДж}\cdot\text{мм}\cdot\text{га}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ согласно (Panagos, Borrelli, Meusburger et al., 2017). Значения эродируемости черноземов (К-фактор) составили $35 \text{ кг}\times\text{ч}\times\text{МДж}^{-1}\text{мм}^{-1}$. Почвозащитная роль возделываемых культур за ротацию севооборота относительно эродируемости чистого пара задана значением 0,37 (Ларионов, 1993). В результате применения модели WATEM/SEDEM были получены темпы эрозии почв (рис. 3.4.2б) для каждой ячейки регулярной сетки.

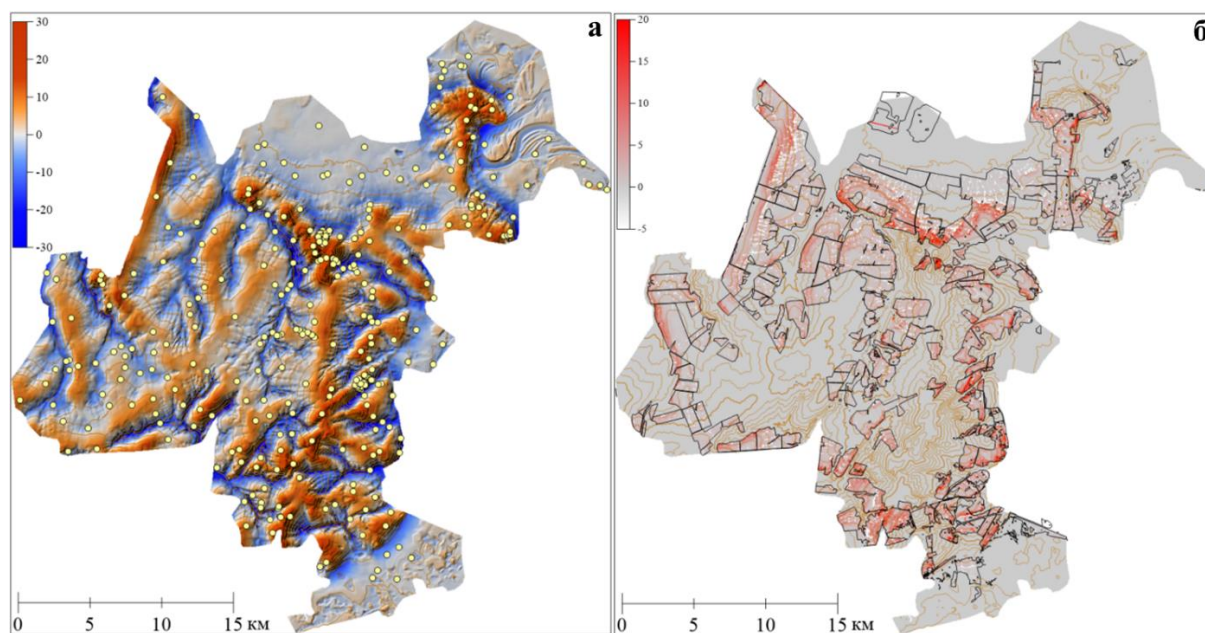


Рис. 3.4.2. Индекс относительных превышений рельефа в окрестности 1500м, м (Topographic Position Index 1500) с положением точек опробования (а) и расчетная интенсивность смыва почвы в пределах пашни на ключевом участке (б)

Помимо значительного числа морфометрических величин рельефа, был рассчитан перераспределенный слой осадков по модели SIMWE с регионализированными параметрами. Полученный результат представлен на рисунке 3.4.3. Расчет показывает более сильную, по сравнению с низменным участком, концентрацию стока в ложбинах и балках за счет расчленённого рельефа и очень сильный отток влаги с выпуклых элементов рельефа – коренных хребтов.

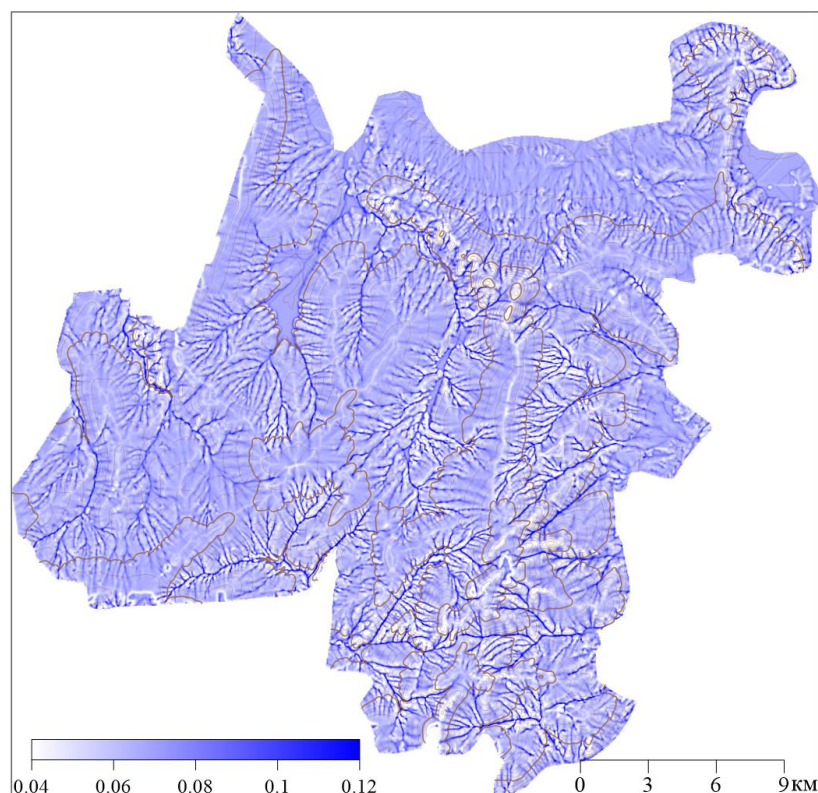


Рис. 3.4.3. Расчет перераспределённого слоя осадков по модели SIMWE, м

4. СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ЛЕСОСТЕПИ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ РАВНИНЫ

Структурно-функциональная организация лесостепи Восточно-Европейской равнины определяется разномасштабным перераспределением атмосферных осадков и твердофазного вещества почв в условиях ложбинно-западинного или ложбинно-балочного рельефа. Методологическая основа и конкретные приемы моделирования структурно-функциональной организации с её картографическим выражением рассмотрены в предыдущих главах. Теперь рассмотрим непосредственные результаты моделирования на ключевых участках.

4.1. Структурно-функциональная организация почвенного покрова Среднерусской возвышенности

В модель межкомпонентных связей было включено изначально избыточное количество морфометрических величин рельефа (более 20) и обе функциональные характеристики – темпы смыва почв и перераспределённый слой осадков. Методом последовательного отбора значимых переменных были определены наиболее значимые переменные (таблица 4.1.1) при p -value 0.05. Среди них - перераспределенный сток по модели SIMWE, который определяет положение черноземов выщелоченных и луговато-черноземных почв в ложбинах и междуречных западинах. Относительные превышения в окрестности 3750м определяют наиболее общие закономерности – положение почв

черноземного ряда на возвышенных участках и гидроморфные почвы в балках. Крутизна склонов совместно с расчетными темпами смыва локализуют почвы разной степени эродированности на склонах, а суммарная годовая радиация – различия северных и южных склонов. Для южных склонов характерно преобладание черноземов типичных карбонатных и эродированных почв.

Таблица 4.1.1. Предикторы и критерий Фишера модели для Среднерусской возвышенности

Показатель	Критерий Фишера	Физический смысл
Перераспределенный сток, м (расчет по модели SIMWE)	34	Определяет положение почв повышенного увлажнения по элементам ложбинной сети
Относительные превышения в окрестности 3750 м, м (TRI3750)	30	Определяет общее положение почв: более сухих на выпуклых элементах мезорельефа, более влажных – на вогнутых
Крутизна, ° (Slope)	27	Определяет положение эродированных почв на склонах
Относительные превышения в окрестности 400 м, м (TRI400)	10	Определяет положение почв повышенного увлажнения на выположенном западинном междуречье
Темпы смыва, т/га*год (расчет по модели WATEM/SEDEM)	9	Определяет положение и степень эродированности почв на склонах
Суммарная радиация, Вт/(м ² *год) (Insol)	7	Определяет различия по степени влажности и эродированности на склонах разных экспозиций

Результатом расчета дискриминантной модели является апостериорная вероятность встречи каждого предсказываемого класса почв, трактуемая как долевое участие почв в каждой ячейке раstra (рис. 4.1.1.). Общая точность предсказания 12 таксонов почв составляет 39% (табл. 4.1.2.). Перед моделированием некоторые точки были удалены из обучающей выборки, если их таксономическая принадлежность по какой-либо причине не соответствовала положению в рельефе и общему представлению о структуре почвенного покрова региона. Поэтому итоговое количество точек для моделирования составило 1093.

Таблица 4.1.2. Точность предсказания таксонов почв на ключевом участке Среднерусской возвышенности

Почва	Апр. Вер.	Инд. Точн.	Чл1	Чв	Чт	Чтк	Чткэ1	Чвэ1	Чл1н	Чтэ1	Чткэ2	Чтэ2	Лчн	Ал	Сумм
Чл1	0.08	7	6	23	46	2	0	1	5	2	1	0	1	1	88
Чв	0.25	33	1	89	138	7	6	5	3	22	0	2	0	0	273
Чт	0.28	68	0	58	206	11	8	4	1	13	1	2	0	0	304
Чтк	0.12	17	0	14	81	23	6	2	0	5	0	0	1	0	132
Чткэ1	0.04	29	0	9	4	3	13	1	1	10	4	0	0	0	45
Чвэ1	0.03	18	0	13	5	1	3	6	1	3	1	0	0	0	33
Чл1н	0.02	24	2	1	1	0	2	1	4	1	1	0	4	0	17
Чтэ1	0.11	26	0	34	43	2	7	0	1	32	1	3	0	0	123
Чткэ2	0.01	6	0	4	1	0	5	1	1	2	1	1	0	0	16
Чтэ2	0.01	29	0	2	1	0	3	0	0	4	0	4	0	0	14
Лчн	0.03	74	1	1	1	0	0	0	2	0	0	0	20	2	27
Ал	0.02	86	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	18	21
Всего	1	39	10	248	529	49	53	21	19	94	10	12	27	21	1093

Формулы расчета апостериорной вероятности (долевого участия) таксонов почв в пикселях по результатам составления региональной модели следующие:

Чл1: $0.430540508161333 + 0.00321641666607536 * \text{Simwe} + 0.000000166814259317672 * \text{TPI3750} - 0.0101166982883675 * \text{Slope} - 0.00020290599 * \text{TPI400} - 0.0199851916 * \text{W/S} + 0.114310535 * \text{Insol}$

Чв: $2.07161924 - 0.343850947 * \text{Simwe} + 0.00212855653 * \text{TPI3750} - 0.000602118119 * \text{Slope} - 0.00480926758 * \text{TPI400} + 0.000000491835929 * \text{W/S} - 0.00114331055 * \text{Insol}$

Чт: $-0.0146562253 - 0.816257641 * \text{Simwe} + 0.000821963053 * \text{TPI3750} - 0.0435583694 * \text{Slope} + 0.00443080512 * \text{TPI400} - 0.00000110258606 * \text{W/S} + 0.000283341202 * \text{Insol}$

Чтк: $-0.533329127 + 0.00257421016 * \text{Simwe} - 0.000000259064779 * \text{TPI3750} + 0.012214515 * \text{Slope} + 0.000382966163 * \text{TPI400} + 0.0112696144 * \text{W/S} + 0.0706329282 * \text{Insol}$

Чткэ1: $-0.962170 - 0.068758 * \text{Simwe} + 0.000097 * \text{TPI3750} + 0.016883 * \text{Slope} - 0.007097 * \text{TPI400} + 0.000001 * \text{W/S} + 0.000630 * \text{Insol}$

Чвэ1: $0.993762577 - 0.0732983722 * \text{Simwe} + 0.000623602687 * \text{TPI3750} + 0.021222153 * \text{Slope} - 0.00484917171 * \text{TPI400} + 0.000000221761597 * \text{W/S} - 0.000643687955 * \text{Insol}$

Чл1н: $-0.0768667406 + 0.273016482 * \text{Simwe} + 0.000216370628 * \text{TPI3750} + 0.00454021695 * \text{Slope} + 0.000882255104 * \text{TPI400} - 0.000000000820933379 * \text{W/S} + 0.0000352931564 * \text{Insol}$

Чтэ1: $0.0104189219 + 0.0118129109 * \text{Simwe} - 0.00471805158 * \text{TPI3750} + 0.0201832304 * \text{Slope} + 0.0218084724 * \text{TPI400} + 0.000000415215973 * \text{W/S} + 0.0000465425001 * \text{Insol}$

Чткэ2: $-0.399257154 - 0.111725776 * \text{Simwe} - 0.000317975315 * \text{TPI3750} + 0.00195255785 * \text{Slope} - 0.00538084041 * \text{TPI400} + 0.000000215279812 * \text{W/S} + 0.000274328174 * \text{Insol}$

Чтэ2: $-0.413163227 + 0.0366204875 * \text{Simwe} - 0.000557019925 * \text{TPI3750} + 0.00926722776 * \text{Slope} + 0.0037037828 * \text{TPI400} + 0.0000000707811497 * \text{W/S} + 0.000257862989 * \text{Insol}$

Лчн: $0.278252947 + 0.54310316 * \text{Simwe} + 0.00105082283 * \text{TPI3750} + 0.0115031298 * \text{Slope} - 0.00834861804 * \text{TPI400} - 0.000000339781839 * \text{W/S} - 0.000218358645 * \text{Insol}$

Ал: $-0.385151287 + 0.364394217 * \text{Simwe} - 0.00513613982 * \text{TPI3750} - 0.0326756205 * \text{Slope} - 0.00243826675 * \text{TPI400} - 0.000000405794465 * \text{W/S} + 0.000297752131 * \text{Insol}$

Примеры долевого участия некоторых таксонов приведены на рисунке 4.1.1. На них видно общее преобладание черноземов типичных (Чт). Их доля в ячейках растров, как правило, выше 30%. На южных склонах значительное участие имеют черноземы типичные карбонатные (Чтк), формирование которых, помимо прочего, связано с усиленным оттоком влаги. На более холодных северных склонах более 40% площади могут занимать черноземы выщелоченные (Чв). Луговато- и лугово-черноземные почвы (Лч) располагаются по элементам ложбинной и балочной сети, в западинах - на микроводоразделах и доминируют на выположенном междуречье в северной части участка.

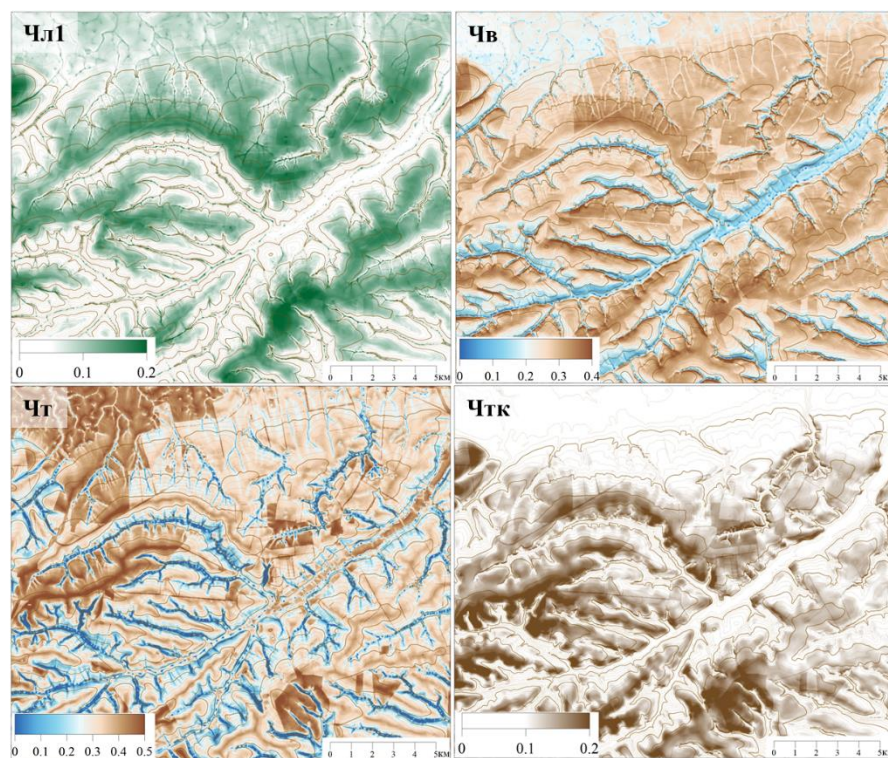


Рис. 4.1.1. Долевое участие лугово-черноземных почв (Чл1), черноземов типичных карбонатных (Чтк), черноземов типичных (Чт) и черноземов выщелоченных (Чв) в каждой ячейке раstra

Необходимо отметить, что области почв в пространстве предикторов (морфометрических и функциональных переменных) сильно пересекаются (рис. 4.1.3), из-за чего средняя определенность предсказания доминантной почвы (рис. 4.1.2. слева) всего 39%. Основная причина неопределенности межкомпонентных связей – комплексность почвенного покрова, обусловленная воздействием водно-миграционных и эрозионно-аккумулятивных процессов поверхностного стока под контролем рельефа. Наиболее однозначно определено положение Лч почв в днищах ложбин с выраженным натечным увлажнением ($TWI > 10$). Относительно однозначно определены доминантные почвы наиболее дренируемых частей мезорельефа – выпуклых склонов и междуречных равнин. И наоборот, почвенный покров плоских междуречий, вогнутых склонов и водосборных понижений отличается наибольшей комплексностью. Для них невозможно однозначно определить доминантную почву (рис. 4.1.2. справа). В их пределах встречаются в равной мере все 4 таксона в зависимости от микронеоднородности рельефа. Соответственно, основная причина неопределённости межкомпонентных связей – комплексность почвенного покрова.

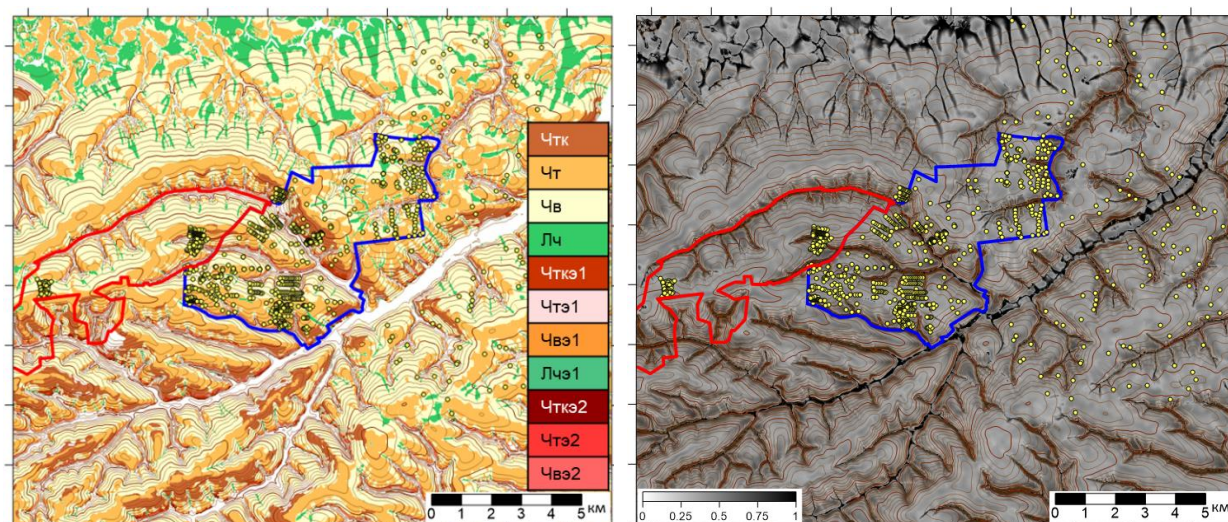


Рис. 4.1.2. Доминантный таксон почвы (слева) и определенность прогноза (справа)

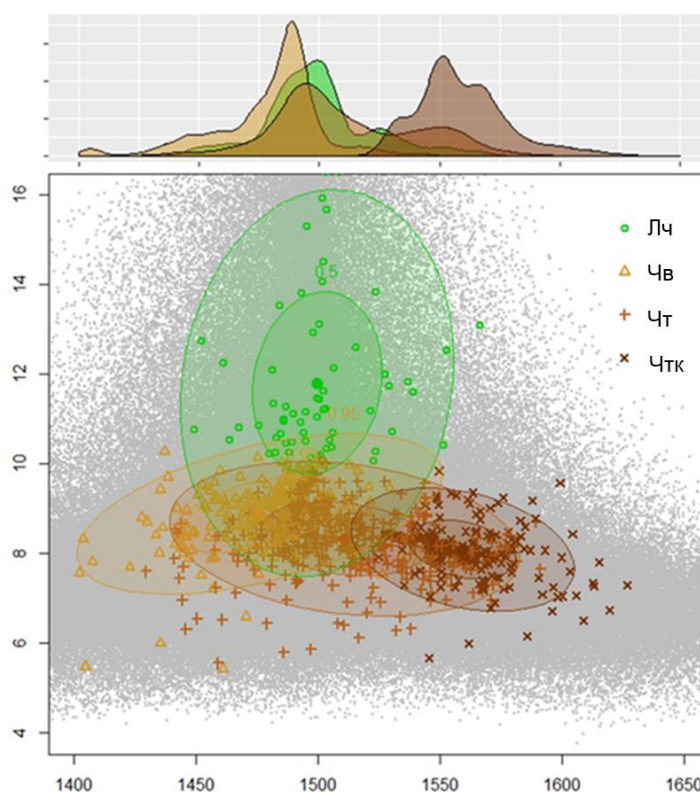


Рис. 4.1.3. Положение почв (ЧТк – чернозем типичный карбонатный, ЧТ – чернозем типичный, ЧВ – чернозем выщелоченный, ЛЧ – луговато-черноземная) в пространстве значимых факторов: топографического индекса влажности (по оси Y) и потенциальной суммарной годовой радиации (по оси X)

С точки зрения функциональной организации почвенного покрова, почвы выстраиваются в закономерный ряд возрастающих темпов эрозии (рис. 4.1.4a) и перераспределенного стока (рис. 4.1.4б). На них видно повышение расчетных темпов смыва у почв возрастающей степени смывости. Для зональных несмытых почв характерны средние значения от 0 до 10 т/га*год, для слабосмытых – около 40 т/га*год, а для среднесмытых – более 60 т/га*год. Можно отметить, что для луговато-черноземных почв и луговато-черноземных намытых почв ложбин характерны значительные темпы

аккумуляции (соответствует отрицательным значениям на графике). Для лугово-черноземных и черноземно-луговых почв днищ балок, а также аллювиальных почв определены нулевые значения темпов смыва в связи с тем, что они находятся за пределами выделенных сельскохозяйственных угодий.

Перераспределенный слой осадков показывает закономерное повышение увлажнения в ряду почв: чернозем эродированный – чернозем типичный карбонатный – чернозем типичный – чернозем выщелоченный – луговато-черноземная почва. Увеличение средних значений в этом ряду относительно невелико – в районе 3-5 мм, однако в условиях общего недостаточного увлажнения это изменяет морфологию почвенного профиля в сторону проявления незначительных признаков переувлажнения. Логичным продолжением ряда увеличивающего увлажнения являются полугидроморфные и гидроморфные аналоги черноземов. Для луговато-черноземных намывных почв характерно трёхкратное увеличение притока влаги относительно плакорных почв. Они приурочены к верхним частям слабоврезанных ложбин. Лугово-черноземные намывные почвы занимают нижние выположенные части ложбин и балок и конуса выноса со средним дополнительным притоком влаги в 4-5 раз больше плакорных почв. Схожие высокие значения характерны и для почв крупных балок долинного типа, отнесённых к аллювиальным. Они немного превосходят намывные почвы ложбин по притоку влаги и более, чем в 5 раз – плакорные черноземные почвы.

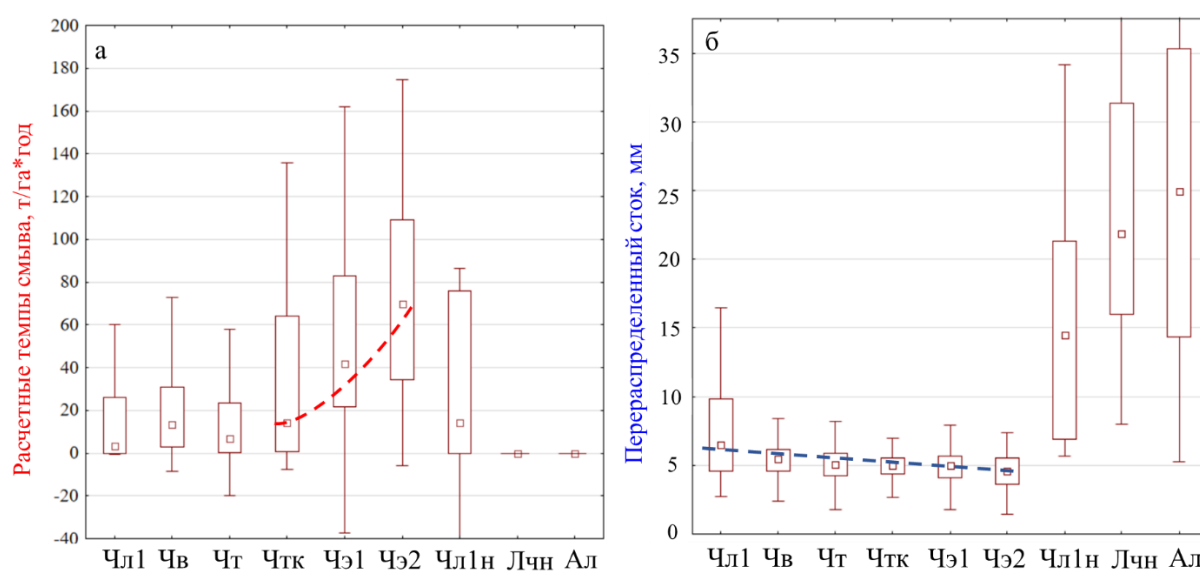


Рис. 4.1.4. Функциональные показатели почв Среднерусской возвышенности: а – темпы смыва почв по модели WATEM/SEDEM, б – перераспределенный слой осадков по модели SIMWE. Индексы почв: Чл1 – луговато-черноземная, Чв – чернозем выщелоченный, Чт – чернозем типичный, Чтк – чернозем типичный карбонатный, Чэ1 – черноземы слабосмытые, Чэ2 – черноземы среднесмытые, Чл1н – луговато черноземные намывные, Лчн – лугово-черноземные намывные (стратоземы), Ал – аллювиальные

Интерпретируя расчетные апостериорные вероятности как долевое участие почв в пикселе, была проведена типизация почвенных комбинаций в соответствии с принятыми градациями (По: Общесоюзная классификация, 1976) (табл. 4.1.3). Всего получено 16 комбинаций, обозначаемых в порядке убывания долевого участия компонентов.

Рассчитанные долевые участия почв были сгруппированы в почвенные комбинации (рис. 4.1.5). Для почвенных комбинаций субгоризонтальных междуречий характерно преобладание черноземов типичных и выщелоченных при заметном участии луговато-черноземных почв – ЧтЧвЧл1 или ЧвЧтЧл1. Луговато-черноземные почвы на междуречьях занимают позиции с ощутимым притоком влаги. Это могут быть верховья микроложбин и суффозионно-термокарстовые западины на микроводоразделах.

Для крупных ложбин с дополнительным натечным увлажнением характерны комбинации с доминированием луговато-черноземных почв (Чл1ЧвЧт и Чл1ЧтЧв). Балки и крупные водосборы в северной части региона заняты комбинациями с абсолютным преобладанием Лч и Чл1.

Элементарные почвенные структуры с участием слабосмытых почв (индекс «э1» в табл. 4.1.3) имеют вид ЧтЧвЧтэ1Чвэ1 на прибалочных склонах южной экспозиции, ЧвЧтЧвэ1Чтэ1 при той же крутизне склонов, но северной экспозиции. Водосборы и верховья балок занимают комплексы ЧвЛчЧвэ1Чл1э1 с заметным (более 15%) долевым участием лугово-черноземных почв. Большую площадь на южных склонах, чем на северных, занимает ЭПС с долевым участием смытых почв более 50%, образующихся в связи с повышенной интенсивностью водной эрозии при таянии снега. Нижние части пологих и покатых прибалочных склонов, преимущественно южной экспозиции, занимают почвенные комбинации с преобладающим участием среднесмытых почв. В целом эрозионные микроструктуры занимают более 40% изучаемой территории.

Таблица 4.1.3. Критерии выделения элементарных почвенных структур пашни

ПК	Площадь		Критерии выделения ПК по доле участия компонентов, %						
	га	%	Ч _Т +Ч _В	Дополнительные условия	Сумма НЭ	Ч _{Л1}	Ч _В	Ч _Т	Ч _{ТК}
Ч _{ТК} Ч _Т Ч _В	103	0.3		Ч _Т >Ч _В	>90				≥40
Ч _Т Ч _В Ч _{ТК}	4548	7.3	40-65	Ч _Т ≥Ч _В и Ч _{ТК} ≥Ч _{Л1}	>90				
Ч _В Ч _Т Ч _{ТК}	2195	5.5	40-65	Ч _Т <Ч _В и Ч _{ТК} >Ч _{Л1}	>90				
Ч _В Ч _Т Ч _{Л1} Ч _{ТК}	238	0.6	<40		>90	<40			<40
Ч _Т Ч _В	1775	4.5	≥65	Ч _Т ≥Ч _В	>90				
Ч _В Ч _Т	330	0.8	≥65	Ч _Т <Ч _В	>90				
Ч _Т Ч _В Ч _{Л1}	579	1.5	40-65	Ч _Т ≥Ч _В и Ч _{Л1} >Ч _{ТК}	>90				
Ч _В Ч _Т Ч _{Л1}	4177	10.6	40-65	Ч _Т <Ч _В и Ч _{Л1} ≥Ч _{ТК}	>90				
Ч _{Л1} Ч _Т Ч _В	158	0.3		Ч _Т >Ч _В	>90	40-65			
Ч _{Л1} Ч _В Ч _Т	832	2.1		Ч _Т ≤Ч _В	>90	40-65			
ЛчЧ _{Л1}	1143	2.8			>90	≥65			
Ч _Т Ч _В Ч _{ТЭ1} Ч _{ВЭ1}	4991	12.5		Ч _Т >Ч _В , Ч _{Л1} ≤15	50-90				
Ч _В Ч _Т Ч _{ВЭ1} Ч _{ТЭ1}	1076 3	21.9		Ч _В >Ч _Т , Ч _{Л1} ≤15	50-90				
Ч _В Ч _{Л1} Ч _{ВЭ1} Ч _{Л1Э1}	1335	3.4		Ч _{Л1} >15	50-90				
(Ч _В Ч _Т Ч _{Л1} Ч _{ТК})Э1	5487	10.9		Э1>Э2	<50				
(Ч _В Ч _Т Ч _{Л1} Ч _{ТК})Э2	1024	2.6		Э1<Э2	<50				
Ал	5062	12.4		Ал>90					

Составленная на основе предложенных критериев карта структур почвенного покрова представлена на рисунке 4.1.5.

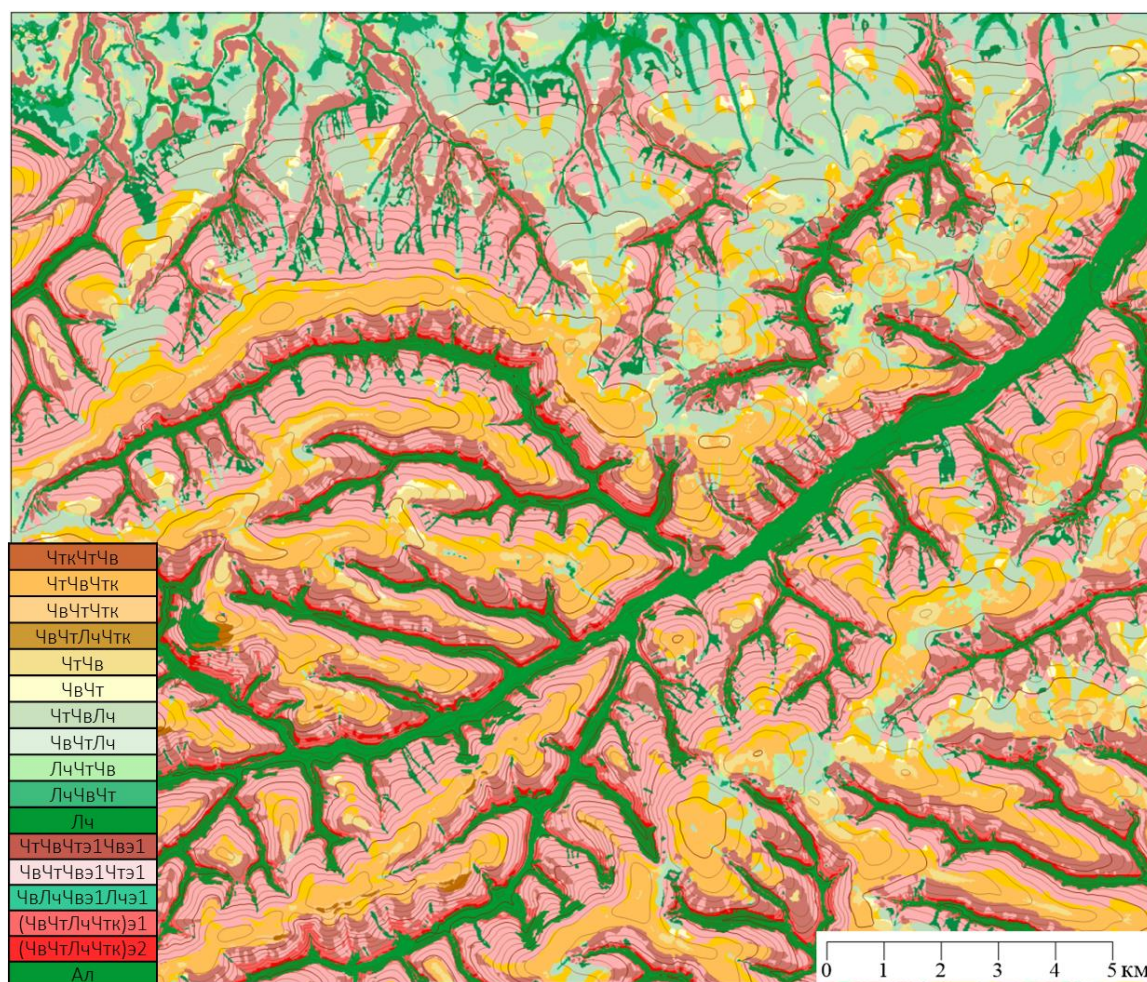


Рис. 4.1.5. Карта структур почвенного покрова ключевого участка на Среднерусской возвышенности. Критерии выделения контуров приведены в табл. 4.1.3

С прикладных позиций составленная карта структур почвенного покрова применима для проведения агроэкологической оценки и проектирования агроландшафтов в рамках концепции комплексной оценки земель (Кирюшин, 2020). На ней в крупном масштабе отражаются ареалы плакорных земель с подробным описанием компонентного состава почв, а также земли с потенциальными ограничениями (проявлением эрозии) и возможностями интенсификации - дополнительным натеchnым увлажнением на междуречьях и в водосборных понижениях. Это даёт возможность корректно произвести не только подбор культур в севооборот, но и способы обработки почвы в интенсивных системах земледелия. Представленные выше модель и карта представляют собой картографическую реализацию концепции фактор-процесс-свойство, сопоставляющую факторы и процессы ландшафтной дифференциации с пространственным варьированием компонентов ландшафта.

Анализ пространственной структуры почвенных комбинаций показывает, что в северной части участка со слаборасчлененным рельефом заметно преобладание плакорных и слабо-эрозионных комбинаций при практически полном отсутствии слабо- и средне-

эрозионных ПК. Почвенный покров представлен комплексами черноземов на дренируемых участках и луговато-черноземных почв на менее дренируемых элементах рельефа.

В условиях более расчлененного рельефа центральной и южной частей заметна большая роль слабо- и среднеэрозионных ПК при уменьшении участия плакорных ПК. Междуречные представляют собой достаточно контрастные комплексы с фоновыми пятнистостями черноземных почв и луговато-черноземных почв западин. Визуально хорошо заметна различная ширина приводораздельных склонов с несмытыми почвами и верхние части склонов со смывом только в пределах эрозионной сети. Слабо- и средне-эрозионные ПК имеют площадное распространение только в нижних частях склонов. Склоновые ПК обычно представляют собой сильно контрастные сочетания почв, сменяющие друг друга от верхних частей склонов к нижним, а также комплексы смытых или смыто-намытых почв разных типов на одном высотном уровне рельефа.

Затем по принципу функциональной и генетической однородности элементарные почвенные структуры были объединены в типы местности (рис. 4.1.6). ЭПС с преобладанием черноземов или с единичными включениями луговато-черноземных почв, приуроченные к основным пологонаклонным элементам междуречья и верхним частям придолинных склонов, были отнесены к плакорному типу местности (рис. 4.1.6, цифра 1). Он занимает около 32% территории.

Почвенные комбинации с преобладанием почв разной степени эродированности, приуроченные к склонам междуречий разных экспозиций, сгруппированы в склоновый тип местности (рис. 4.1.6, цифра 2), который занимает до 38% территории. Необходимо отметить, что для склонов Среднерусской возвышенности характерны локальные выходы карбонатных пород, которые в классических трудах относятся к литогенному типу местности. В данном случае такие ареалы приурочены к ЭПС с преобладанием эродированных вариантов черноземов и черноземов типичных карбонатных, но однозначно отделить их от склонового типа местности не представляется возможным.

Относительно выположенные междуречья с участием западин до 10% площади и выположенный склон северной экспозиции в сторону долины реки Сейм с преобладанием полугидроморфных аналогов черноземов – луговато-черноземных почв были отнесены к междуречному замедленно-дренированному типу местности (рис. 4.1.6, цифра 3), занимающему около 18% территории.

Крупные балки и долина реки с преобладанием лугово-черноземных и аллювиальных почв отнесены к пойменному типу местности (рис. 4.1.6, цифра 4), занимающему 12% территории.

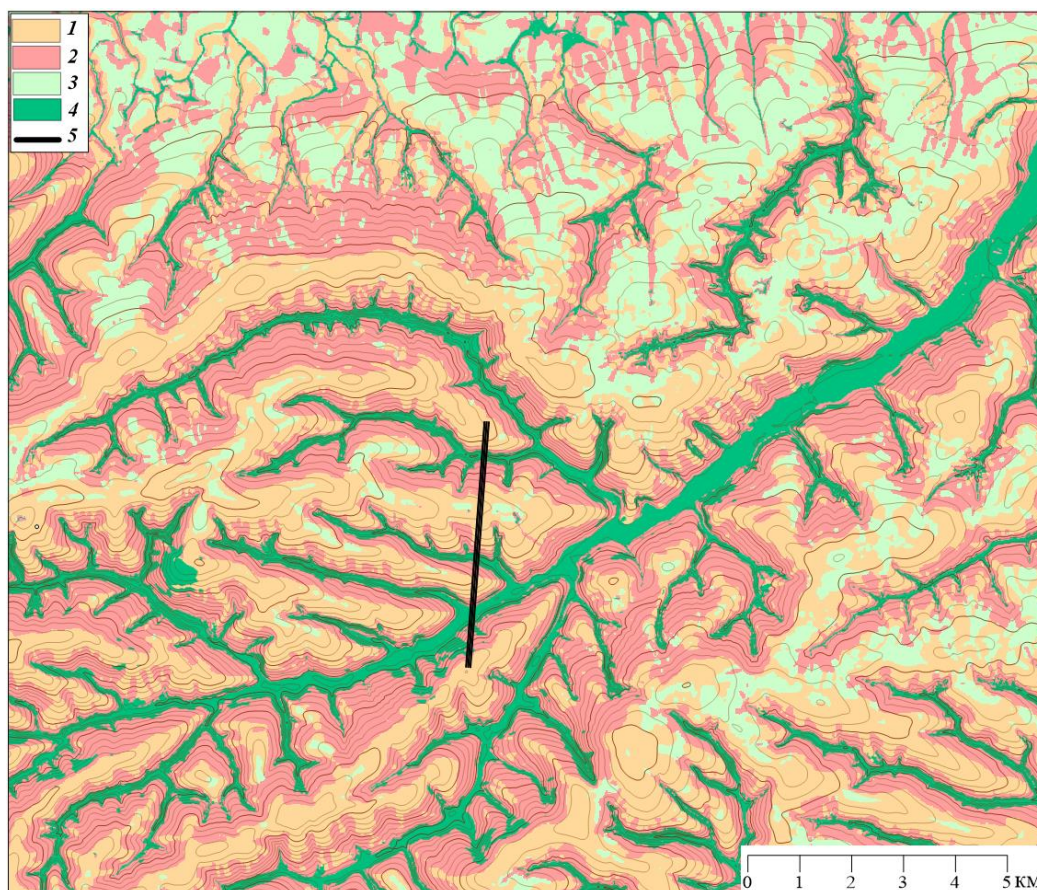


Рис. 4.1.6. Типы местности ключевого участка на Среднерусской возвышенности.

Цифрами на карте обозначены: 1 – плакорный, 2 – склоновый, 3 – междуречный замедленно-дренируемый, 4 – пойменный. 5 – линия типичного профиля, представленного на рис. 4.1.7

Для получения представления о типичной ландшафтной структуре ключевого участка был построен профиль, отражающий некоторые значимые особенности территории с точки зрения структурно-функциональной организации ландшафта. (рис. 4.1.7). Самые высокие и одновременно широкие и слегка выположенные территории занимает междуречный замедленно-дренируемый тип местности практически без протекания эрозионных процессов (средние темпы $0,2 \text{ т/га*год}$) и с небольшим дополнительным притоком влаги относительно прилегающего к нему плакорного типа местности (24 против 17-19 мм, соответственно). Для плакорного типа местности из-за расположения, в том числе в верхних частях придолинных склонов, характерны небольшие интенсивности смыва порядка 10 т/га*год , связанные с антропогенным воздействием - механической эрозией - и наличием слабопроявляющейся эрозионной сети. Средние и нижние части придолинных склонов, зачастую довольно длинные, занимает склоновый тип местности с очень высокими средними темпами смыва – до 100 т/га*год с преобладанием эродированных почв. Днища крупных балок и долина малой реки занимает пойменный тип местности со значениями перераспределенного стока до 5 раз выше средних значений плакорного типа

местности и совершенно ничтожными темпами смыва в связи с преобладанием аккумулятивных процессов.

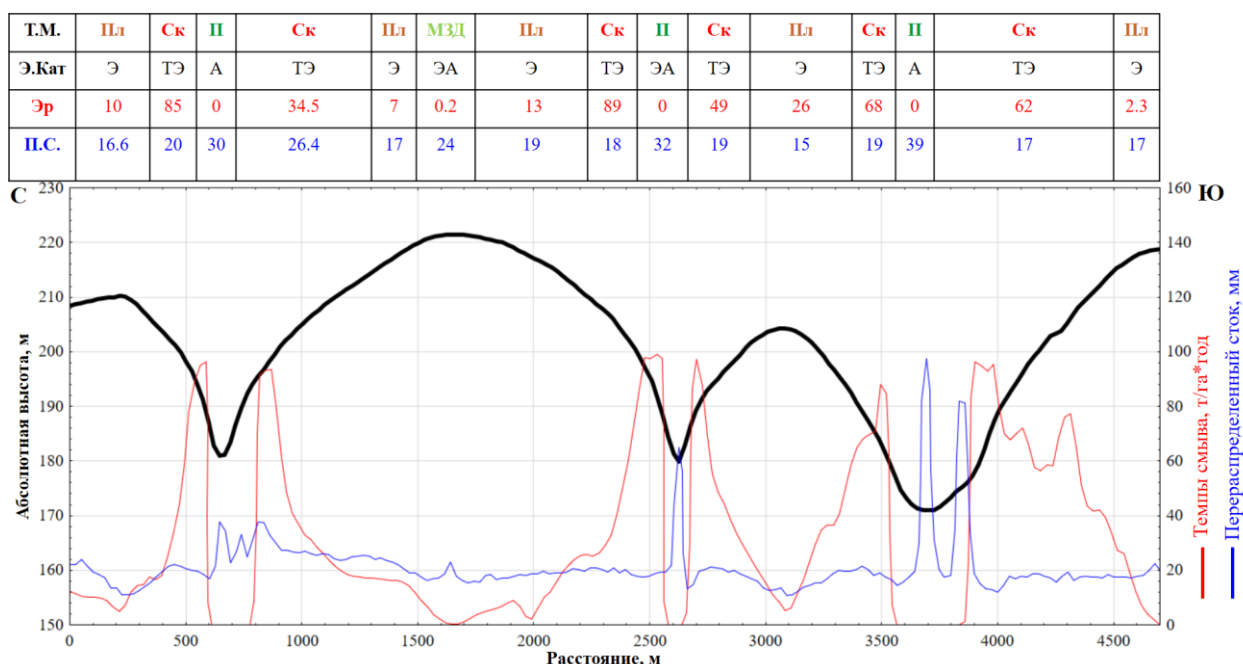


Рис. 4.1.7. Типичный профиль, пересекающий доминантные типы местности Среднерусской возвышенности с параметрами их функционирования. Над рисунком обозначены: Т.М. – типы местности, Э.Кат – элементы катены, Эр – темпы смыва, т/га*год, П.С. – перераспределенный сток, мм. Типы местности обозначены индексами: Пл- плакорный, МЗД – междуречный замедленно дренируемый, Ск – склоновый, П - пойменный

Из всего вышеописанного видно, что существуют некоторые средние значения и дисперсия интенсивностей смыва и объема перераспределенного стока, при которых формируются характерные для региона типы местности (рис. 4.1.8). Плакорный тип формируется при незначительных величинах темпов смыва почв (менее 10 т/га*год) и средних значениях перераспределенного стока (17,5 мм) за счет положения в слабонаклонных позициях рельефа без явного преобладания аккумуляции или оттока влаги. Междуречный замедленно дренируемый тип местности характеризуется повышенными значениями перераспределенного стока за счет положения на выположенных междуречьях с аккумулирующими влагу западинами. Значения темпов смыва колеблются около 0. Для склонового типа местности характерна очень высокая вариабельность темпов смыва при средних значениях около 30 т/га*год, что более чем в 3 раза превосходит средние значения плакорного типа местности. При этом встречаются как экстремальные значения темпов смыва, так и значительные по объемам зоны аккумуляции, приуроченные к урочищам ложбин в пределах склонового типа местности. Значения перераспределенного стока при этом находятся на уровне плакорного типа (19 мм), поскольку в нем сочетаются как выпуклые склоны, так и собирающие влагу ложбины.

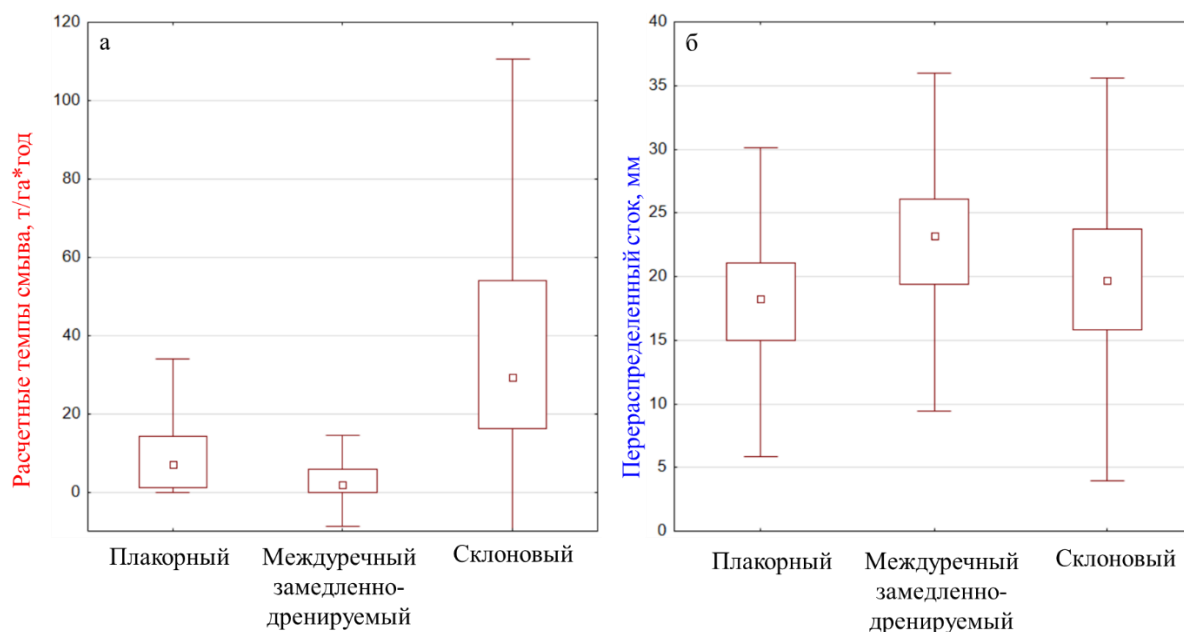


Рис. 4.1.8. Средние значения и дисперсия значений расчетных темпов смыва (а) и перераспределенного слоя осадков (б) для типов местностей ключевого участка на Среднерусской возвышенности

Таким образом, морфологическая структура ландшафтов Среднерусской возвышенности формируется в условиях сочетания эрозионных и водно-миграционных процессов. Эрозионные процессы определяют доминирование склонового типа местности, а водно-миграционные – формирование специфичного локального проявления гидроморфизма на междуречьях и в элементах ложбинной сети.

Работоспособность модели концепции «фактор-процесс-свойство» была проиллюстрирована на локальном примере участка «метеоплощадка». Диагностический показатель глубины вскипания вторичных карбонатов показал четкую линейную связь с перераспределенным стоком (рис. 4.1.9). Наиболее глубокое положение карбонатов характерно для западин и ложбинной сети, наиболее близкое – на основной поверхности микроводоразделов и сурчинах.

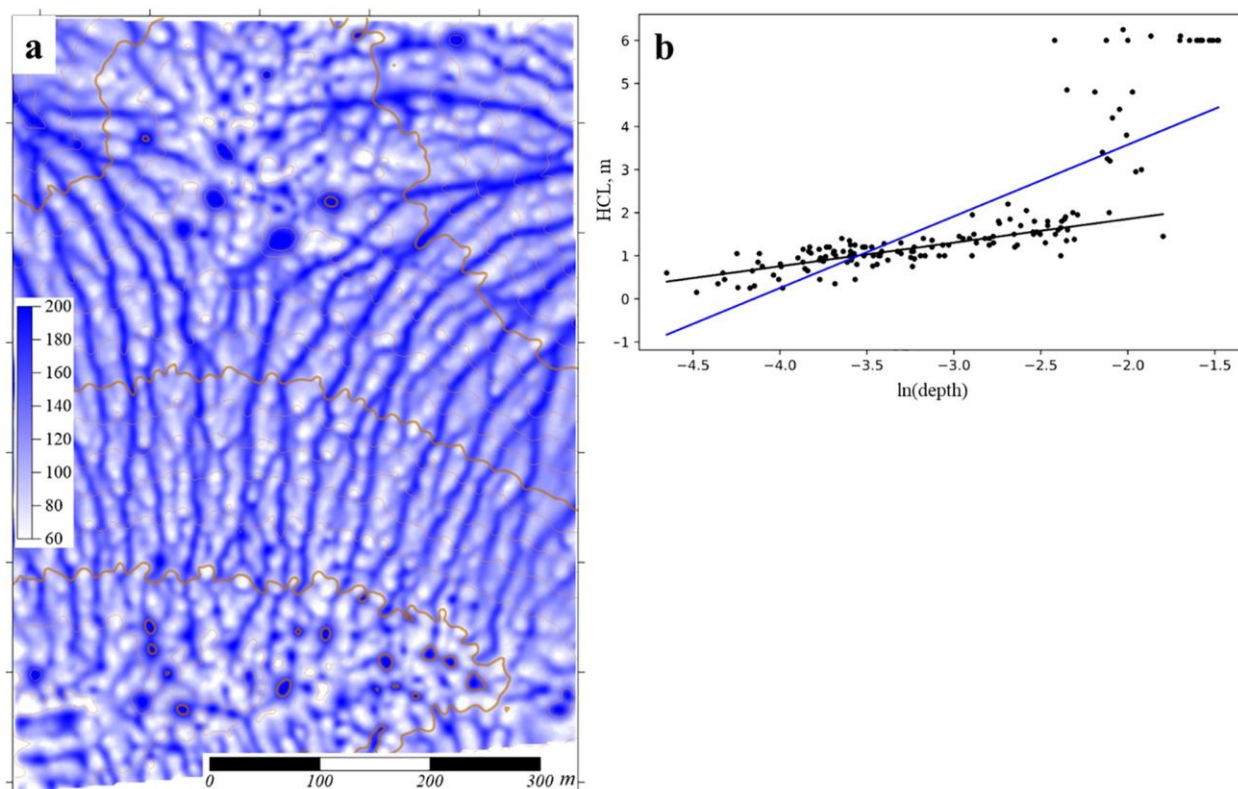


Рис. 4.1.9. Глубина вторичных карбонатов (а) и регрессионная функция модели (b) на ключевом участке «Метеоплощадка»

Формирование почвенного покрова также показало четкую связь с показателем перераспределенного стока. По мере увеличения абсолютных значений повышается степень гидроморфизма почв. Полученная почвенная карта и граничные значения расчетного стока для таксонов почв показаны на рисунке 4.1.10. Общие закономерности организации структуры почвенного покрова детального участка и региональной модели практически полностью совпадают.

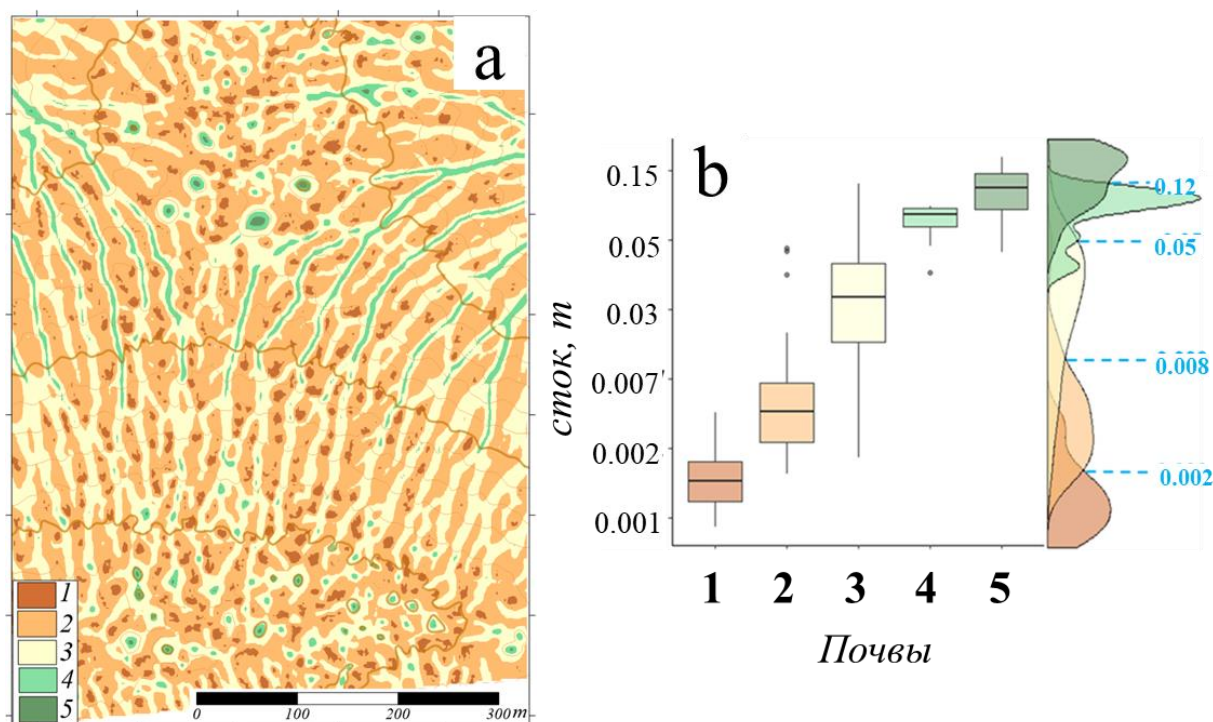


Рис. 4.1.10. Почвенная карта ключевого участка (а) и граничные значения перераспределенного стока (м) для разных таксонов почв (б). Цифрами обозначены почвы: 1 – чернозем типичный карбонатный, 2 – чернозем типичный, 3 – чернозем выщелоченный, 4 – луговато-черноземная обычная, 5 – луговато-черноземная выщелоченная

Сопоставляя, можно указать следующие граничные значения перераспределенного слоя осадков, соответствующие смене режимов функционирования биогеохимического круговорота в ряду возрастающего натечного увлажнения: (1) выпуклые склоны и выровненные участки водоразделов с зональной нормой атмосферного увлажнения автоморфных позиций микрорельефа и небольшие понижения с дополнительным увлажнением менее 55 мм; (2) понижения с дополнительным атмосферно-натечным увлажнением менее 80 мм относительно зональной нормы; (3-5) понижения и днища ложбин, а также замкнутые понижения с дополнительным атмосферно-натечным увлажнением более 80 мм.

Полученные результаты свидетельствуют о существовании достаточно устойчивой связи в системе рельеф-почва. Рельеф как фактор дифференциации водных потоков определяет перераспределение влаги в подчиненные элементы рельефа, промывной водный режим и увеличение в луговато-черноземных почвах запасов влаги. В таких позициях (цифра 3 на рис. 4.1.11) к специфическим условиям местообитания подстраиваются растительные сообщества, в которых увеличивается обилие мезофитных видов. В данном случае почва выступает хранителем влаги, накапливая её в периоды избыточного увлажнения и отдавая в периоды засух.

Вторую устойчивую область образуют фоновые почвы, расположенные на плоских и выпуклых элементах рельефа, где преобладает непромывной водный режим и более низкие запасы влаги. В таких позициях (цифра 1 на рис. 4.1.11) уменьшается обилие мезофитных видов и появляются ксеро-мезофитные виды.

Существует достаточно выраженная переходная зона (цифра 2 на рис. 4.1.11), приуроченная к луговато-черноземным почвам, где в условиях периодически избыточного увлажнения (повышенного относительно фона запаса влаги, периодически промывной водный режим) формируются типичные ксеро-мезофильные фитоценозы.

Таким образом, растительные сообщества в целинных условиях связаны с особенностями перераспределения влаги по элементам рельефа, т.е. существует устойчивая связь в системе рельеф-почва-растительный покров. Накопление весенней влаги даёт возможность произрастать видам, в оптимальном соотношении и обилии, экологические требования которых подходят к каждому локальным условиям типов местообитаний (Lozbenev et.al., 2019).

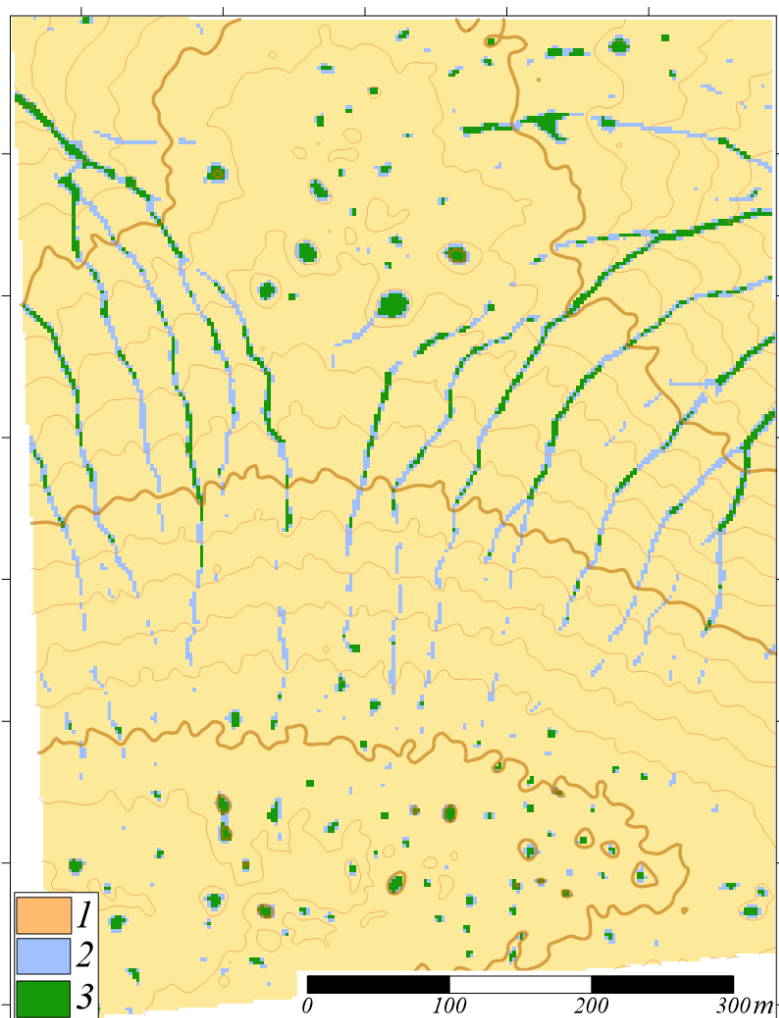


Рис. 4.1.11. Типы местообитаний: 1 – ксеромезофильные фитоценозы на черноземах, 2 – ксеромезофильные фитоценозы на луговато-черноземных выщелоченных почвах, 3 – мезофильные фитоценозы на луговато-черноземных выщелоченных почвах

Помимо целинного междуречного участка верификация была проведена на детальном пахотном ключевом участке «Фишман». Методами цифровой почвенной картографии для него была составлена карта элементарных почвенных ареалов участка (рис. 4.1.12а). Почвенный покров междуречий представлен черноземами типичными и карбонатными с единичными пятнами луговато-черноземных выщелоченных почв в западинах. В верхних частях склонов доминируют черноземы типичные (на северном склоне) и типичные карбонатные (на южном склоне). Черноземы выщелоченные и луговато-черноземные почвы приурочены к ложбинам. В нижних частях пологих склонов повсеместно распространены смытые варианты черноземов. В нижних частях ложбин формируются луговато-черноземные смыто-намытые почвы. В пределах ключевого участка можно выделить 2 контрастные агроэкологические группы земель: плакорную с преобладанием несмытых почв и эрозионную с преобладанием смытых почв. Агроэкологическая группировка земель (Кирюшин, 2005) создаёт благоприятные условия для количественной оценки вклада природной составляющей в формирование урожайности. Этот вклад можно оценить на примере вегетации сои в июле 2022 года. На рис. 4.1.12б видно, что на пологом склоне южной экспозиции 13 июля 2022 года вегетационная активность значительно (до 2 раз) ниже, чем на междуречье и в верхней части склона (рис. 4.1.12б). Это обусловлено как распространением эродированных, исходно менее плодородных почв, так и оттоком влаги со склонов, вызвавшее увядание части листьев сои, что неблагоприятно сказывается в дальнейшем на формировании урожая. При этом очевидны различия между вегетацией сои на северном и южном склоне. На более сухом и более эродированном южном склоне ареал ослабленных посевов существенно больше.

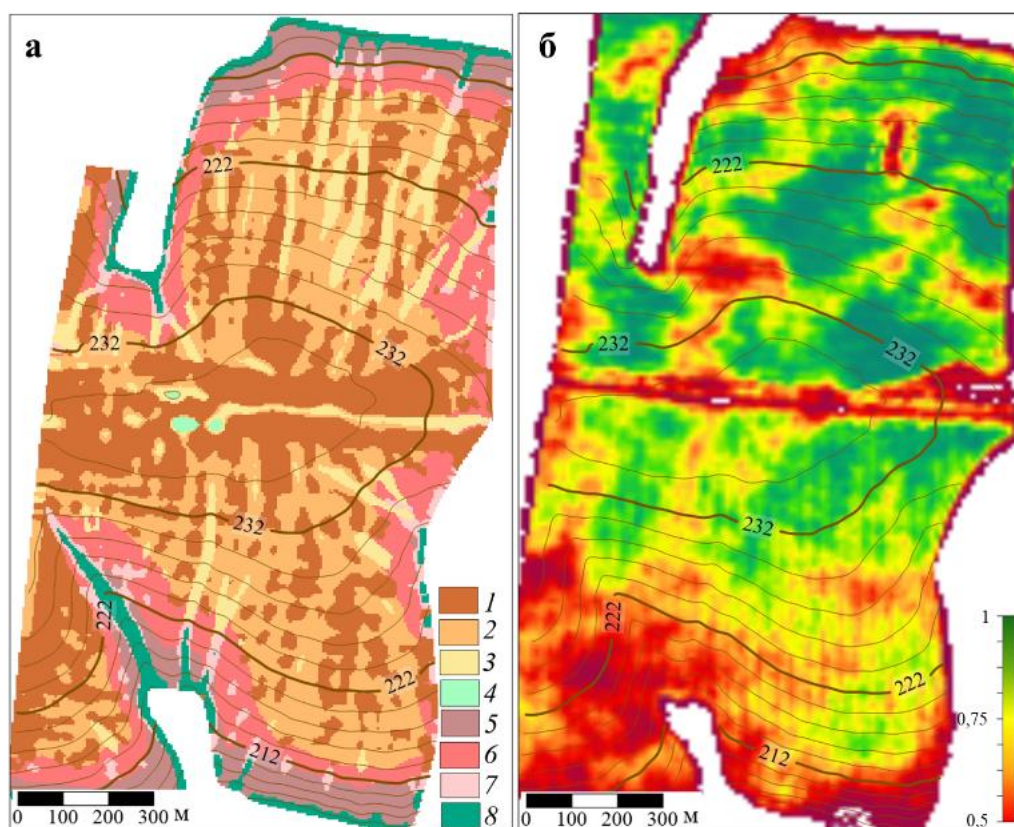


Рис. 4.1.12. Пахотный ключевой участок «Фишман»: **а)** Карта элементарных почвенных ареалов: 1 – чернозем типичный карбонатный (Чтк), 2 – чернозем типичный (Чт), 3 – чернозем выщелоченный (Чв), 4 – луговато-черноземная почва (Чл1), 5 – чернозем типичный карбонатный смытый (Чткэ1), 6 – чернозем типичный смытый (Чтэ1), 7 – чернозем выщелоченный смытый (Чвэ1), 8 – луговато-черноземная смыто-намытая почва (Чл1э1); **б)** нормализованный дифференцированный вегетационный индекс (NDVI) от 13 июля 2022 года

Предсказанный моделью состав почвенных комбинаций (рис. 4.1.13а) сопоставлен с результатами детальной почвенной съемки на двух ключевых участках, для которых детальные карты составлялись на основе независимых моделей: «Метеоплощадка», целинный ландшафт Центрально-Черноземного заповедника (рис. 4.1.13б, в) и пахотный участок «Фишман» (рис. 4.1.13г, д). В пределах участков были выбраны элементарные участки размером 200/100 метров (10/5 пикселей региональной модели) и рассчитано среднее долевое участие каждой почвы в пикселе региональной модели и площади каждой почвы на детальном участке. Затем почвы проранжированы в порядке убывания вероятности встречи (площади) (таблице 4.1.4., участки 1 и 7)

При общем соответствии компонентного состава модельных расчетов и детального картирования есть некоторые существенные различия. Во-первых, региональная модель несколько завышает долю луговато-черноземных почв на прибалочных склонах и микроводоразделах ложбин. Это заметно на участке №III «Метеоплощадки». В

действительности их доля в СПП велика за счет наличия как микрозападин, так и уже глубоковрезанных к этому моменту микроложбин, однако меньше предсказываемого.

На распаханном участке модель занижает долю Чтк в составе почвенных комбинаций междуречья и склонов южной экспозиции (№I и №II участка «Фишман»). В то время как эти почвы образуют фон ключевых участков, модель в ряде случаев предсказывает им только второе или третье место после Чт и Чв. Кроме того, модель занижает долю Лч в составе ПК междуречных равнин. До 20% их площади занимают суффозионные западины, в днищах которых развиваются луговато-черноземные почвы.

Существенные различия заметны в площади комбинаций с участием слабосмытых почв. При детальном картировании они были отмечены только в нижней трети склонов, на северной – в нижней четверти. По региональной модели их площадь существенно выше, и слабосмытые почвы в качестве субдоминантной почвы поднимаются почти до середины склона. Из-за этого возможно некоторое завышение доли склонового типа местности в ландшафтной структуре.

Также было проведено сравнение с другими ключевыми участками на целине в Центральном Черноземном заповеднике, обследованными при участии или под руководством автора: «Осиновый Куст» и «Химины Лощина».

На пашне обследованы участки «Голубицкий» и «Красны лог».

Также были привлечены архивные материалы из работ Целищевой и Дайнеко (1966) и Н.П. Сорокиной (1976), для которых удалось точно определить положение площадок детальных исследований. Результаты сопоставления с экспертной оценкой совпадения модельных и детальных почвенных комбинаций приведены в таблице 4.1.4.

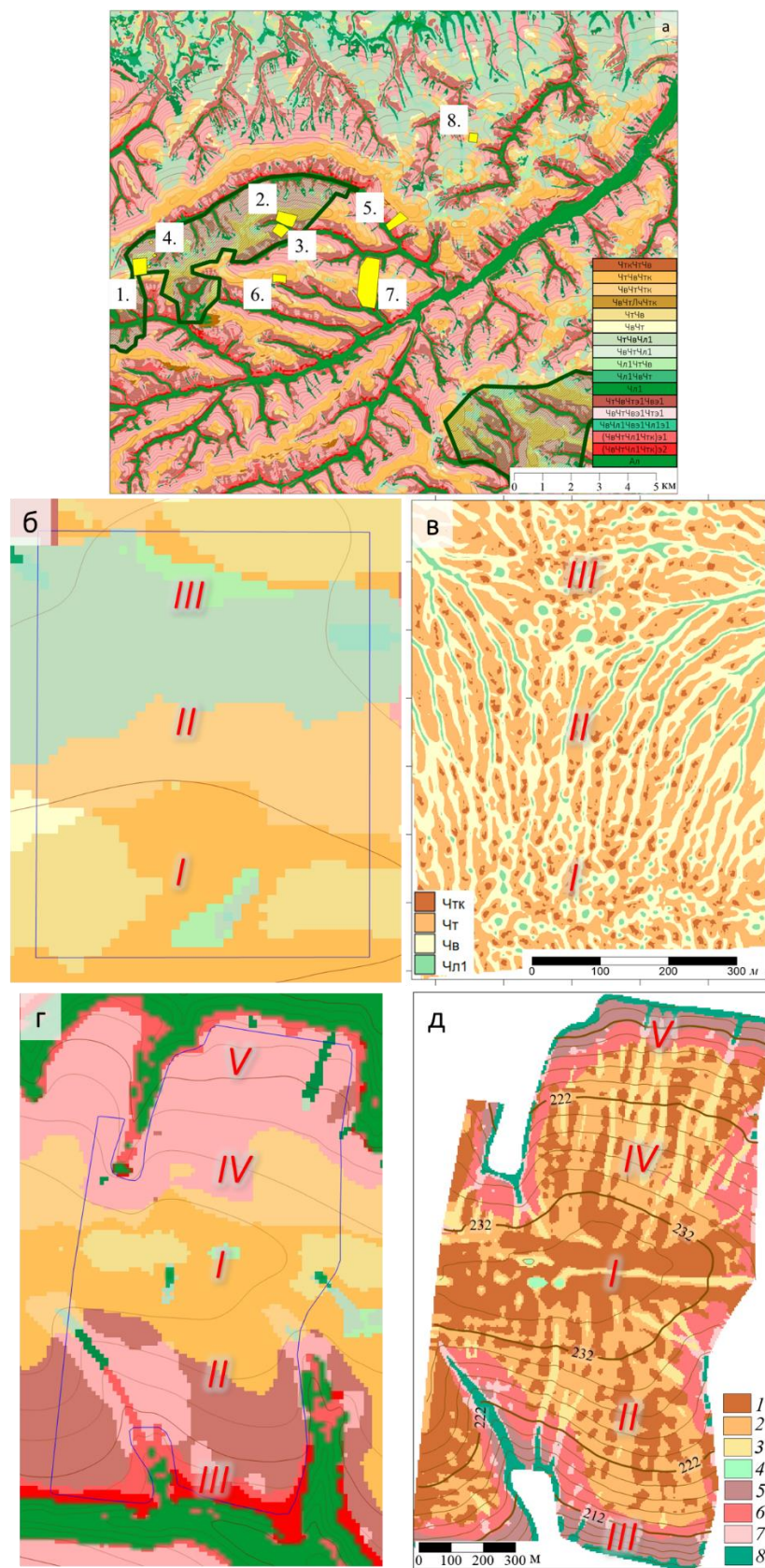


Рис. 4.1.13. Сопоставление результатов цифрового моделирования структурно-функциональной организации с результатами детального картографирования: а) карта структуры почвенного покрова с положением детальных ключевых участков, б) фрагмент карты СПП ключевого участка «Метеоплошадка», в) детальная почвенная карта ключевого участка «Метеоплошадка», г) фрагмент карты СПП ключевого участка «Фишман», д) детальная почвенная карта ключевого участка «Фишман»

Таблица 4.1.4. Компонентный состав почвенных комбинаций на ключевых участках по результатам детальной съемки и моделирования

Участок	Тип ЗП	Элемент мезорельефа	Фактическая СПП	Предсказанная СПП	Оценка совп.	
1. "Метеоплощад- ка"	Целин- а	Субгоризонтальное междуречье с западинами	ЧтЧвЧтк	ЧтЧвЧтк	1	
		Слабонаклонное междуречье	ЧвЧтЧтк	ЧвЧтЧтк	1	
		Склон, осложненный ложбинами	ЧвЧтЛчЧтк	ЛчЧвЧтЧтк	0.5	
2. Осиновый куст		Пологий южный склон	ЧтЧвЧтк	ЧтЧвЧтк	0.8	
Покатый южный склон		ЧтЧвЧтк	ЧтЧткЧв	0.7		
3. Хими- на лощина		Пологий северный склон	ЧтЧвЛч	ЧтЧв	0.7	
		Полого-покатыи северный склон	ЧтЧвЛчЧтк	ЧткЧтЧвЛч	0.5	
4. Площадки Целищева, Дай- неко, 1966		Субгоризонтальное междуречье	ЧтЧвЧткЛч	ЧтЧвЧтк	0.8	
		Северный пологий склон в верховье балки	ЧвЧтЛчЧтк	ЧвЧтЧтк	0.7	
		Пологий прибалочный склон	ЧтЧвЧткЛч	ЧвЧтЛчЧтк	0.5	
5. Голубицкий	Пашн- я	Междуречье	ЧтЧткЧв	ЧткЧтЧв	0.8	
		Южный склон 2°	ЧткЧтЧвЧтэ1	ЧткЧтЧв	0.5	
		Южный склон 3-5°	ЧткЧтЧткэ1	ЧткЧтэ1ЧвЧтЧэ2	0.3	
		Южный склон 5-7°	Чткэ1ЧткЧт	Чэ2Чткэ1Чтэ1	0.3	
6. Красный лог		выпуклый южный склон 2°	ЧтЧвЧтэ1	ЧтЧвЧтэ1	0.5	
		вогнутый южный склон 2°	Чткэ1ЧвЧтэ1Лч	ЧтЧв	0.3	
		выпуклый южный склон 2°	Чтэ1ЧтЧв	Чтэ1ЧвЧтк	0.7	
7. Площадки М.И. Фишмана		Междуречье	ЧтЧткЧв	ЧтЧвЛчЧтк	0.8	
		Северный склон 2°	ЧвЧтЛч	ЧвЧтЧтэ1	0.7	
		Северный склон 3-5°	ЧвЧтЧвэ1Чтэ1Лчн	Чвэ1Чтэ1Лчн	0.5	
		Южный склон 2°	ЧвЧтЛчЛч	ЧтЧвЧтк	0.5	
		Южный склон 3-5°	Чтэ1Чвэ1Чткэ1	ЧтЧвЧткЧткэ1Чтэ1	0.5	
8. Стационарный опыт, Н.П. Сорокина			Междуречье	ЧтЧвЧткЛч	ЧтЧвЛчЧтк	0.9
Общая оценка					14.50/23	

Составленные карты структур почвенного покрова и вариантов типов местностей с картографическим выражением может применяться в прикладных задачах агроэкологической оценки земель (Кирюшин, 2005). Путем группировки структур

почвенного покрова по принципу однородности условий возделывания сельскохозяйственных культур выделены агроэкологические группы земель (рис. 4.1.14). Для каждого контура определяется набор лимитирующих сельскохозяйственное производство факторов и способы адаптации к ним. Они же влияют на выбор оптимального уровня агротехнологий и конкретных технологических карт возделывания культур, что показано в таблице 4.1.5.

Агротехнологии подразделяются на следующие группы:

- 1) экстенсивная – ориентирована на естественное плодородие почвы с минимальным внесением удобрений и применении химических средств защиты растений;
- 2) нормальная – с использованием региональных доз минеральных удобрений и средств защиты растений;
- 3) интенсивная – с использованием повышения доз минеральных удобрений, микроудобрений, средств защиты растений, стимуляторов роста и др.;
- 4) интенсивная почвозащитная влагосберегающая - интенсивная технология, подразумевающая отказ от вспашки плугом в пользу глубокого рыхления или минимальной обработки в зависимости от культуры с целью накопления и запасаения весенней влаги;
- 5) прямой посев (no-till) – комплекс технологий без механической обработки почвы.

Предлагаемый подход позволяет адаптировать структуру севооборотов, производственных участков и агротехнологий применительно к каждому элементу ландшафта с учетом его агроэкологических особенностей.

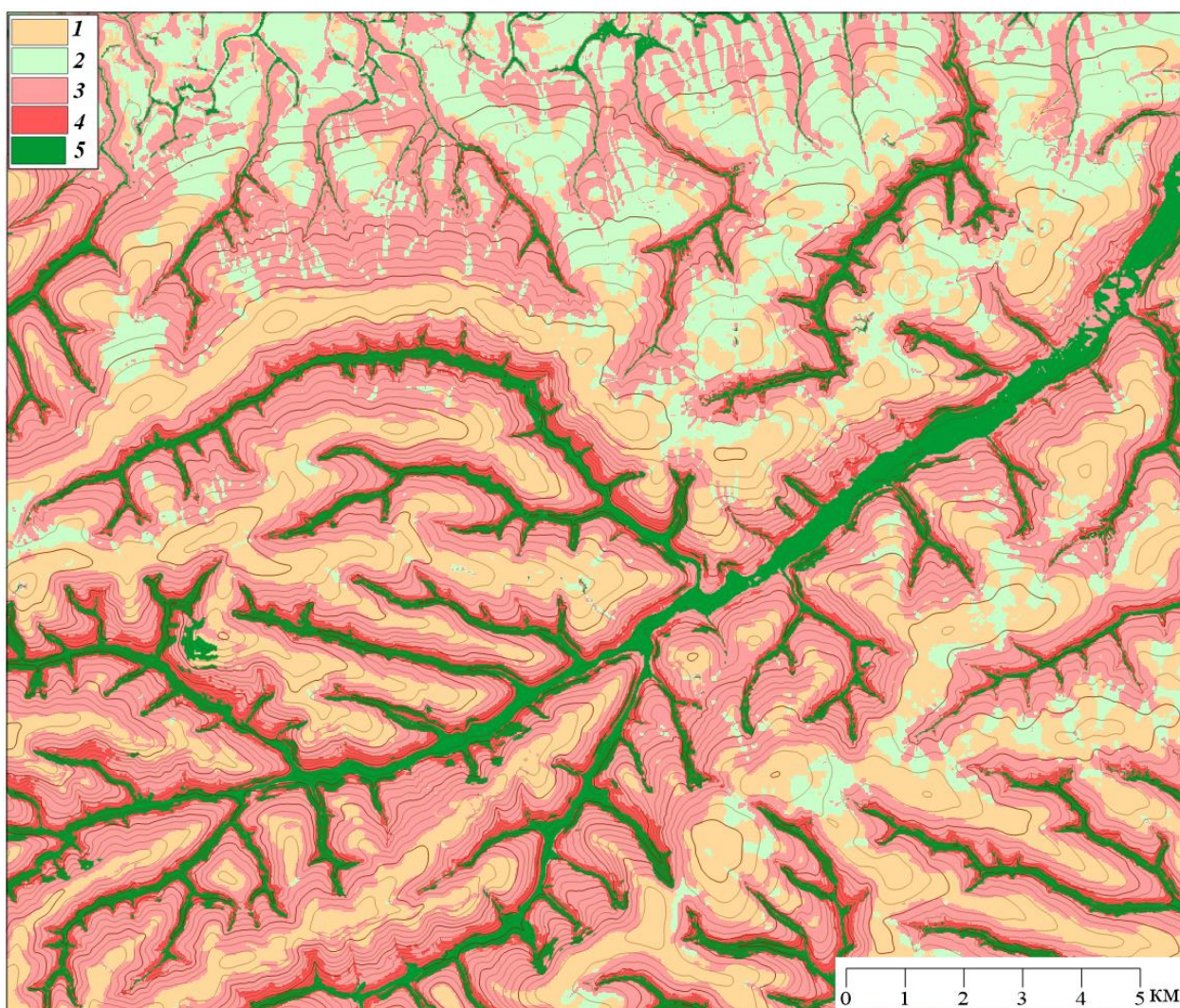


Рис. 4.1.14. Агроэкологические группы земель ключевого участка: 1 – плакорная, 2 – полугидроморфная, 3 – слабозеронозная, 4 – среднеэрозионная, 5 – пойменная

Таблица 4.1.5. Агроэкологическая оценка типов местностей ключевого участка Среднерусской возвышенности

Типы местностей	Агроэкологические группы земель	Технология возделывания	Урожайность основных культур в годы с разной влагообеспеченностью			Агроэкологические факторы		
			Климатическая норма	Ниже нормы (засуха)	Выше нормы (переувлажнение)	Рельеф	Породы	Почвы
Плакорный	Плакорные	Интенсивная влагосберегающая, no-till	Высокая	Средняя, возможна почвенная засуха	Высокая	междуречные равнины (уклон до 3°)	Лессовидные суглинки	Черноземы выщелоченные и типичные
Междуречный замедленно-дренируемый	Полугидроморфная	Интенсивная	Высокая, особенно в вогнутых элементах рельефа	Выше средней	Средняя	междуречные равнины с западинами до 10% площади		То же с луговато-черноземными и почвами западин
Пойменный	Пойменная	Интенсивная/экстенсивная/не пригодна (в зависимости от уровня поймы)	Высокая	Очень высокая	Средняя, возможно повсеместное вымокание культур	Поймы рек	Аллювиальные слоистые суглинки и супеси	Пойменные луговые и карбонатные
Склоновый	Слабозрозионная	Интенсивная почвозащитная влагосберегающая, no-till	Средняя	Низкая, возможна почвенная засуха	Средняя, есть риск усиления эрозии	Пологие и покатые склоны оврагов, балок и рек	Делювиальные лессовидные суглинки на дочетвертичных песках или карбонатных породах	Слабо- и среднесмытые черноземы
	Среднеэрозионная	Интенсивная почвозащитная влагосберегающая no-till	Низкая	Низкая, возможна почвенная засуха	Низкая, есть риск усиления эрозии	Покатые склоны оврагов, балок и рек		Среднесмытые черноземы

4.2. Структурно-функциональная организация почвенного покрова Окско-Донской низменности

Модель межкомпонентных связей ключевого участка показала точность предсказания доминантной почвы на уровне 48%. Среди значимых переменных в модели - индекс превышения над базисом эрозии и относительные превышения в окрестности 1500м, которые разделяют морфологические элементы ландшафта, приуроченные к основным поверхностям междуречий и самым низким частям участка – поймам (табл. 4.2.1). Ареал песчаных отложений обособляет надпойменные террасы р. Матыра. Крутизна склонов описывает положение склоновых (эрозионных) структур почвенного покрова и плакорных при самых малых уклонах. Модельный перераспределенный сток и топографический индекс расчлененности выделяют элементы балочной сети, рассеивающие и собирающие склоны междуречий и западинный комплекс.

Таблица 4.2.1. Основные показатели в модели межкомпонентных связей и их физический смысл

Показатель	Критерий Фишера	Физический смысл
Intercept	16.1	-
Индекс превышения над водотоком (CNBL)	27.1	Разделяют морфологические элементы ландшафта, приуроченные к основным поверхностям междуречий и самым низким частям участка - поймам
Относ. превышения в окрестности 1500м, м (TRI1500)	26	
Литологический состав (lito)	14	Обособляет надпойменные террасы и зандры р. Матыра, сложенные песками
Крутизна, ° (Slope)	12	Обособляет положение склоновых (эрозионных) ПК и плакорных при самых малых уклонах
Индекс расчлененности (TRI)	10.5	Выделяет рассеивающие и собирающие склоны междуречий
Перераспределенный сток (Simwe)	3.2	Выделяет элементы балочной сети и западинный комплекс

Наиболее значимыми для Окско-Донской низменности оказались геоморфометрические, а не функциональные показатели. Это связано с плоским низменным рельефом и тяжелым составом отложений, что определяет преобладание внутрипочвенного стока над поверхностным. Такое сочетание факторов определяет высокий уровень грунтовых вод и формирование широких ареалов перерувлажнения (Yurova et.al., 2021). Кроме того, в модель не вошли расчетные темпы смыва в связи с тем, что ареалы эродированных почв крайне незначительны и достаточную точность

определения их границ дает расчет на основе крутизны склонов. Общая точность модели составила 48%. Индивидуальные точности приведены в таблице 4.2.2.

Таблица 4.2.2. Точность предсказания таксонов почв региональной моделью

Таксоны почв*	Число точек	Точность, %	Предсказываемые почвы, число точек						
			Ч _Т + Ч _В	Ч _{Л1}	Ч _{Л2}	Л _ч	Л2+С _д	Смытые	Ал
Ч _Т + Ч _В	31	52	16	8	0	0	0	7	0
Ч _{Л1}	95	42	17	40	25	6	1	5	0
Ч _{Л2}	24	38	1	7	9	6	1	0	0
Л _ч	30	58	2	6	10	28	2	0	0
Л2+С _д	18	52	0	0	1	7	10	0	0
Смытые	21	62	7	1	0	0	0	13	0
Ал	13	61	0	1	1	3	0	0	8
Итого	232	48	43	63	45	43	14	29	8

*Ч_Т - чернозем типичный, Ч_В – чернозем выщелоченный, Ч_{Л1} – луговато-черноземная почва, Ч_{Л2} – лугово-черноземная почва, Л_ч – черноземно-луговая почва, Л2 –серая лесная, С_д – солодь, Смытые – смытые почвы без раделения на типы, Ал – аллювальные

Ареалы почв Окско-Донской низменности в факторном пространстве довольно сильно перерсекаются в области средних значений топографического индекса относительных превышений (-2...2) (рис. 4.2.1.). Черноземные почвы приурочены к слабовыпуклым поверхностям, луговато-черноземных - к плоским участкам и лугово-черноземных – к слабовогнутым. При этом положение эродированных почв достаточно точно определяются топографическим индексом расчлененности, в связи с чем расчетные темпы смыва не вошли в расчет модели.

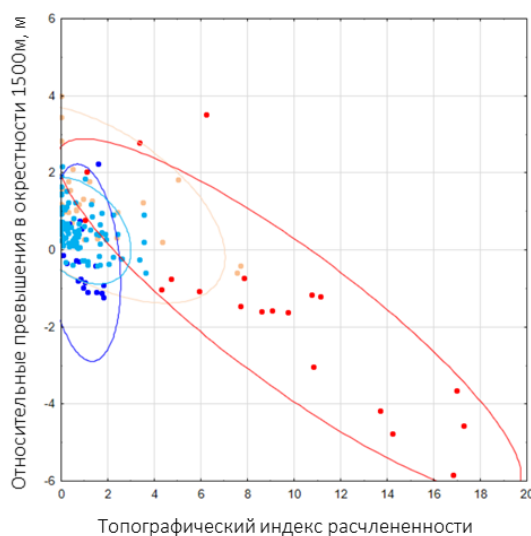


Рис. 4.2.1. Положение точек полевого описания почв в признаковом пространстве (синие – лугово-черноземные, голубые – луговато черноземные, оранжевые – черноземы, красные – смытые варианты почв)

Региональная модель позволила не только оценить наиболее значимые переменные в модели внутриландшафтных связей, но и рассчитать коэффициенты. Формулы расчета апостериорной вероятности (долевого участия) таксонов почв в пикселях следующие:

Чт + Чв: $0.797490187 - 0.0649758755 * \text{Simwe} + 0.0314624553 * \text{TRI} - 0.23147637 * \text{lito}$

$+ 0.0343347115 * \text{TPI1500} - 0.0000971336278 * \text{Slope} - 0.00328745624 * \text{CNBL}$

Чл1: $-0.16680045 - 0.625522337 * \text{Simwe} - 0.0134802668 * \text{TRI} - 0.156891215 * \text{lito} +$

$0.0222127955 * \text{TPI1500} - 0.00708415709 * \text{Slope} - 0.00529118838 * \text{CNBL}$

Чл2: $-0.690033418 - 0.150588224 * \text{Simwe} - 0.0261763094 * \text{TRI} - 0.000708324591 * \text{lito} -$

$0.0137138451 * \text{TPI1500} + 0.000950292954 * \text{Slope} + 0.00616774302 * \text{CNBL}$

Вл: $-0.690033418 - 0.150588224 * \text{Simwe} - 0.0261763094 * \text{TRI} - 0.000708324591 * \text{lito} -$

$0.0137138451 * \text{TPI1500} + 0.000950292954 * \text{Slope} + 0.00616774302 * \text{CNBL}$

ЛЗ песч: $-0.0657011889 - 0.0109361704 * \text{Simwe} - 0.00935688101 * \text{TRI} + 0.521251325 * \text{lito} -$

$0.000604637378 * \text{TPI1500} - 0.0182048104 * \text{Slope} - 0.00286289874 * \text{CNBL}$

Лч: $-0.0770965715 - 0.0219246136 * \text{Simwe} + 0.000884757264 * \text{TRI} + 0.00345905752 * \text{lito} +$

$0.000406725279 * \text{TPI1500} - 0.000486955491 * \text{Slope} + 0.000569637173 * \text{CNBL}$

Ал: $1.5342733 - 0.0427898167 * \text{Simwe} - 0.0444287513 * \text{TRI} - 0.0793063024 * \text{lito} - 0.0157535376 * \text{TPI1500} -$

$0.00744772881 * \text{Slope} - 0.00938714603 * \text{CNBL}$

Чэ1: $0.259474109 - 0.100792844 * \text{Simwe} + 0.0282326832 * \text{TRI} - 0.0710560784 * \text{lito} +$

$0.0138572808 * \text{TPI1500} + 0.0605010783 * \text{Slope} - 0.00155390896 * \text{CNBL}$

Л2ПГЭ+Сд: $-0.152887962 + 0.0839074319 * \text{Simwe} + 0.0825213701 * \text{TRI} + 0.0691649806 * \text{lito} -$

$0.0360308554 * \text{TPI1500} - 0.0774819965 * \text{Slope} + 0.00081309829 * \text{CNBL}$

Полученные карты долевого участия почв (пример на рис. 4.2.2) показывают основные ареалы черноземов на наиболее дренируемых позициях, а гидроморфных вариантов зональных почв - на плоских междуречьях.

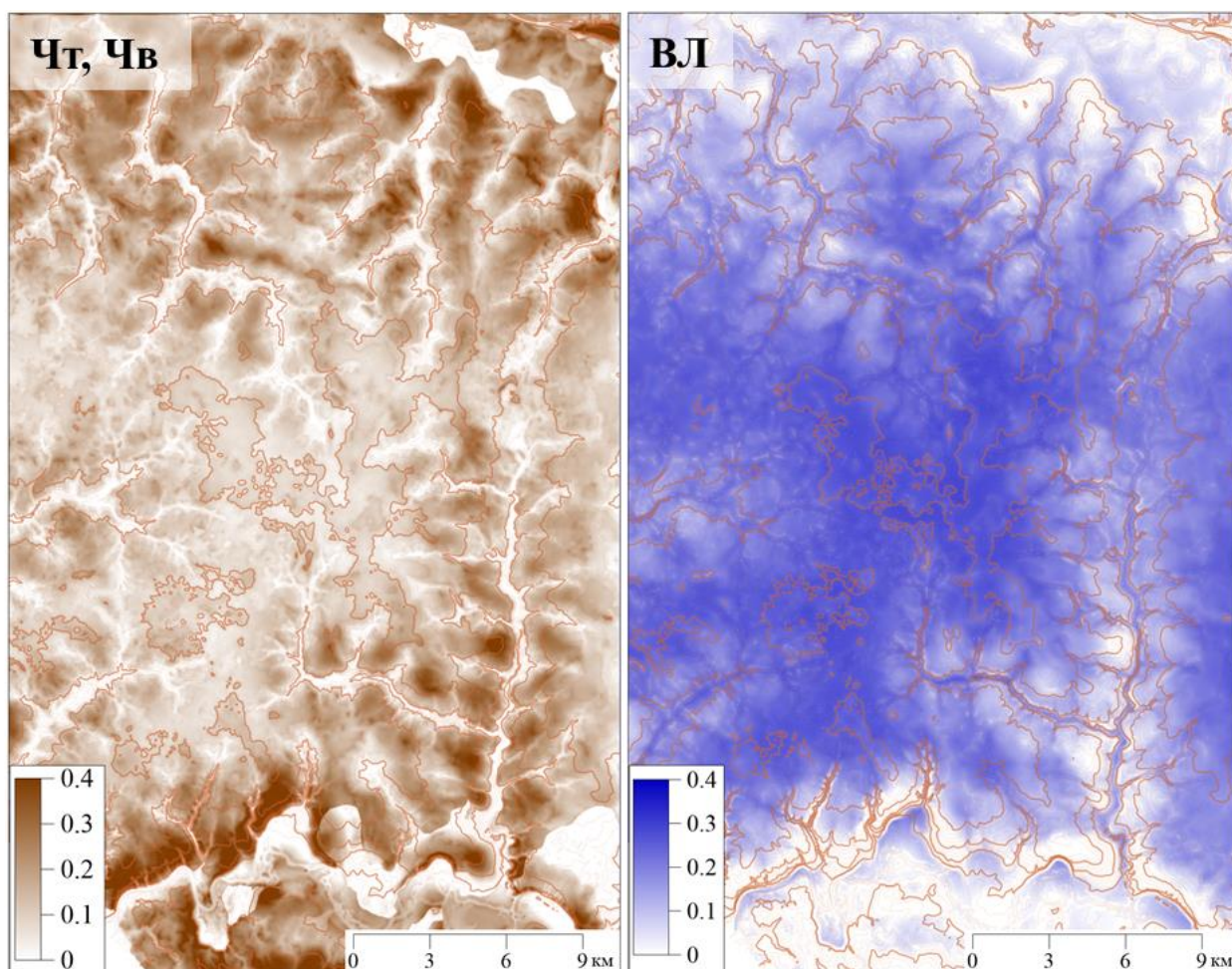


Рис. 4.2.2. Долевое участие (апостериорные вероятности) черноземов типичных и выщелоченных (**Чт, Чв**) и влажнолуговых почв (**Вл**) в каждой ячейке раstra (пример)

Поскольку ареалы почв значительно пересекаются в признаковом пространстве факторов на плоских междуречьях, их более точное положение в территориальном пространстве определяется расчетными значениями перераспределения осадков по модели SIMWE (рис. 4.2.3.а). Также для иллюстрации функциональных связей почв приводятся расчетные темпы смыва (рис. 4.2.3.б). На рисунке видно резкое увеличение значений перераспределенного стока, характерного для гидроморфных почв – лугово черноземных, занимающих днища средних западин и собирающих влагу крупных ложбин, а также гидроморфных почв крупных западин – солодей и серых лесных поверхностно-глеево-эллювиальных. Значения перераспределенного стока для остальных почв близки, поэтому в региональных условиях этот показатель применим для выделения ареалов сильнопереувлажненных почв. Растенные темпы смыва также показывают значимую связь с описанными почвами. Для эродированных почв характерны незначительные темпы смыва по сравнению с аналогичными почвами на возвышенных ландшафтах, однако их отличие от плакорных и гидроморфных почв достаточно велико – темпы смыва до 2 раз больше. При этом интересно, что для почв западин с высокими значениями перераспределенного стока

характерен приход не только влаги, но и аккумуляция вещества, которая, однако, связана не только и не столько с водной эрозией, сколько с механической эрозией, которая очень характерна для равнинных и низменных условий.

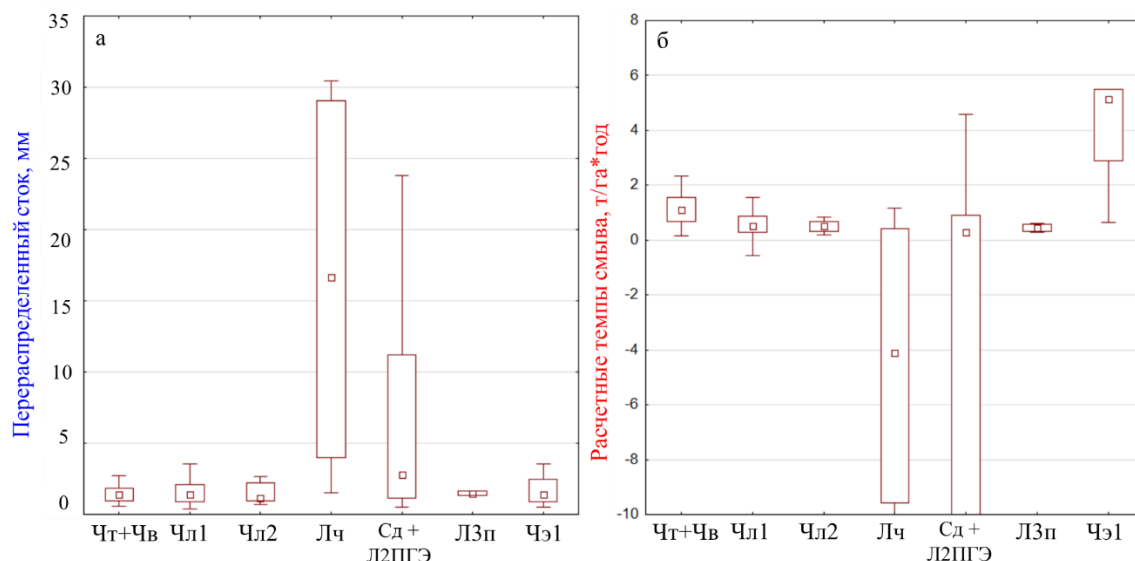


Рис. 4.2.3. Средние значения и дисперсия значений функциональных показателей перераспределенного стока, мм (а) и расчетные темпы смыва, т/га*год (б). Индексами обозначены: Чл1 – луговато-черноземная, Чв – чернозем выщелоченный, Чт – чернозем типичный, Чэ1 – черноземы слабосмытые, Чл2 – лугово-черноземные, Лч – черноземно-луговые, Сд – солоды, Л2ПГЭ – серые лесные поверхностно-глеево-эллювиальные, Л2п – темно-серые лесные песчаные, Чэ1 – черноземы слабосмытые

После составления модели предсказанные пиксели с расчетными долями разных почв были сгруппированы в элементарные почвенные структуры (рис. 4.2.4, табл. 4.2.3.).

Таблица 4.2.3. Критерии выделения элементарных почвенных структур (ЭПС) и точность их предсказания в дискриминантной модели

ЭПС	Критерий выделения
Плакорная	Чт+Чв>90%
Слабо-переувлажненная	Чл1 + Чл1г>90%
Средне-переувлажненная	Чл2+Чл2г>90%
Сильно-переувлажненная	Лч+Лчг>90%
Заболоченная	Л3ПГЭ+Сд+ВЛос>90%
Эрозионная	Чтэ1+Чвэ1+Чл1э1>90%
Литогенная	Л2песч+Л3песч>90%
Пойменная	Ал>90%

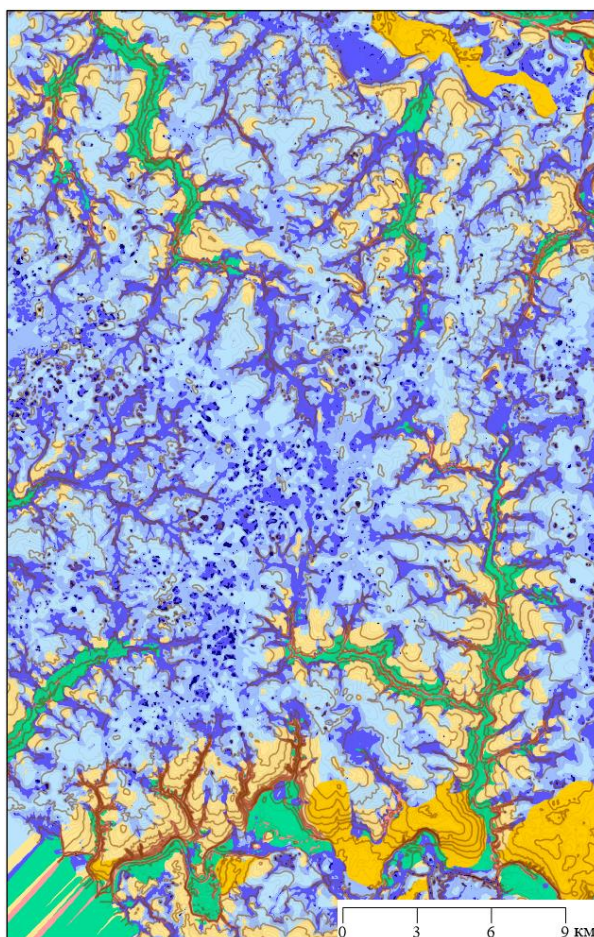


Рис. 4.2.4. Элементарные почвенные структуры ключевого участка на Окско-Донской низменности. Легенда к карте в табл. 4.2.3.

На следующем этапе элементарные почвенные структуры были сгруппированы в регионально-специфичные типы местности по принципу функциональной и генетической близости и сходной хозяйственной ценности (табл. 4.2.4., рис. 4.2.5.).

Таблица 4.2.4. Элементарные почвенные структуры и соответствующие им типы местности и агроэкологические группы земель

Тип местности	Агроэкологические группы земель	ЭПС	Доля площади, %
Плоскоместный озерно-болотный	Сильногидроморфная	Заболоченная (почвы: Влос, Сд, Л2ПГЭ)	5
Междуречный недренируемый	Слабогидроморфная	Средне- и Сильнопереувлажненная (Чл2, Чл2г, Лч, Лчг)	34
Междуречный замедленно-дренируемый	Полугидроморфная	Слабопереувлажненная (Чл1, Чл1г)	33
Плакорный	Плакорная	Плакорная (Чт, Чв, Чл1 по ложбинам)	15
Надпоменно-террасовый	Литогенная	Литогенная (Л2песч, Л3песч)	5
Пойменный	Пойменная	Пойменная (Аллювиальные почвы)	6
Склоновый	Слабоэрозионная	Эрозионная (Чтэ1, Чвэ1, Чл1э1)	2

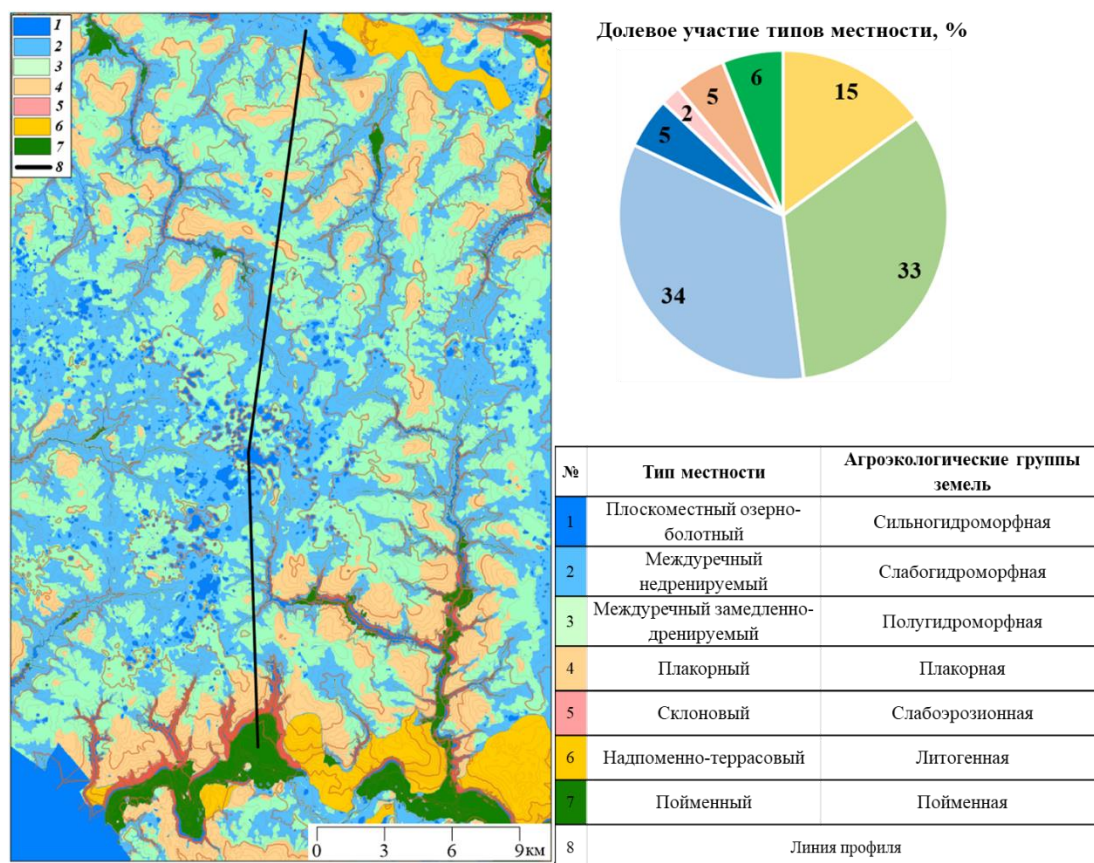


Рис. 4.2.4. Типы местности и агроэкологические группы земель ключевого участка на Окско-Донской низменности. Черной линией обозначено положение профиля, представленного на рис. 4.2.5.

Результаты моделирования и составленная карта (рис. 4.2.4) показывают преобладание переувлажненных почв практически на всех междуречьях Окско-Донской низменности. Их агроэкологическая оценка приведена в таблице 4.2.5. Самые высокие недренируемые позиции занимает плоскоместный озерно-болотный тип местности, состоящий из самых крупных переуглублённых западин с луговыми почва, солодами и, местами, низинными болотами. Сток влаги из них практически не происходит, основной расход талой и дождевой воды – на испарение и фильтрацию в грунтовые воды. Именно данный тип местности формирует избыточный запас влаги в грунтовых водах района и поддерживает их примерно постоянный уровень. Западный комплекс в данном типе местности хорошо описывается как факторными индикаторами в модели (топографический индекс влажности, например), так и функциональным показателем перераспределенного стока.

Плоскоместный озерно-болотный тип местности соответствует сильногидроморфной агроэкологической группе земель. Она характеризуется достаточно низким потенциалом плодородия из-за высокой доли переувлажненных видов земель и продолжительным переувлажнением (практически в течение всего вегетационного периода) даже в годы с

пониженной влагообеспеченностью, что способствует вымоканию растений и распространению болезней. Данная группа земель практически не пригодна к растениеводству и рекомендуется для сенокосно-пастбищных видов использования или в несельскохозяйственных целях.

Междуречный недренируемый тип местности – широко распространён на междуречьях переувлажнённых междуречьях с множеством небольших западин. Фоновые почвы здесь – лугово-черноземные и черноземно-луговые. Эта местность также испытывает постоянное переувлажнение, однако вследствие наличия меньшего количества западин уровень грунтовых вод опущен ниже и не так критично влияет на почвенно-растительный покров. Земли данного типа местности распаханы более чем на половину, за исключением крупных западинных комплексов. Он соответствует слабопереувлажнённой агроэкологической группе земель. Её агроэкологическая ценность значительно выше сильнопереувлажнённой группы земель в связи с очень высокими запасами влаги в почве, но отсутствием избыточной влаги в течение всего периода вегетации. Земли данной группы пригодны к интенсивному использованию в растениеводстве требовательных к влаге зональных культур: кукурузы, сои, подсолнечника в севооборотах с зерновыми и многолетних бобовых и зернобобовых трав и травосмесей.

Междуречный замедленно-дренируемый тип местности приурочен к краевым частям междуречий с большей интенсивностью оттока влаги. Периодическое переувлажнение формируется лишь во время снеготаяния за счет внутрисочвенного притока либо формирования временного верховодки. Преобладают луговато-черноземные почвы с лугово-черноземными глееватыми и глеевыми по более влажным позициям в небольших западинах и верховьях ложбин. Данный тип местности соотносится с очень благоприятным для растениеводства полугидроморфной группой земель.

Плакорный тип местности занимает верхние пологие части придолинных склонов, где переувлажнение практически не развито за счет оттока лишней влаги вниз по склону и более близкого (в пределах 2-6 метров) подстилания лёгкими водно-ледниковыми отложениями. В структуре почвенного покрова преобладают почвы черноземного ряда с луговато-черноземными почвами по ложбинам.

Склоновый тип местности приурочен к пологим и покатым склонам балок и долин рек с участием слабосмытых почв в структуре почвенного покрова.

Надпойменно-террасовый и пойменный типы местности приурочены, соответственно, к задрмам, террасам и поймам рек Матыра и Воронеж с серыми лесными песчаными и аллювиальными почвами.

С функциональных позиций типы местности отличаются средними показателями и дисперсией значений процессных характеристик (рис. 4.2.6). Средние расчетные темпы смыва значительно выше в склоновом типе местности, для остальных различия незначительны. По показателю перераспределенного стока высокие средние значения и дисперсию показывает плоскоместный озерно-болотный тип местности, который занимает высокие позиции рельефа с крупными собирающими влагу западинами. Для него характерны средние значения в 2 раза больше, чем для дренируемого плакорного или междуречного замедленно-дренируемого типа местности.

Соотнесение типов местностей с функциональными показателями может быть эффективно использовано в задачах комплексной оценки земель в части дифференциации севооборотов и культур к их целевым нишам по параметрам тепловлагообеспеченности.

Таблица 4.2.5. Агроэкологическая оценка типов местностей ключевого участка Окско-Донской низменности

Типы местности	Агроэкологические группы земель	Технология возделывания*	Урожайность основных культур в годы с разной влагообеспеченностью			Агроэкологические факторы			
			Климатическая норма	Ниже нормы (засуха)	Выше нормы (переувлажнение)	Рельеф	Породы	Почвы	Грунтовые воды
Плакорный	Плакорная	Интенсивная влагосберегающая	Высокая	Средняя, возможна почвенная засуха	Высокая	междуречные равнины (1-2°)	Лессовидные суглинки (2-6 м), на песках, суглинках и глинах	Черноземы выщелоченные и типичные	Глубже 6 м
Междуречный замедленно-дренируемый	Полугидроморфная	Интенсивная	Высокая, особенно в вогнутых элементах рельефа	Выше средней	Средняя	междуречные равнины с западинам и до 10% площади		Луговато-черноземные и почвы западин	Глубже 6 м, 3-6 в западинах
Междуречный недренируемый	Слабо-переувлажненная	Интенсивная	Высокая, возможно вымокание культур в западинах	Высокая	Средняя, вымокание культур в западинах	междуречные равнины с западинам и (10-25%)		Лугово-черноземные и почвы западин	3-6 м, 1,5-3 в западинах
Плоскоместный озерно-болотный	Сильно-переувлажненная	Нормальная	Низкая, вымокание культур в западинах	Средняя, возможно вымокание культур в западинах	Низкая, вплоть до полного вымокания культур	междуречные равнины с западинам и более 50% площади		Черноземно-луговые и почвы западин	0,5 – 1,5 м, 0-1 м в западинах

Надпойменн о- террасовый	Литогенная	Экстенсивная	Средняя	Низкая, повсемест ная почвенна я засуха	Высокая	Надпоймен ные террасы рек	Водноледник овые пески или супеси	Серые и темно- серые лесные песчаные	Более 6м
Пойменный	Пойменная	Интенсивная/экстенс ивная/не пригодна (в зависимости от уровня поймы)	Высокая	Очень высокая	Средняя, возможно повсеместное вымокание культур	Поймы рек	Аллювиальн ые слоистые суглинки и супеси	Пойменны е луговые и карбонатн ые почвы	0.5-3 м, затопле ние при половод ье и сильных паводка х
Склоновый	Слабоэрозийна я	Интенсивная почвозащитная влагосберегающая	Средняя	Низкая, возможна почвенна я засуха	Высокая, есть риск усиления эрозии	Пологие и покатые склоны оврагов, балок и рек	Делювиальн ые суглинки и глины на моренных суглинках, дочетвертичн ых песках или глинах	Слабо- и среднесмы тые черноземы	3-6 и более метров

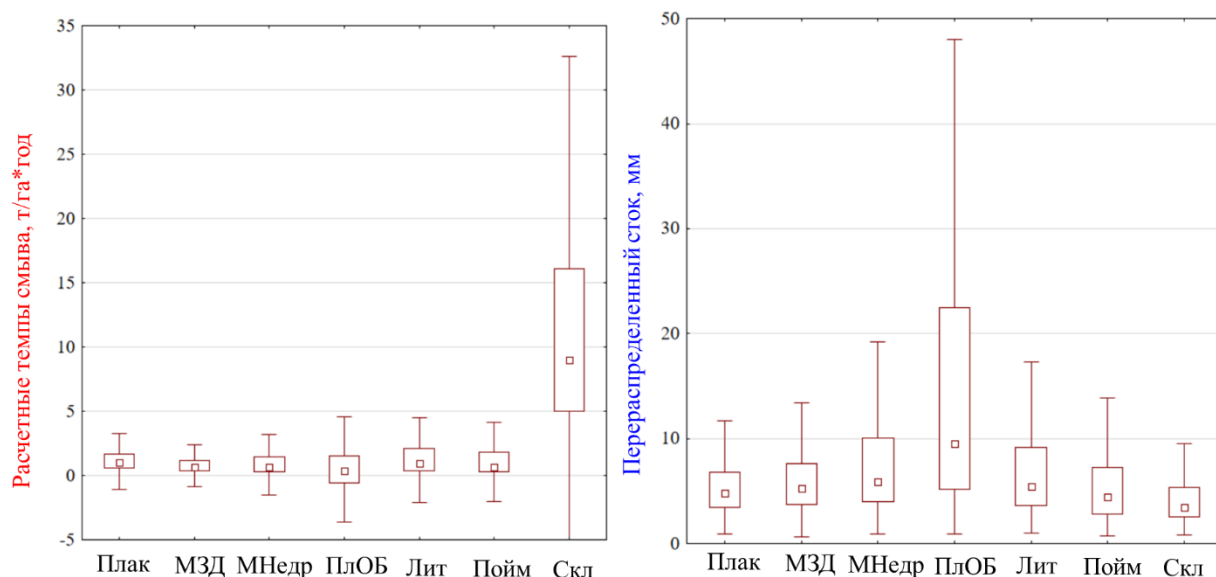


Рис. 4.2.6. Функциональные показатели типов местностей Окско-Донской низменности. Индексами обозначены: Плак – плакорный, МЗД – междуречный замедленно-дренируемый, Мнедр – междуречный недренируемый, ПлОБ – плоскоместный озерно-болотный, Лит – литогенный, Пойм – пойменный, Скл – склоновый

Для получения представления о типичной ландшафтной структуре ключевого участка был построен профиль, отражающий некоторые значимые особенности территории с точки зрения структурно-функциональной организации ландшафта. (рис. 4.2.7). Самые высокие, широкие и плоские участки занимает плоскоместный озерно-болотный и междуречный недренируемый типы местности практически без протекания эрозионных процессов (средние темпы 0,2-0,4 т/га*год), местами, наоборот, с зонами аккумуляции. При этом для него характерен дополнительный приток влаги относительно прилегающих к ним междуречного замедленно-дренируемого и плакорного типов местности (11-14 против 8 мм, соответственно). Для плакорного типа местности также характерны незначительные темпы смыва, что объясняется общим небольшим уклоном территории, который вызывает внутритпочвенный сток, но не провоцирует серьезные эрозионные процессы. Они типичны лишь для склонов долин крупных рек, например, Шехмани (в правой части профиля). Но даже для таких позиция характерны небольшие значения – около 3-5 т/га*год.

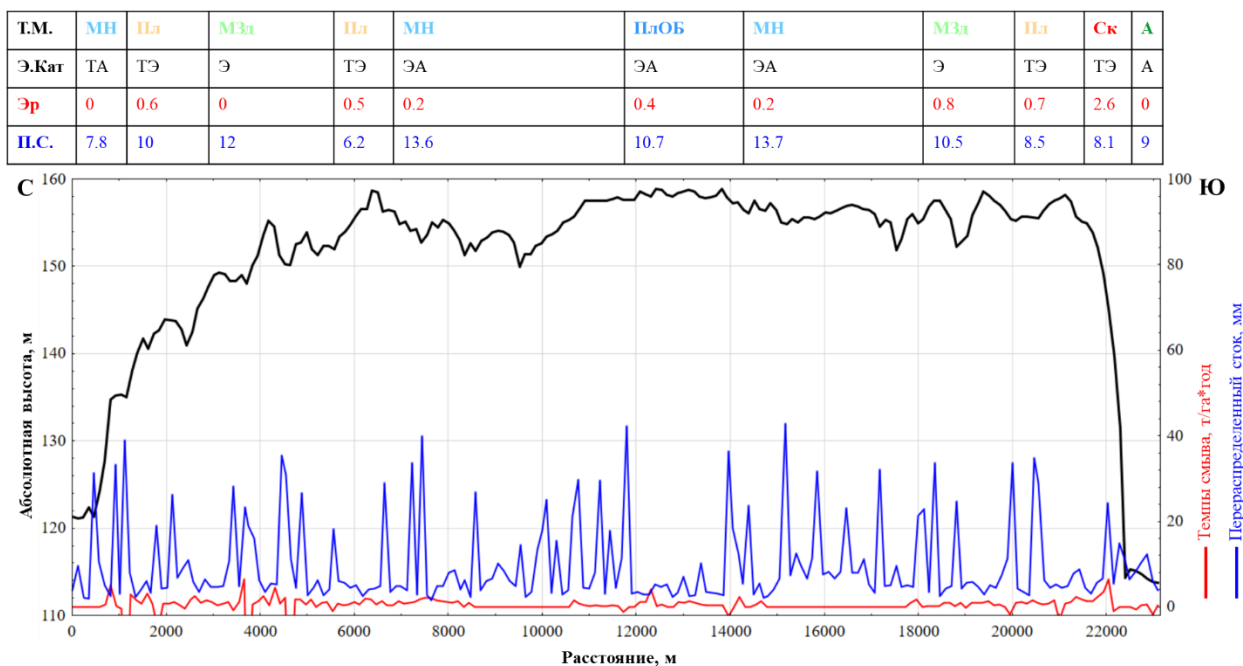


Рис. 4.2.7. Типичный профиль, пересекающий доминантные типы местности Среднерусской возвышенности с параметрами их функционирования. Над рисунком обозначены: Т.М. – типы местности, Э.Кат – элементы катены, Эр – темпы смыва, т/га*год, П.С. – перераспределенный сток, мм. Типы местности обозначены индексами: Пл- плакорный, МЗд – междуречный замедленно дренируемый, МН – междуречный недренируемый, ПлОБ – плоскоместный озерно-болотный, Ск – склоновый, А – пойменный

В целом, участок на Окско-Донской низменности характеризуется небольшими темпами эрозионных процессов и преобладанием процессов аккумуляции влаги в западинах на широких плоских междуречьях с формированием широких ареалов гидроморфных почв и структур почвенного покрова.

Микроструктуры почвенного покрова ключевого участка «Ивановка», составленные экспертно на основе почвенной съёмки, морфометрического анализа рельефа и космической съёмки приведены на рисунке 4.2.8. Междуречья занимают комплексы лугово-черноземных обычных и выщелоченных почв с солодами на субгоризонтальных междуречьях. В водосборных понижениях с дополнительным притоком влаги в ложбинах формируется комплекс лугово-черноземных обычных и выщелоченных почв. Пологие приводораздельные склоны с оттоком избыточной влаги занимают луговато-черноземные почвы. На пологих и покатых склонах формируются комплексы и пятнистости черноземов типичных и слабосмытых с луговато-черноземными смыто-намытыми почвами. Дерновые почвы занимают овраги и балки. В долине малой реки сформировались аллювиальные почвы.

К сожалению, обследованный участок не попал в итоговую карту, однако можно сказать, что такая структура почвенного покрова типична для междуречного замедленно-

дренируемого типа местности Окско-Донской низменности и концептуально совпадает с полученными результатами моделирования.

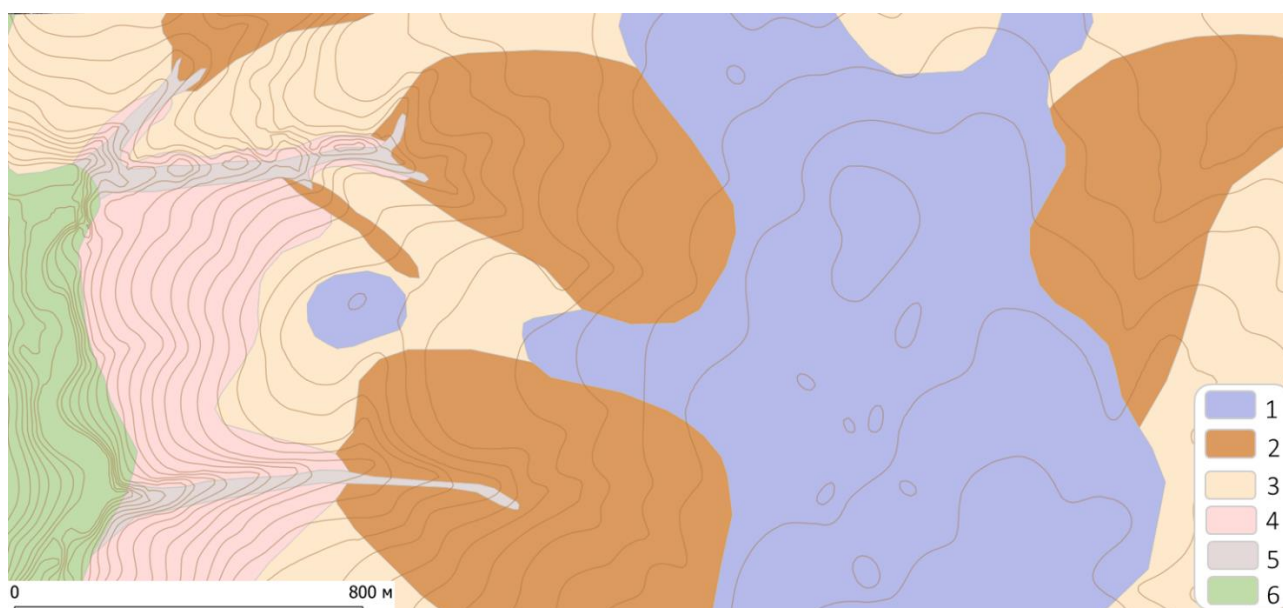


Рис. 4.2.8. Микроструктуры почвенного покрова ключевого участка «Ивановка»: 1 – комплексы лугово-черноземных обычных и выщелоченных почв с солодами субгоризонтальных междуречий; 2 – комплекс лугово-черноземных обычных и выщелоченных водосборных понижений; 3 – луговато-черноземные почвы пологих приводораздельных склонов; 4 – комплексы и пятнистости черноземов типичных и слабосмытых с луговато-черноземными смыто-намытыми почвами; 5 – дерновые почвы овражно-балочного комплекса; 6 – аллювиальные почвы долины малой реки. Горизонтالي проведены через 1 метр.

4.3. Структурно-функциональная организация почвенного покрова Бугульминско-Белебеевской возвышенности

Структура почвенного покрова ключевого участка на Бугульминско-Белебеевской возвышенности имеет свою региональную специфику, связанную с расчлененным рельефом, определяющим перераспределение влаги, и неоднородностью почвообразующих пород в связи с положением в предгорной части Урала.

В рельефе выделяются несколько высотных уровней. Наивысшие позиции приурочены к холмам Бугульминско-Белебеевской возвышенности, сложенных дчетвертичными отложениями, преимущественно лёгкого состава. В ходе полевого обследования на них диагностированы серые лесные и тёмно-серые лесные почвы. Второй уровень рельефа – основные поверхности склонов холмов и выположенные междуречья среднего уровня. Для них характерны почвы черноземного ряда (черноземы оподзоленные, выщелоченные и типичные), а также их полугидроморфные аналоги в вогнутых позициях. Шлейфы склонов холмов, иногда наложенные на террасы рек (террасоувалы), и крупные, но слабоврезанные балки характеризуются значительным переувлажнением и

преобладанием лугово-черноземных и луговых, иногда намытых, почв. Нижние высотные уровни занимают поймы рек с аллювиальными почвами.

Сложные условия рельефа и контрастный состав отложений определил относительно невысокую степень распаханности территории (порядка 35%), что обуславливает неширокое развитие антропогенной эрозии, несмотря на большие перепады высот и расчлененность рельефа.

В состав медали межкомпонентных отношений вошли следующие переменные (таб. 4.3.1): превышение над базисом эрозии, которое определяет преобладание серых лесных песчаных почв на высших позициях междуречий, перераспределенный сток, который упорядочивает почвы в возрастающий ряд гидроморфизма по элементам ложбинной и овражно-балочной сети. Относительные превышения в окрестности 1500м определяют общий характер почвенного покрова: преобладание черноземных почв на плакорах и пойменных почв в самых нижних позициях рельефа. Относительное положение на склоне и расчетные темпы смыва почв определяют положение почв разной степени эродированности.

Таблица 4.3.1. Основные показатели в модели межкомпонентных связей Бугульминско-Белебеевской провинции и их физический смысл

Показатель	Критерий Фишера	Физический смысл
Intercept	35	-
Топоиндекс расчлененности в окр. 40м (TRI)	8.1	Определяют общий характер почвенного покрова
Относит. превышения в окр. 1500м, м (TRI1500)	7.4	Определяет преобладание черноземных почв на плакорах и гидроморфных почв в подчиненных позициях
Темпы смыва, т/га*год (WS)	5.5	Определяет положение смытых почв
Индекс глубины долин (VD)	2.4	Показывает особенности почвенного покрова вогнутых элементов рельефа
Превышение над базисом эрозии, м (CNBL)	2.3	Определяет преобладание серых лесных песчаных почв на высших позициях междуречий
Перераспределенный сток, м (Simwe)	3	Выстраивает почвы в возрастающий ряд гидроморфизма по элементам ложбинной и овражно-балочной сети

Модель межкомпонентных связей данного участка показала самую высокую точность предсказания доминантной почвы - 44%. Точность предсказания таксонов почв в рамках дискриминантной модели приведена в таблице 4.3.2.

Таблица 4.3.2. Точность предсказания таксонов почв ключевого участка

Описанные почвы*	Доля правильных	Л2+Л3песч	Предсказанные почвы								
			Чоп	Чт	Чв	Чл1в	Чл2	Лч	Вл	Эр	Ал
Л2+Л3песч	34.85	23	0	37	0	0	0	0	0	5	1
Чоп	60.00	4	6	0	0	1	1	0	1	2	0
Чт	70.94	13	0	83	1	3	2	2	1	10	2
Чв	2.70	11	0	22	1	1	0	0	0	2	0
Чл1в	20.59	2	0	11	0	7	2	4	1	7	0
Чл2	33.33	0	0	3	0	1	4	0	1	2	1
Лч	28.57	0	0	4	1	0	0	2	0	0	0
Вл	41.67	0	0	7	0	0	0	0	5	0	0
Эр	56.25	3	0	17	0	6	1	0	1	36	0
Ал	14.29	0	0	3	1	1	0	0	1	0	1
Всего	44.10	56	0	193	4	20	10	8	11	64	5

* Л2 – серая лесная, Л3 – темно-серая лесная, Чоп – чернозем оподзоленный, Чв – чернозем выщелоченный, Чт – чернозем типичный, Чл1в – луговато-черноземная выщелоченная почва, Чл2 – лугово-черноземная, Лч – черноземно-луговая, Вл – влажнолуговая, Эр – комплекс смытых почв, Ал – аллювальные.

Долевое участие таксонов почв в пикселях рассчитывается по следующим формулам:

Л2+Л3песч: $0.714698573 - 0.00125930949 * WS - 5.31032923 * Simwe - 0.28362439 * CNBL - 0.194275531 * VD + 0.0106561861 * TPI1500 + 0.00687149875 * TRI$

Чоп: $0.148589807 + 0.0000272880968 * WS + 0.26867469 * Simwe - 0.174701009 * CNBL - 0.10508977 * VD + 0.000314759148 * TPI1500 - 0.00191819542 * TRI$

Чт: $0.224663677 + 0.00046462863 * WS + 2.38246291 * Simwe + 0.139847129 * CNBL - 0.1612473 * VD + 0.00801382528 * TPI1500 - 0.0460747127 * TRI$

Чв: $0.221388038 + 0.0000455750967 * WS - 2.18226169 * Simwe + 0.0998359417 * CNBL + 0.12907031 * VD + 0.000921879545 * TPI1500 - 0.0440315385 * TRI$

Чл1в: $0.125485776 - 0.00199200887 * WS + 0.74433226 * Simwe - 0.0876534999 * CNBL - 0.161349274 * VD - 0.00714505048 * TPI1500 + 0.0104266927 * TRI$

Чл2: $-0.088975001 - 0.0000767501395 * WS + 2.89157074 * Simwe - 0.0667461423 * CNBL - 0.0805033213 * VD - 0.000640036801 * TPI1500 - 0.00252794187 * TRI$

Лч: $-0.0392547264 - 0.00174017589 * WS + 0.090685017 * Simwe + 0.0463668982 * CNBL + 0.0971396806 * VD - 0.000759569834 * TPI1500 - 0.0014832056 * TRI$

Вл: $-0.0719603891 + 0.000356594314 * WS + 0.179549877 * Simwe + 0.0883354648 * CNBL + 0.232860579 * VD - 0.0032063369 * TPI1500 - 0.0176587508 * TRI$

Эр: $-0.268409184 + 0.00401427413 * WS + 1.43074245 * Simwe + 0.24132022 * CNBL + 0.150391667 * VD - 0.00496890674 * TPI1500 + 0.104072515 * TRI$

Ал: $0.0337734291 + 0.000159884122 * WS - 0.495427024 * Simwe - 0.00298061294 * CNBL + 0.0930029608 * VD - 0.00318674935 * TPI1500 - 0.00767636156 * TRI$

Долевые участия в пикселях некоторых почв, рассчитанные по приведенным выше формулам, показаны на рисунке 4.3.1. На них видны различия в предсказанном долевом участии и размещении двух почв. Например, серые и тёмно-серые лесные песчаные почвы характеризуются наибольшим участием на высших частях выпуклых междуречий и микроводоразделов. Их антагонисты, лугово-черноземные почвы встречаются в днищах ложбин и балок, повторяя рисунок показателя перераспределенного стока.

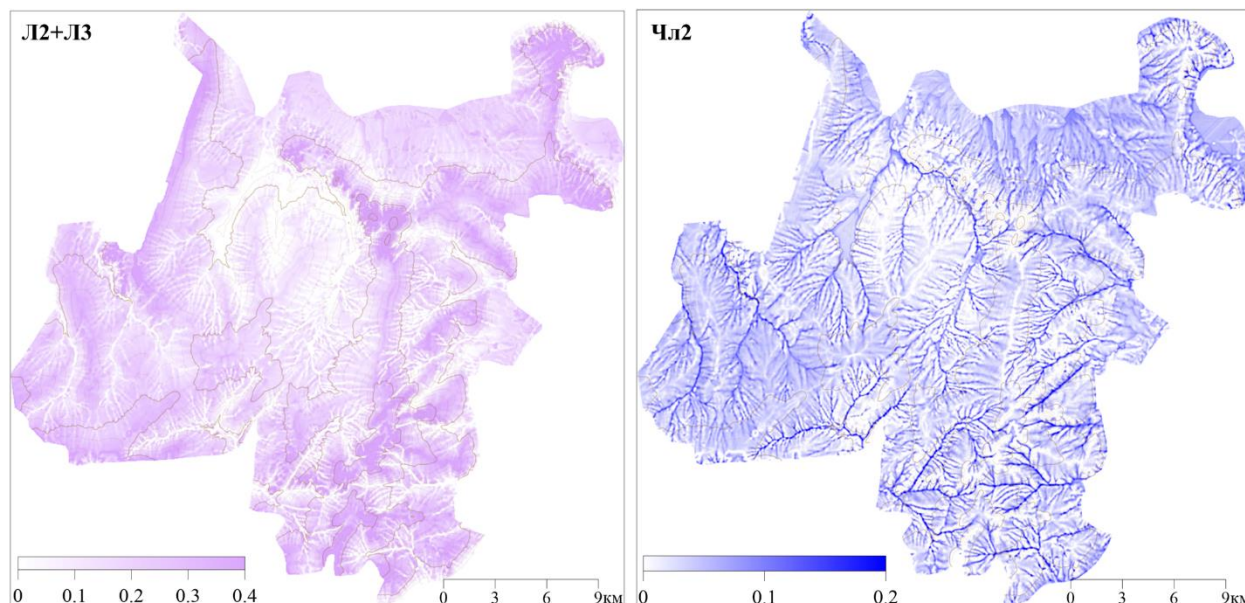


Рис. 4.3.1. Долевое участие (апостериорные вероятности) серых и темно-серых лесных песчаных почв (Л12+Л13) и Лугово-черноземных суглинистых почв (Чл2) в каждой ячейке раstra (пример)

По принципу генетической однородности и агроэкологической ценности предсказанные элементарные почвенные ареалы были сгруппированы в элементарные почвенные структуры (ЭПС). Плакорная группа включает почвы черноземного ряда: Чт, Чв и единично встречающиеся оподзоленные черноземы. Литогенная группа – серые и темно-серые песчаные почвы. Полугидроморфная – луговато-черноземные глееватые, выщелоченные и оподзоленные почвы. Гидроморфная группа включает лугово-черноземные и луговые почвы. Пойменная включает ареал всех аллювиальных почв. Эродированные почвы сформированы фрагментарно и объединены в эрозионную группу почв.

Функциональные показатели почв между собой значительно различаются. Наибольшие темпы смыва (рис. 4.3.2, слева) характерны для черноземов слабо- и среднесмытых, приуроченных к нижним частям склонов холмов. В 2-3 раза меньшие значения характерны для серых лесных песчаных почв (среднее значение смыва 0.1

т/га*год), чуть большие значения характерны для черноземных почв, расположенных на склонах. Для луговато-черноземных почв междуречий и верхних частей ложбин, а также лугово-черноземных и луговых почв балок темпы смыва незначительны. Перераспределенный сток (рис. 4.3.2, справа) показывает высокие средние значения и низкую вариабельность, что может быть связано с недостаточной параметризацией модели. Тем не менее можно оценить, что наибольший перераспределенный сток показывают почвы междуречий и собирающих ложбин – луговато-черноземные почвы.

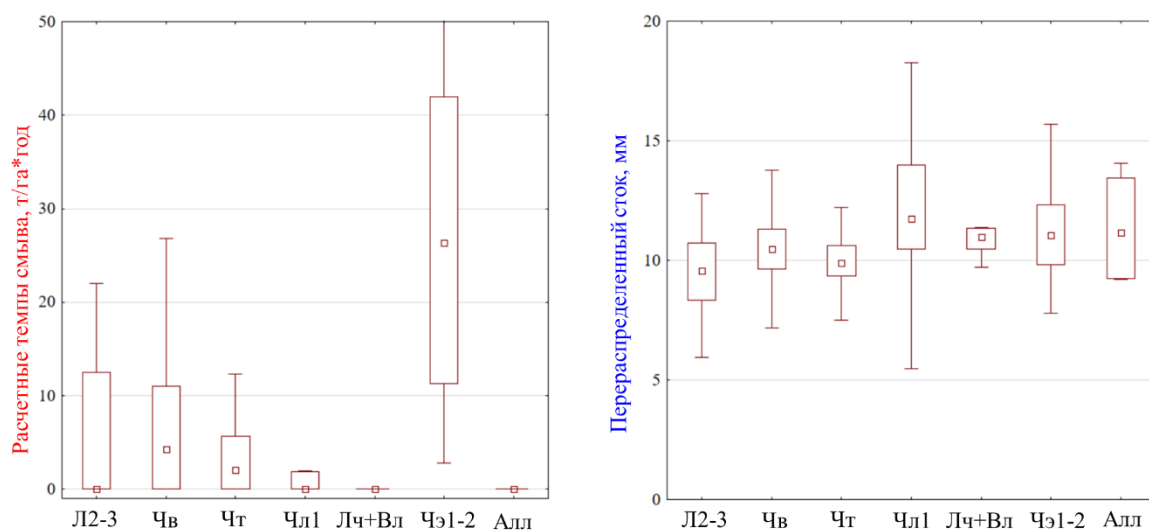


Рис. 4.3.2. Средние значения и дисперсия расчетных темпов смыва (слева) и перераспределенного слоя осадков (справа) для почв Бугульминско-Белебеевской возвышенности. Индексы: Л2-3 серые и темно-серые лесные песчаные, Чв – чернозем выщелоченный, Чт – чернозем типичный, Чл1 – луговато-черноземная, Чэ1 – черноземы слабосмытые, Лч – черноземно-луговые, Вл – влажно-луговые, Чэ1-2 – черноземы слабо- и среднесмытые, Алл – аллювиальные

Предсказанные моделью межкомпонентных отношений таксоны почв были сгруппированы в почвенные комбинации, а затем в типы местности по принципу функциональной и генетической близости.

Итоговая карта групп почв (рис. 4.3.3) с приемлемой точностью раскрывает основные особенности строения и разнообразия почвенного покрова изучаемой территории, где преобладающими видами почв являются комбинации черноземов типичных и выщелоченных. В широких слабоогнутых ложбинах и балках сформировались полугидроморфные и гидроморфные почвы возрастающего ряда увлажнения. Верхние части ложбин заняты луговато-черноземными выщелоченными почвами. Средние и нижние части ложбин и шлейфы склонов со значительным дополнительным увлажнением заняты лугово-черноземными и луговыми почвами. Недостатком представленной модели является низкое качество предсказания ареалов гидроморфных, в том числе, пойменных почв, которые в значительной степени перекрываются в признаковом пространстве использованных переменных.

Также на карте видны региональные особенности почвенного покрова. В частности, четко обособилось положение серых и тёмно-серых лесных почв в наиболее выпуклых частях гряд и увалов Прибельской возвышенности. Эти почвы сформированы на лёгких породах: супесях и песках и имеют очень тонкий или почти отсутствующий покров лессовидных суглинков.

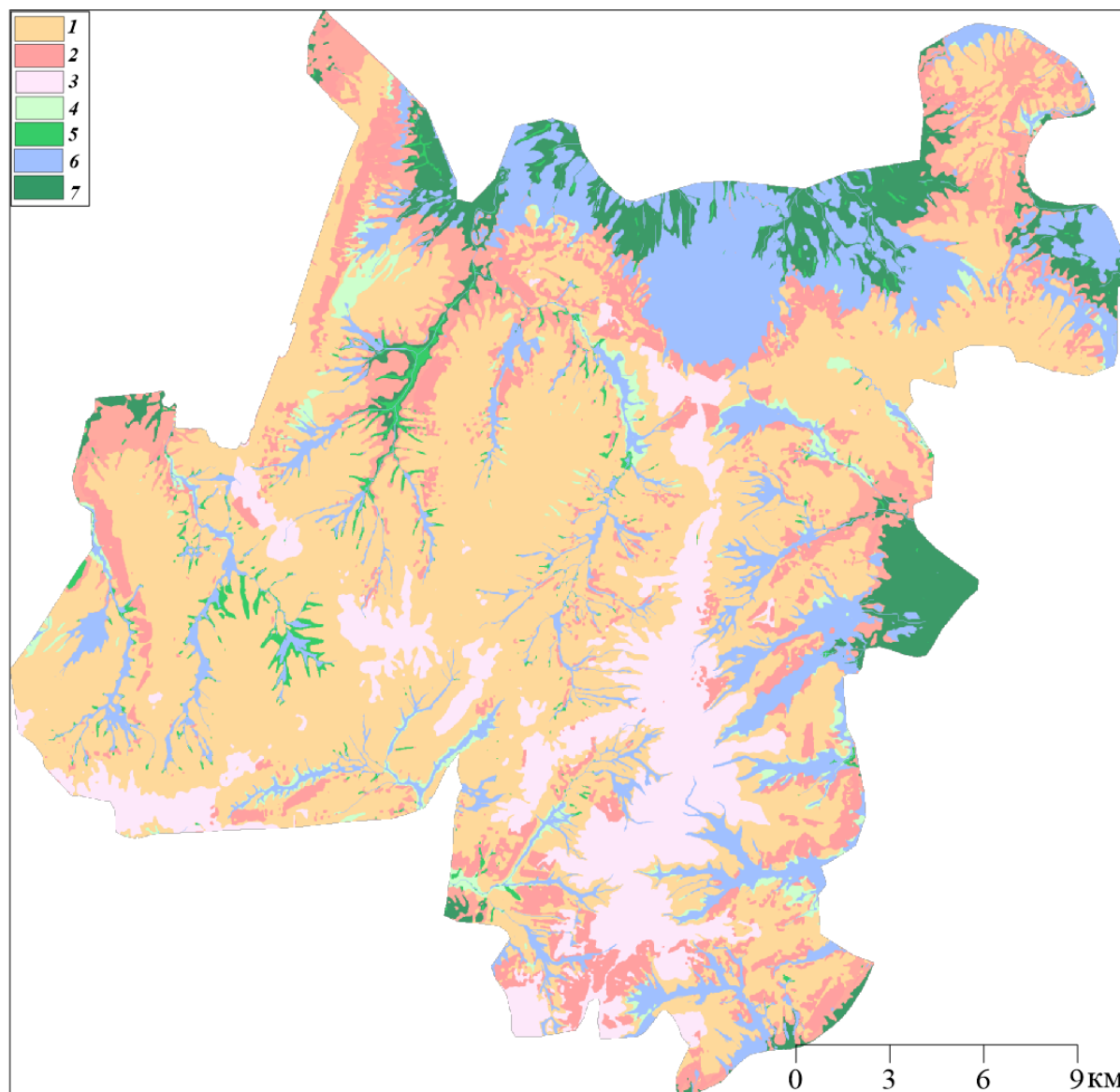


Рис. 4.3.3. Группы почв ключевого участка Бугуľминско-Белебеевской провинции. Цифрами обозначены: 1 – чернозем типичный и выщелоченный суглинистый (Чт+Чв); 2 – черноземы слабо- и среднесмытые; 3 – серые и темно-серые лесные песчаные и супесчаные (Л2+Л3); 4 – луговато-черноземные выщелоченные и оподзоленные (Чл1в+Чл1оп); 5 – лугово-черноземные и черноземно-луговые (Чл2); 6 – гидроморфные: лугово-черноземные, черноземно-луговые и овражно-балочные почвы (без разделения) (Лч+ВЛ); 7 – аллювиальные (без разделения) (Ал)

Эродированные почвы, их распространение и ареалы также характеризуются региональными специфическими особенностями. Принято считать, что эрозионные СПП имеют «древовидный» рисунок ареалов (Фридланд, 1972). Применение аналогичной, использованной в данной работе методики картографирования эродированных почв в

Курской и Белгородской областях свидетельствовало о наличии такого «древовидного» рисунка эрозионных СПП в пределах Среднерусской возвышенности (Жидкин и др., 2021; Козлов, Жидкин, Лозбенев, 2019). Однако на исследуемой территории классическая «древовидная» структура эрозионных СПП не проявляется, что, вероятно, связано со своеобразием (пересеченностью) рельефа.

Составленная путем объединения генетически и функционально близких контуров групп почв карта *типов местностей* участка (рис. 4.4.3), в целом, отвечает представлениям о ландшафтной структуре территории, за исключением подчиненных элементов ландшафта, для которых заметна нехарактерная пятнистость.

Самую большую долю от общей площади участка (49%) занимает плакорный тип местности (плакорная агроэкологическая группа земель). Он приурочен к основным поверхностям междуречий и склонам холмов. Почвенный покров представлен пятнистостями черноземов выщелоченных и типичных, сформированных на покровных суглинках. Данный тип местности обладает самым высоким потенциалом плодородия, в связи с чем почти половина его используется в интенсивном земледелии.

Редкие выположенные междуречья с западинами, водосборные понижения и выположенные верховья балок отнесены к междуречному замедленно-дренируемому и междуречному недренируемому типам местности. Данные названия не вполне подходят к описываемым элементам рельефа, но по набору элементов в структуре почвенного покрова соответствуют классическим представлениям. Данные типы местности отнесены, соответственно, к слабо- и сильногидроморфным группам земель с невысокой агроэкологической ценностью.

Следствием активного современного и исторического освоения в условиях расчлененного рельефа стало широкое распространение эрозионных процессов и формирование не сплошного, но значительного по площади склонового типа местности, приуроченного к пологим и покатым участкам склонов с участием слабо- и среднесмытых почв в структуре почвенного покрова.

Водораздельно-холмистый тип местности занимает наивысшие позиции рельефа – холмы Прибельской возвышенности, сложенные песчаными отложениями, перекрытыми тонким чехлом покровных суглинков. Почвенный покров в них представлен неконтрастными сочетаниями серых и темно-серых лесных почв.

Пойменный тип местности занимает самые низкие позиции в рельефе и приурочен к поймам реки Белая и её правых притоков. Более высокие позиции относительно пойменного занимает надпойменно-террасовый тип местности. К нему отнесены нижние,

самые влажные и при этом сложенные более лёгкими отложениями, части склонов, а также самые высокие части пойм – останцы.

К сожалению, составленная дискриминантная модель не позволила достаточно четко обособить почвы крупных балок. В условиях, когда таксономически одинаковые почвы формируются в принципиально разных условиях рельефа, лучше применять более сложные методы, требующие, однако, и больших выборок. На рисунке 4.3.4. представлена линия профиля, на котором раскрываются особенности ландшафтной структуры ключевого участка (рис. 4.3.5).

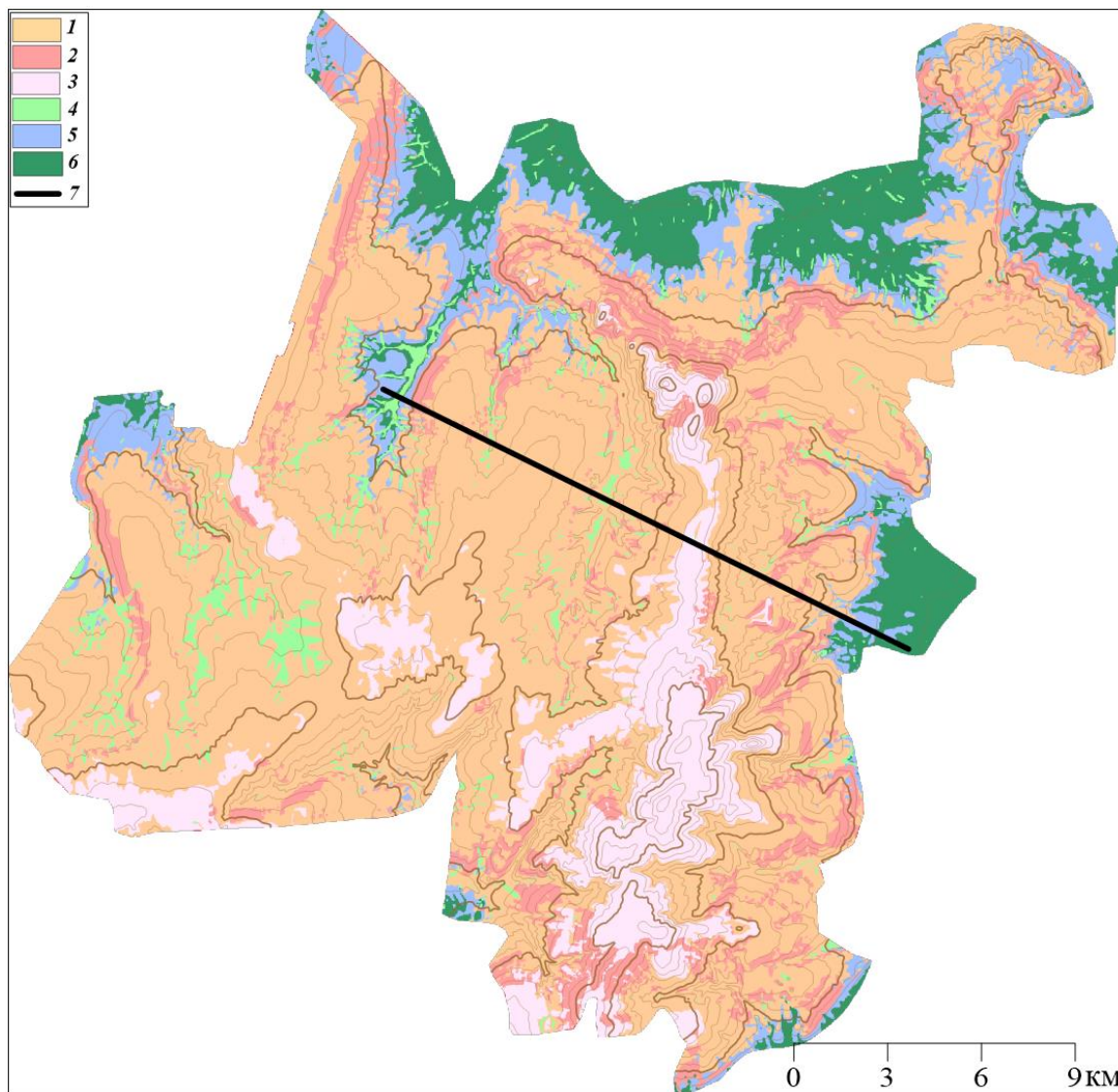


Рис. 4.3.4. Литолого-геоморфологические варианты типов местностей ключевого участка на Бугульминско-Белебеевской возвышенности. Цифрами на карте обозначены: 1 – плакорный, 2 – склоновый, 3 – останцово-водораздельный, 4 - междуречный замедленно-дренируемый, 5 – междуречный недренируемый, 6 – пойменный, 7 – линия профиля.

Таблица 4.3.3. Агроэкологическая оценка типов местностей ключевого участка на Бугульминско-Белебеевской возвышенности

Типы местности	Агроэкологические группы земель	Технология возделывания	Урожайность основных культур в годы с разной влагообеспеченность			Агроэкологические факторы		
			Климатическая норма	Ниже нормы (засуха)	Выше нормы (переувлажнение)	Рельеф	Породы	Почвы
Плакорный	Плакорная	Интенсивная влагосберегающая	Высокая	Средняя, возможна почвенная засуха	Высокая	междуречные равнины (1-2°)	Лессовидные суглинки и глины ()	Черноземы выщелоченные и типичные
Междуречный замедленно-дренируемый	Полугидроморфная	Интенсивная	Высокая, особенно в вогнутых элементах рельефа	Выше средней	Средняя	междуречные равнины с западинами до 10% площади		Луговато-черноземные и почвы западин
Междуречный недренируемый	Слабо-переувлажненная	Нормальная	Высокая, возможно вымокание культур в западинах	Высокая	Средняя, вымокание культур в западинах	междуречные равнины с западинами (10-25%)		Лугово-черноземные, черноземно-луговые и др.
Останцово-водораздельный	Литогенная	Экстенсивная	Средняя	Низкая, повсеместная почвенная засуха	Высокая	Надпойменные террасы рек	Водноледниковые пески или супеси	Серые и темно-серые лесные песчаные

Пойменный	Пойменная	Интенсивная/экстенсивная/не пригодна (в зависимости от уровня поймы)	Высокая	Очень высокая	Средняя, возможно повсеместное вымокание культур	Поймы рек	Аллювиальные слоистые суглинки и супеси	Пойменные луговые и карбонатные почвы
Склоновый	Слабозрозионная	Интенсивная почвозащитная влагосберегающая	Средняя	Низкая, возможна почвенная засуха	Высокая, есть риск усиления эрозии	Пологие и покатые склоны оврагов, балок и рек	Делювиальные суглинки и глины на дочетвертичных коренных карбонатных породах	Слабо- и среднесмытые черноземы

Для получения представления о типичной ландшафтной структуре ключевого участка был построен профиль, отражающий некоторые значимые особенности территории с точки зрения структурно-функциональной организации ландшафта. (рис. 4.3.4). Самые высокие позиции рельефа занимает останцово-водораздельный тип местности, для которого не характерно протекание эрозионных процессов в связи с почти полной залесенностью и с небольшим дополнительным притоком влаги относительно. Для плакорного типа местности из-за расположения, в том числе в верхних частях придолинных склонов, характерны небольшие интенсивности смыва, порядка 10 т/га*год, связанные с антропогенным воздействием - механической эрозией - и наличием слабопроявляющейся эрозионной сети. Средние и нижние части придолинных склонов, относительно короткие, занимает склоновый тип местности с очень высокими средними темпами смыва – до 20 т/га*год с преобладанием слабосмытых почв. Днища крупных балок занимает самый гидроморфный тип местности – междуречный недренируемый и междуречный замедленно-дренируемый варианты ТМ с высокими значениями натежного увлажнения. Самые низкие позиции рельефа занимает пойменный тип местности с низкими темпами смыва почв в связи с преобладанием аккумулятивных процессов.

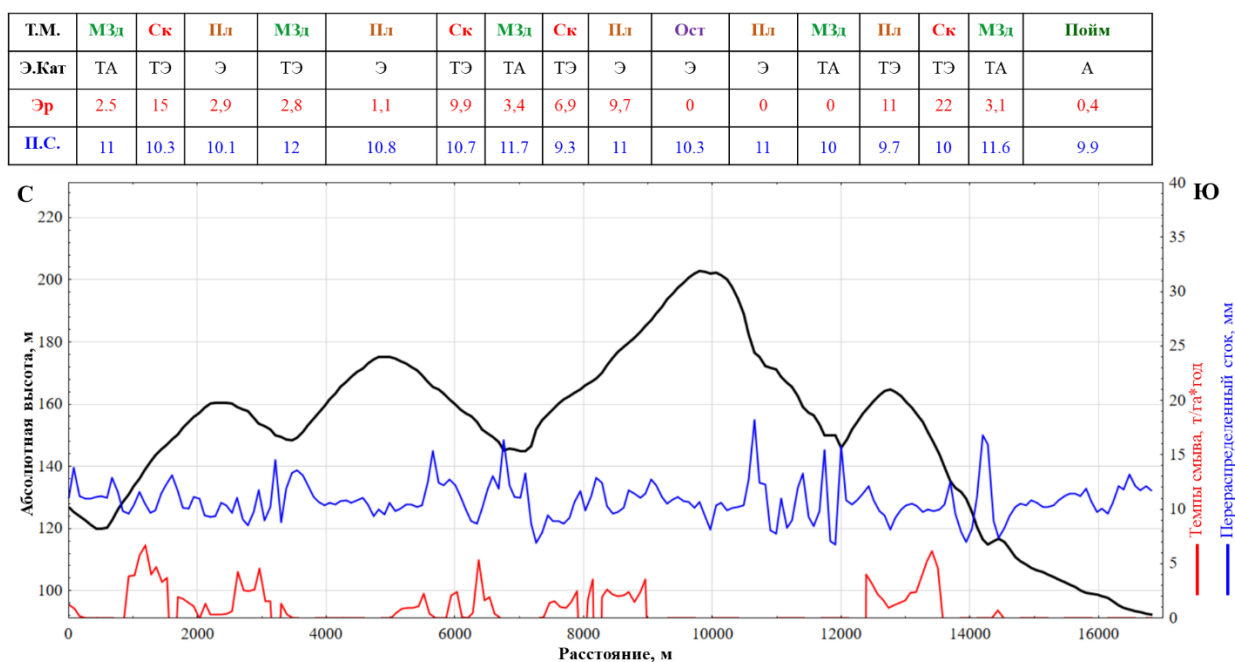


Рис. 4.3.5. Типичный профиль, пересекающий доминантные типы местности Среднерусской возвышенности с параметрами их функционирования. Над рисунком обозначены: Т.М. – типы местности, Э.Кат – элементы катены, Эр – темпы смыва, т/га*год, П.С. – перераспределенный сток, мм. Типы местности обозначены индексами: Ост – останцово-водораздельный, Пл- плакорный, МЗд – междуречный замедленно-дренируемый, Ск – склоновый, Пойм – пойменный.

Также было проведено сравнение типов местности между собой по средним темпам смыва почв и перераспределения влаги (рис. 4.3.6). Плакорный тип формируется при

незначительных величинах темпов смыва почв (среднее значение около 0 т/га*год) и низких значениях перераспределенного стока за счет положения в слабонаклонных позициях рельефа без явного преобладания эрозии или оттока влаги. Для останцово-литогенного варианта типа местности характерны нулевые значения смыва из-за отсутствия полей и самые низкие значения перераспределенного стока из-за отсутствия эрозионной собирающей сети и преобладания внутрипочвенной фильтрации над оттоком влаги. Междуречный замедленно дренируемый тип местности характеризуется повышенными значениями перераспределенного стока за счет положения на выположенных междуречьях с аккумулирующими влагу западинами. Значения темпов смыва около 0 т/га*год. Междуречный недренируемый тип местности, приуроченный к крупным ложбинам, характеризуется нулевыми значениями смыва и высокими значениями перераспределенного стока. Для склонового типа местности характерна очень высокая вариабельность темпов смыва при средних значениях около 20 т/га*год, что более чем в 2 раза превосходит средние значения плакорного типа местности. При этом встречаются как экстремальные значения темпов смыва, так и значительные по объемам зоны аккумуляции, приуроченные к ложбинам в пределах склонового типа местности. Значения перераспределенного стока при этом находятся на уровне плакорного типа, поскольку в нем сочетаются как выпуклые склоны, так и собирающие влагу ложбины.

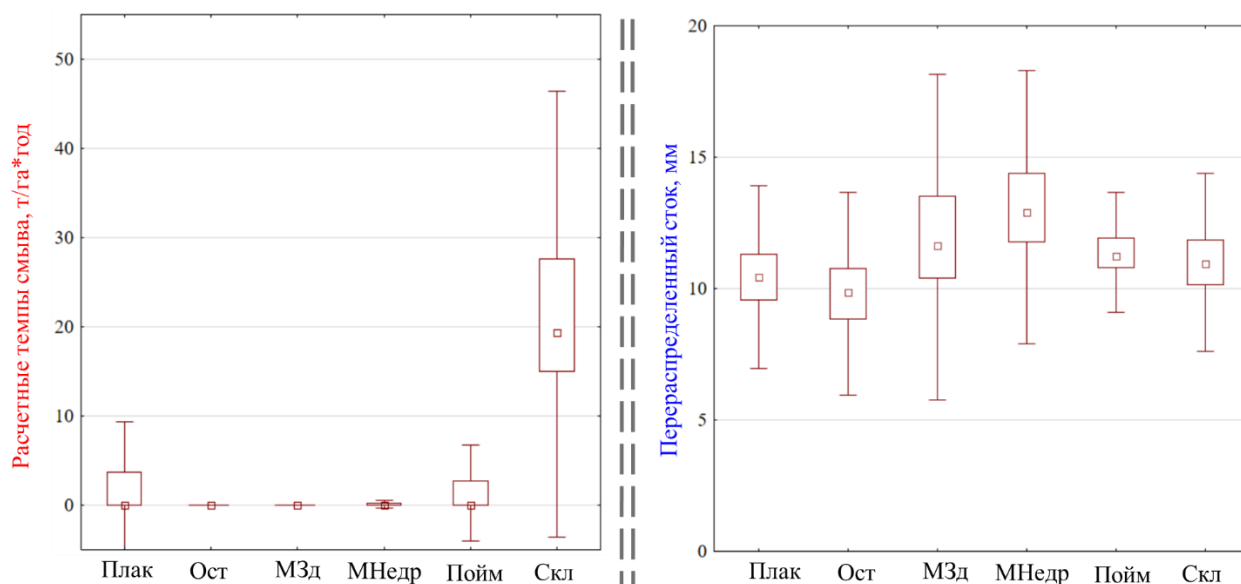


Рис. 4.3.6. Средние значения и дисперсия значений расчетных темпов смыва (слева) и перераспределенного слоя осадков (справа) для типов местностей ключевого участка на Среднерусской возвышенности. Индексами обозначены типы местности: Плак – плакорный, МЗД – междуречный замедленно-дренируемый, МНедр – междуречный недренируемый, Лит – литогенный, Пойм – пойменный, Скл - склоновый

В целом, ландшафтная структура этого участка значительно отличается от трёх других по характеру морфоскульптуры (размерам, форме и генезису основных крупных

форм мезорельефа), по составу отложений, интенсивности и направленности миграционных процессов. Самые высокие позиции хорошо дренированы, сложены лёгкими по составу отложениями и характеризуются преобладанием внутрипочвенного стока. Аналогично со Среднерусской возвышенностью здесь преобладает плакорный тип местности, а субдоминантное положение занимает склоновый, с выраженными процессами поверхностного стока и миграции твердофазного вещества почв. Однако характер ландшафтного рисунка в некоторой степени отличается, особенно по характеру палеоэрозионного рельефа, который не имеет четко выраженного древовидного рисунка, как на возвышенностях в западной части Восточно-Европейской равнины, что определяет специфичную направленность перераспределения влаги.

5. ПРОВИНЦИАЛЬНЫЕ РАЗЛИЧИЯ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ЛЕСОСТЕПИ ВОСТОЧНО- ЕВРОПЕЙСКОЙ РАВНИНЫ

Изученные регионы значительно различаются между собой по показателям структуры и функционирования, что связано с особенностями морфоскульптуры рельефа и геологической истории регионов и нашло отражение в формировании специфического для каждого участка проявления процессов ландшафтной дифференциации.

Сопоставление морфологических структур ключевых участков (рис. 5.1) показывает их значительные различия как по составу компонентов, так и по долевого участию каждого из них в морфологической структуре ландшафтов.

В пределах возвышенных Среднерусской и Бугульминско-Белебеевской провинции плакорный тип местности с фоновыми региональными условиями занимает 32 и 51% площади, соответственно. Он состоит из урочищ, основных поверхностей междуречья с комплексами черноземов разных подтипов и луговато-черноземных почв по ложбинам, преимущественно распаханых. Для обеих провинций также характерно значительное участие склонового типа местности – 38% и 15%, соответственно. Он приурочен к придолинным и прибалочным склонам с участием смытых вариантов зональных почв в почвенном покрове. Можно отметить, что эрозионная сеть Бугульминско-Белебеевской провинции имеет довольно нехарактерную линейную форму, непохожую на классическую древовидную, а ареалы смытых почв не образуют сплошных поясов эрозии, как на Среднерусской возвышенности. Эти земли, преимущественно, распаханы. Плакорный и эрозионный ТМ низменной Окско-Донской провинции занимают небольшие площади – 15% и 2%, соответственно. Здесь преобладают литолого-геоморфологические варианты междуречного недренируемого типа местности: междуречный замедленно-дренируемый, собственно междуречный недренируемый и плоскоместный озерно-болотный. Суммарно

они занимают 82% территории. Это связано с характером рельефа – широкими (более 20 км) и плоскими междуречьями с обилием замкнутых западин, отток влаги с которых местами невозможен. Междуречный замедленно-дренируемый вариант ТМ встречается и в возвышенных провинциях, он приурочен к узким междуречьям с единичными западинами, верховьям ложбинной сети и другим пониженным элементам мезорельефа с полугидроморфными почвами. Он занимает 18% участка в Среднерусской провинции и 6% в Бугульминско-Белебеевской. Для последней также характерен останцово-водораздельный ТМ, приуроченный к выходам легких пород на вершинах холмов.

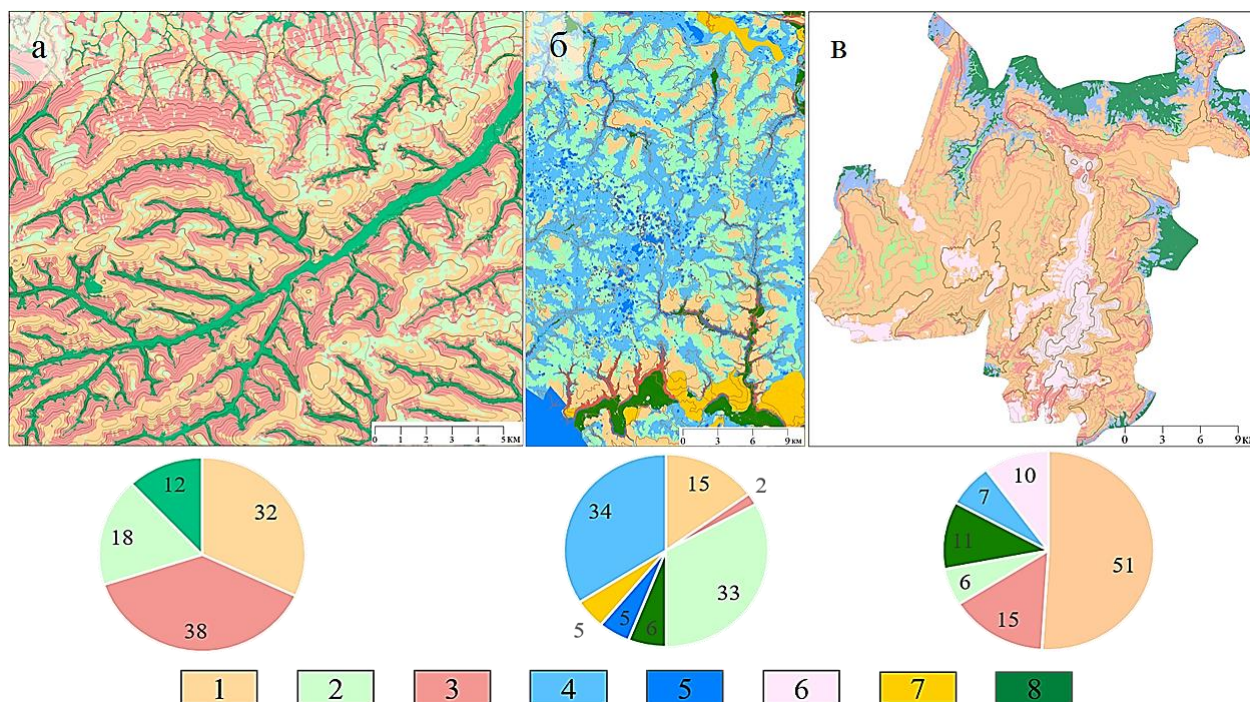


Рис. 5.1. Литолого-геоморфологические варианты типов местностей ключевых участков: а – Среднерусская возвышенность, б – Окско-Донская низменность, в – Бугульминско-Белебеевская возвышенность и доля типов местностей в ландшафтах регионов (%). Цифрами обозначены: 1 – плакорный, 2 – междуречный замедленно-дренируемый, 3 – склоновый, 4 – междуречный недренируемый, 5 – плоскоместный озерно-болотный, 6 – останцово-водораздельный, 7 – надпойменно-террасовый, 8 – пойменный

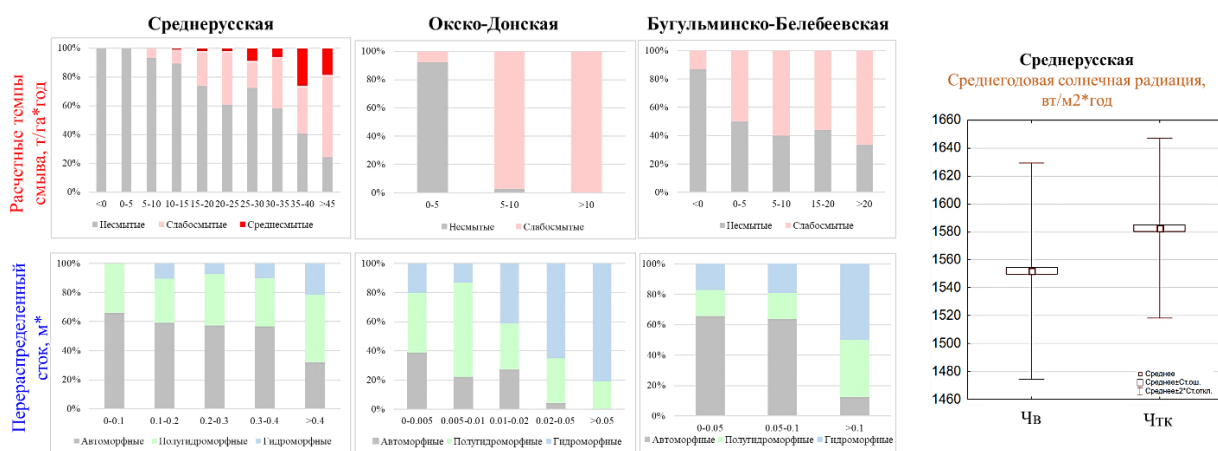
Почвенный покров как основной диагностический показатель морфологической структуры также в значительной степени различен. Будучи расположенными в одной подзоне, на Среднерусской возвышенности и в Предуралье преобладают почвы черноземного ряда, а в структуре почвенного покрова преобладают зональные и эрозионные почвенные комбинации. При этом для Окско-Донской низменности из-за более тяжелого гранулометрического состава, меньшего расчленения и наличия почвенно-грунтовых вод характерны полугидроморфные и гидроморфные аналоги черноземов. Состав почвенных комбинаций по типам местностей изучаемых регионов приведен в таблице 5.1.

Таблица 5.1. Состав почвенных комбинаций по типам местностей физико-географических провинций

Литолого-геоморфологические варианты ТМ	Среднерусская	Окско-Донская	Бугульминско-Белебеевская
Плакорный	Пятнистости черноземов типичных (Чт) и выщелоченных (Чв)	Комплексы и пятнистости черноземов типичных (Чт), выщелоченных (Чв) и луговато-черноземных почв (Чл1)	Комплексы и пятнистости черноземов выщелоченных (Чв), типичных (Чт), оподзоленных (Чоп) и луговато-черноземных почв (Чл1)
Междуречный замедленно-дренируемый	Комплексы черноземов типичных (Чт), выщелоченных (Чв) и луговато-черноземных почв (Чл1)	Комплексы луговато-черноземных (Чл1) и лугово-черноземных почв (Чл2)	Комплексы луговато-черноземных (Чл1) и лугово-черноземных почв (Чл2)
Междуречный недренируемый	-	Комплексы лугово-черноземных (Чл2), черноземно-луговых (Лч) и влажно-луговых почв (Вл)	Комплексы лугово-черноземных (Чл2), черноземно-луговых (Лч) и влажно-луговых почв (Вл)
Плоскоместный озерно-болотный	-	Комплексы влажно-луговых (Вл), серых лесных поверхностно-глебово-элювиальных почв (Л2ПГЭ), солодей (Сд)	-
Надпойменно-террасовый	-	Комплексы серых и темно-серых лесных почв (Л2, Л3)	-
Останцово-водораздельный	-	-	Комплексы серых и темно-серых лесных почв (Л2, Л3)
Склоновый	Сочетания, комплексы и ташеты черноземов слабо- и среднесмытых, луговато-черноземных смыто-намытых почв	Комплексы и ташеты черноземов типичных и луговато-черноземных слабосмытых	Сочетания, комплексы и ташеты черноземов слабо- и среднесмытых, луговато-черноземных смыто-намытых почв
Пойменный	Комплексы аллювиальных почв	Комплексы аллювиальных почв	Комплексы аллювиальных почв

Сопоставляя процессные характеристики для групп почв изучаемых провинций можно отметить значимые различия, обусловленные соотношением поверхностного и внутрипочвенного стока (рис. 5.2). Преобладание гидроморфных почв в структуре почвенного покрова на Среднерусской возвышенности начинается при очень высоком пороговом значении перераспределенного стока 100 мм, что обусловлено доминированием поверхностного стока над внутрипочвенным. Качественные изменения в структуре почвенного покрова распаханых склонов начинаются со значений темпов смыва почв 10-15 т/га*год. При среднегодовых темпах 35 т/га*год доля смытых почв превышает 50%. Различия средних значений инсоляции для Чв на склонах северной экспозиции и Чтк на склонах южной экспозиции составляют более 25 Вт/м²*год.

Для Окско-Донской низменности основную роль имеет преобладание внутрипочвенного стока и слабый дренаж, из-за чего полугидроморфные и гидроморфные почвы начинают преобладать при натежном увлажнении 5-10 мм. На Бугульминско-Белебеевской возвышенности полугидроморфные и гидроморфные почвы начинают доминировать только в элементах рельефа со значительным дополнительным увлажнением – более 10 мм. Качественные изменения в структуре почвенного покрова распаханых склонов начинаются с порогового значения расчетных темпов смыва почв 10 т/га*год.



Различия в факторах дифференциации двух возвышенностей, индицируемые в структуре почвенного покрова и диагностических показателях процессов функционирования по типам местности представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2. Сравнение степени выраженности, факторов ландшафтной дифференциации, факторов-индикаторов моделей и характера миграционных процессов для некоторых литолого-геоморфологических типов местности изученных провинций

Литолого-геоморфологический вариант типа местности/провинция	Среднерусская	Окско-Донская	Бугульминско-Белебеевская
Междуречный недренируемый	_*	++ Широкие плоские западинные междуречья, тяжелый гранулометрический состав почв, близкий уровень грунтовых вод Ведущие факторы-индикаторы – перераспределенный сток, превышения над базисом эрозии Доля в структуре ландшафта – 34%	-
Междуречный замедленно-дренируемый	+ Узкие субгоризонтальные западинные междуречья и другие выположенные элементы рельефа. Ведущие факторы-индикаторы – перераспределенный сток, индекс относительных превышений. Доля в структуре ландшафта – 18%	++ Краевые субгоризонтальные части западинных междуречий, тяжелый гранулометрический состав. Доля в структуре ландшафта – 33%	-
Плакорный	+ Слабонаклонные междуречья, среднесуглинистый гранулометрический состав.	+ Склоны междуречий, подстилаемые лёгкими породами.	++ Пологие склоны холмов, подстиление лёгкими породами. Ведущий фактор-индикатор – индекс положения на склоне.

	Ведущий фактор – индикатор – форма поверхности (выпуклость), фиксируемая индексом относительных превышений. Доля в структуре ландшафта – 32%	Ведущий фактор – индикатор – форма поверхности, крутизна, превышение над водотоком. Доля в структуре ландшафта – 15%	Доля в структуре ландшафта – 51%
Склоновый	++ Длинные пологие и покатые склоны Ведущие факторы-индикаторы – крутизна, топографический индекс влажности, расчетные темпы смыва. Доля в структуре ландшафта – 38%	+- Короткие пологие склоны Ведущий фактор-индикатор – крутизна. Доля в структуре ландшафта – около 2%	+ Длинные хорошо выраженные пологие и покатые склоны Ведущие факторы-индикаторы – крутизна, топографический индекс влажности, расчетные темпы смыва. Доля в структуре ландшафта – 15%

*Выраженность типа местности в ландшафтной структуре:

- Отсутствует;

+ Присутствует;

++Присутствует, занимает большую площадь.

Темпы смыва для выборки склонового типа местности (рис. 5.3) показывают некоторые различия в распределении значений показателя для изучаемых провинций как по форме графиков, так и по абсолютным значениям. Самые низкие темпы смыва, до 20 т/га*год, соответствуют склоновому ТМ Окско-Донской провинции. Это обусловлено небольшими перепадами высот и длинами склонов, которые не способствуют интенсификации склоновых процессов. Некоторый интерес представляет вытянутый вдоль оси X график для Среднерусской провинции. В условиях расчлененного рельефа с обилием длинных пологих и покатых склонов формируются мощные потоки с большой эродирующей способностью. Здесь встречаются расчетные темпы смыва более 100 т/га*год. При этом медианное значение для выборки самое высокое из трёх провинций – порядка 18 т/га*год. График распределения темпов смыва для Бугульминско-Белебеевской возвышенности отличается от двух предыдущих. На нём заметен резкий пик, что связано с наличием некоторого наиболее типичного для региона показателя интенсивности эрозионных процессов в районе 16 т/га*год. При этом значительно меньшую площадь по сравнению с предыдущим занимают ареалы с показателями более 50 т/га*год, что обусловлено региональными особенностями землепользования – фрагментарным использованием в пашенном земледелии покатых эродируемых склонов с высокой энергией проходящих по ним водных потоков. Для покрытых лесом элементов рельефа темпы смыва были приняты равными нулю. Некоторые вопросы оставляет малая доля небольших темпов смыва и аккумуляции, что может быть связано, в большей степени, с региональными особенностями параметризации моделей.

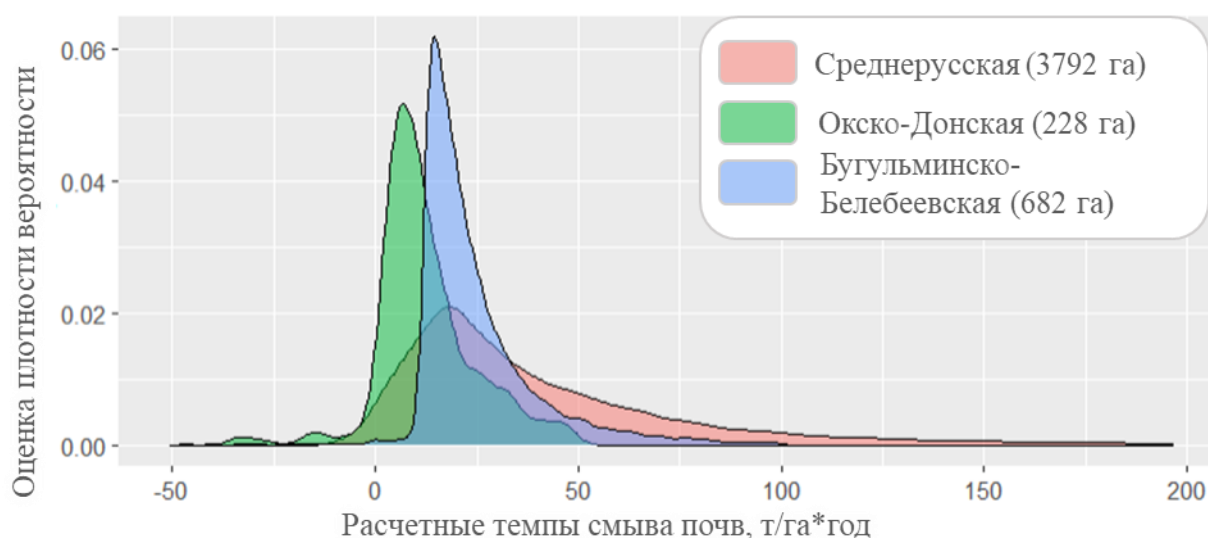


Рис. 5.3. Графики плотности распределения расчетных темпов смыва (т/га*год) для выборки почв склонового типа местности изучаемых провинций

Перераспределенный сток для выборки гидроморфных почв и почв междуречного недренируемого типа местности (рис. 5.4) также показывает различия в распределении

значений показателя для изучаемых провинций. Отмечая некоторые проблемы с параметризацией водно-миграционной модели, тем не менее можно оценить различия в характере перераспределения влаги по элементам микро- и мезорельефа в пределах плоскоместного озерно-болотного, междуречного недренируемого и междуречного замедленно-дренируемого литолого-геоморфологических вариантов типов местностей. Резкий пик в районе небольших значений для Окско-Донской низменности показывает как преобладание внутрипочвенного стока над поверхностным, так и характер перераспределения влаги на коротких склонах замкнутых понижений, в пределах которых не формируются мощные потоки. В разы более высокие значения перераспределенного стока характерны для возвышенных Среднерусской и Бугульминско-Белебеевской провинций. Это связано с преобладанием поверхностного стока над внутрипочвенным в условиях расчлененного рельефа. Вторая особенность – принцип выделения междуречного недренируемого ТМ. Если для низменной провинции – это собственно плоские междуречья, то на возвышенностях в них входят широкие днища балочной сети, дренирующей междуречья, с гидроморфными почвами. По этим формам происходит отток влаги с междуречий и склонов и, соответственно, рассчитываются высокие значения перераспределенного стока.

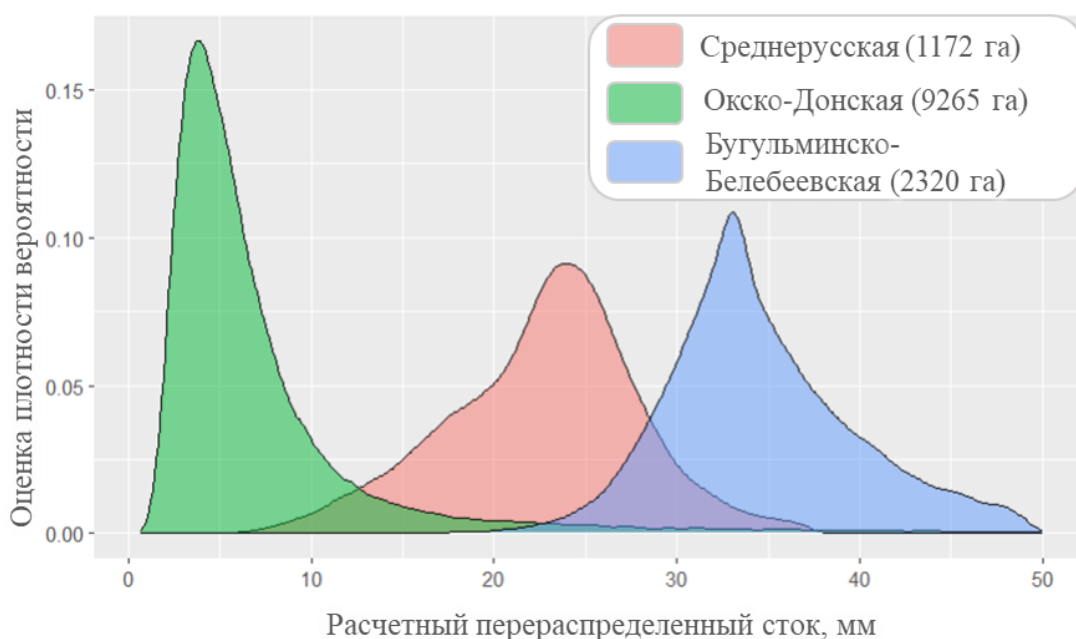


Рис. 5.4. Графики плотности распределения расчетного перераспределенного стока (мм) для выборки гидроморфных почв и почв междуречного недренируемого типа местности изучаемых провинций

Похожие условия формирования типов местностей с процессной точки зрения эрозионных и водно-миграционных процессов характерно для Бугульминско-Белебеевской возвышенности. Эрозионные процессы на сельскохозяйственных землях определяют формирование примерно на 15% территории склонового типа местности, однако они не

образуют сплошных поясов как на Среднерусской возвышенности. А водно-миграционные процессы, сходно со Среднерусской провинцией, определяют формирование междуречного замедленно-дренируемого и междуречного недренируемого типов местности на междуречьях и в балках с почвами возрастающего гидроморфизма. Однако вместе они занимают лишь около 15% территории.

Окско-Донская низменность значительно отличается по соотношению процессов дифференциации типов местности. Роль эрозионных процессов практически сnivelирована плоским рельефом, абсолютные значения темпов смыва невелики. При этом доминирующее значение имеют процессы перераспределения выпадающих осадков на плоских междуречьях. По мере приближения к верхним частям междуречий и увеличения доли западин в ландшафте повышается среднее значение перераспределенного стока. Самые высокие значения, более чем в 2 раза превышающие плакорный тип местности, характерны для плоскоместного озерно-болотного типа местности. В целом, гидроморфные варианты плакорного типа местности: междуречный замедленно-дренируемый и междуречный недренируемый занимают почти 70% территории, что значительно отличает эту провинцию от двух возвышенных.

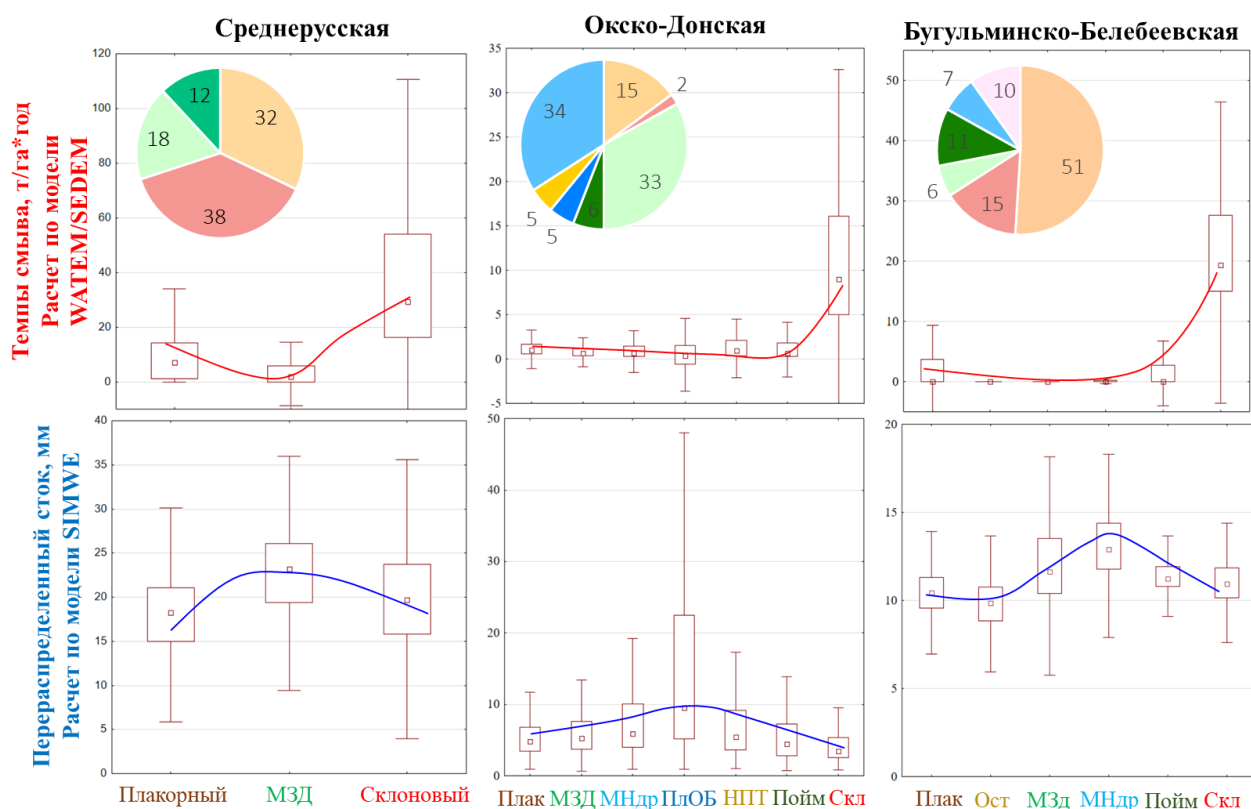


Рис. 5.5. Функциональные показатели типов местностей лесостепи Русской равнины.

Индексами обозначены: Плак – плакорный, МЗД – междуречный замедленно-дренируемый, МНдр – междуречный недренируемый, ПлОБ – плоскоместный озерно-болотный, НПТ – надпойменно-террасовый, Ост – останцово-водораздельный, Пойм – пойменный, Скл – склоновый

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволяет сделать следующие **выводы**.

1. Региональные особенности структурно-функциональной организации почвенного покрова отражены в переменных и коэффициентах численных моделей межкомпонентных связей, соединяющих диагностические показатели мобильных компонентов ландшафта с факторами и процессами их дифференциации и выражаются в составе и площади типизированных почвенных комбинаций морфологических единиц локального уровня.

2. Диагностическими показателями элементарных геосистем лесостепи выступают строение их почвенного профиля (мощность гумусового горизонта, глубина вторичных карбонатов и признаков гидроморфизма) как отражение среднемноголетних режимов функционирования (водного режима, соотношения эрозионно-аккумулятивных процессов). Их внутриландшафтная дифференциация описывается расчетными значениями среднего годового слоя перераспределенных осадков, интенсивности смыва почв и количеством приходящей солнечной радиации, трансформированных топографическими и литологическими факторами.

3. Набор доминантных почв одинаков для трёх физико-географических провинций. Они образуют ряды возрастающего увлажнения (чернозем типичный – чернозем выщелоченный – луговато-черноземная почва – лугово-черноземная почва) и интенсивности эрозионных процессов (намытые почвы – не смытые – слабосмытые – среднесмытые) элементарных геосистем лесостепи. При этом переменные и коэффициенты численных моделей структурно-функциональной организации различаются для ландшафтов каждой из провинций.

4. Гидроморфизм почв Среднерусской возвышенности начинается при пороговом значении перераспределенного стока 100 мм. Качественные изменения в структуре почвенного покрова распаханых склонов начинаются со значений эрозии 10-15 т/га*год. При среднегодовой эрозии 35 т/га*год доля смытых почв превышает 50%. Различия средних значений инсоляции для черноземов выщелоченных на склонах северной экспозиции и черноземов типичных карбонатных на склонах южной экспозиции составляют более 25 Вт/м²*год. Полугидроморфные и гидроморфные аналоги черноземных почв Окско-Донской низменности начинают преобладать при значениях всего 5-10 мм перераспределенного слоя осадков, а на Бугульминско-Белебеевской возвышенности – с порогового значения в 10 мм. Качественные изменения в структуре почвенного покрова распаханых склонов последней провинции начинаются с порогового значения водной эрозии 10 т/га*год, когда доля смытых почв достигает 50%.

5. Морфоструктурные различия рельефа лесостепной зоны определяют структурно-функциональную организацию ландшафтов возвышенных и низменных провинций и выражаются в соотношении поверхностного и внутрипочвенного стока. Преобладание внутрипочвенного стока на Окско-Донской низменности определяет доминирование междуречного недренируемого типа местности (около 65% площади) и локальные проявления эрозионных процессов.

6. Для возвышенных Среднерусской и Бугульминско-Белебеевской провинций, наоборот, характерно преобладание поверхностного стока и высокие темпы эрозионных процессов, что проявляется в доминировании (суммарно, до 70% площади) плакорного и склонового типов местностей. Формирование гидроморфных элементов морфологической структуры обусловлено натежным увлажнением более 10 мм слоя осадков, что в 2-4 раза превосходит значения аналогичных элементов Окско-Донской низменности. Самые высокие темпы смыва характерны для почв пашни склонового типа местности Среднерусской провинции, причем они более, чем в 1,5 раза превосходят Бугульминско-Белебеевскую провинцию и в разы – низменную Окско-Донскую провинцию.

7. Полученные результаты картографического отображения структурно-функциональной организации позволили локализовать морфологические единицы ландшафта с наивысшим риском деградации от эрозии в возвышенных лесостепных провинциях (до 70% участков) и переувлажнения в низменных (до 65% территории), оценить их устойчивость к деградиационным процессам для рационального использования на ландшафтной основе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамова Л.А. Особенности развития западных ландшафтов на междуречных недренированных водоразделах Тамбовской области // Вестник ТГУ. — Т. 21, Вып. 5. — 2016. — С. 1859–1862.
2. Алифанов В.М., Гугалинская Л.А., Овчинников А.Ю. Палеокриогенез и разнообразие почв центра Восточно-Европейской равнины. – М.:ГЕОС. – 2010. – 160 с.
3. Арманд Д.Л. Наука о ландшафте: (основы теории и логико-математические методы). – М.: Мысль. - 1975. – 287 с.
4. Афанасьева Е.А. Черноземы Средне-русской возвышенности. — М.: Наука, 1966. —227 с.
5. Ахтырцев А.Б., Адерихин П.Г., Ахтырцев Б.П. Лугово-черноземные почвы центральных областей Русской равнины. — Воронеж: Издательство Воронежского гос. ун-та, 1981. — 174 с.

6. Ахтырцев Б. П. Структура почвенного покрова черноземных областей Центральночерноземной России // Почвенный покров ЦЧО и его рациональное использование. Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та. 1982. С. 5 – 16
7. Ахтырцев А.Б. Гидроморфные почвы и переувлажненные земли лесостепи и степи Русской равнины: дис. ... д-ра. биол. наук: 03.00.27/Ахтырцев Анатолий Борисович. — Воронеж, 1999. — 383 с.
8. Ахтырцев Б. П., Ахтырцев А.Б. Почвенный покров Среднерусского Черноземья. — Воронеж: Издательство Воронежского гос. ун-та, 1993. — 216 с.
9. Базилевич Н. И., Титлянова А. А. Особенности функционирования травяных экосистем в сравнении с лесными и пустынными // Математическое моделирование в экологии. - М.: Наука, 1978. - С. 65-100.
10. Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. — М.: Наука, 1993. — 293 с.
11. Базыкина Г.С., Бойко О.С. Влияние аномальных погодных условий последних десятилетий на водный режим типичных черноземов заповедной степи (Курская область) // Почвоведение. — 2008. — №7. — С. 833–844.
12. Базыкина Г.С., Овечкин С.В. Миграционно-мицелярные черноземы Курской области в климатических и биосферных циклах. Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2012;(70):3-18. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2012-70-3-18>
13. Белгородская модель адаптивно-ландшафтного земледелия / В. И. Кирюшин, С. В. Лукин, В. Д. Соловиченко, В. И. Мельников. – Белгород: Константа, 2019.
14. Беляева Н. Г., Черненко Т. В., Морозова О. В., Сандлерский Р. Б., Архипова М. В. Сравнение эколого-фитоценотического и эколого-флористического методов классификации для оценки ценоценотического разнообразия и картографирования лесной растительности // Лесоведение, 2018, № 3, С. 178-193
15. Беручашвили Н.Л. Четыре измерения ландшафта. — М: Мысль, 1986. — 182 с.
16. Берг Л.С. Климат и жизнь. — М.: Госиздат, 1922. — 196 с.
17. Берг Л.С. Лёсс как продукт выветривания и почвообразования // Избранные труды. — М.: Изд-во АН СССР, 1960. — Т. 3. — 551 с.
18. Берлянт А.М., Книжников Ю.Ф., Лурье И.К., Серапинас Б.Б., Аляутдинов А.Р. География, общество, окружающая среда. Том VII: Картография, геоинформатика, аэрокосмическое зондирование. М.: изд. Дом «Городец». – 2004. – 624 с.
19. Боголепов В.П. О состоянии и задачах развития общей теории организации. М.: Наука, 1968. - 222 с.

20. Бублясь В.Н. Закономерности развития западных морфоскульптур (степных блюдц) средней части бассейна р. Днепр: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук: 04.00.01/ Бублясь Владимир Николаевич. — Киев, 1993. — 28 с.
21. Величко А.А., Морозова Т.Д., Нечаев В.П., Порожнякова О.М. Палеокриогенез, почвенный покров и земледелие. — М.: Наука, 1996. — 150 с.
22. Видина А.А., Цесельчук Ю.Н. Ландшафтные исследования для целей сельского хозяйства и возможности использования ландшафтных карт. Материалы к V Всесоюзному совещанию по вопросам ландшафтоведения. М., Геогр. ф-т МГУ, 1961. — с. 160-169.
23. Викторов А. С., Гонилов Т. В., Орлов Т. В. Основные итоги развития математической морфологии ландшафта // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. — 2023. — № 4. — С. 4–15.
24. Волков С.Н. Землеустроительное проектирование. Учебники и учебные пособия для студентов высших учебных заведений. В 2-х т. М.: ГУЗ, 2020. — 540 с. ISBN 978-5-9215-0481-3, ISBN 978-5-9215-0481-7
25. Востокова Л.Б., Булгаков Д.С., Орешникова Н.В., Яковлев А.С. Бонитировка почв в системе земельного кадастра, М.: МАКС Пресс, 2010. — 299 с.
26. Габбасова И.М., Хабиров И.К. Распространение, типология и оценка состояния деградированных почв республики Башкортостан // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. — 2010. — № 2. — С. 3–11.
27. Гвишиани Д.М. Методологические аспекты системных исследований. В кн.: Философско-методологические основания системных исследований. М.: Наука. — 1983. — с. 3-16.
28. Герасимов И.П. К вопросу о генезисе лёссов и лёссовидных отложений // Известия АН СССР. Серия география и геофизика. — 1939. — № 1. — С. 97–106.
29. Глазовская М.А. Техногенез и проблемы ландшафтно-геохимического прогноза // Вестник МГУ. — 1968. — №1. — С. 30–36.
30. Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов. — М.: Высшая школа, 1988. — 277 с.
31. Герасимов И.П. Опыт генетической диагностики почв СССР на основе элементарных почвенных процессов // Почвоведение. — 1975. — № 5. — С. 1–9.
32. Геренчук К.И., Исаченко А.Г., Солнцев Н.А. Неотложные задачи советских ландшафтоведов // Известия ВГО, 1975, т. 107, вып. 4, с. 289-294.
33. Голосов В.Н., Ермолаев О.П., Шарифуллин А., Иванов М. Пространственно-временные закономерности развития современных процессов природно-антропогенной эрозии на русской равнине: монография. — М.-Казань: Издательство АН РТ, 2019. — 371 с.

34. Горячкин С.В. Проблема приоритетов в современных исследованиях почвенного покрова: структурно-информационный подход или парциальный анализ // Современные естественные и антропогенные процессы в почвах геосистемах. – М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева. – 2006. – С. 53-81.
35. Государственная программа «Эффективное вовлечение в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса». Утверждена постановлением Правительства от 14 мая 2021 года №731.
36. Дайнеко Е.К. Структура почвенного покрова Центрально-Черноземного заповедника имени В.В. Алёхина и его окрестностей // Химия, генезис и картография почв. М.: Наука, 1968.
37. Дмитриева В.А., Нефедова Е.Г. Гидроэкологическая роль лесных насаждений в формировании режима водных ресурсов // Лесотехнический журнал. 2015. №3 (19).
38. Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации. Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 21 января 2020 г. № 20
39. Докучаев, В. В. Русский чернозем: Отчет Императорскому вольному экономическому обществу: С почвенной картой и 12-ю рисунками в тексте. / В.В. Докучаев. — Санкт-Петербург: Типография Деклерона и Евдокимова, 1883. - III, IV, 376 (т. е. 374) с., 1 л. ил.: ил., табл. — 313 с.
40. Дубачинская Н. Н., Верещагина А. С., Герасимова Н. Н. Агроэкологическая оценка земель по продуктивности возделываемых культур в севооборотах // Известия ОГАУ. 2007. №14-1.
41. Дьяконов К.Н. Географические законы и их физическая сущность // Вопросы географии, т. 117, 1981
42. Дьяконов К.Н. Геофизика ландшафтов. Метод балансов. — М.: Издательство Московского университета, 1988. — 95 с.
43. Дэвис Дж. С. Статистический анализ данных в геологии. — М.: Недра, 1990. — Т. 2. — 427 с.
44. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. Коллективная монография. — М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2014. — 768 с.
45. Еременко Е.А., Панин А.В. Ложбинный мезорельеф Восточно-Европейской равнины. — М.: МИРОС, 2010. — 192 с.
46. Жидкин А.П., Комиссаров М.А., Шамшурина Е.Н., Мищенко А.В. Эрозия почв на Среднерусской возвышенности (обзор) // Почвоведение. — М.: Издательство Наука, 2023. — № 2. — С. 259–272.

47. Зайдельман Ф.Р., Степанцова Л.В., Никифорова А.С., Красин В.Н., Сафронов С.Б., Красина Т.В. Генезис и деградация черноземов Европейской России под влиянием переувлажнения. Способы защиты и мелиорации. — Воронеж: Издательство «Кварта», 2013. — 352 с.
48. Зворыкин К.В., Перцева А.А., Цедлер Е.Э. Из опыта работ по типологии и качественной оценке пахотных земель. Вопросы географии, №43, 1958. С. 83-108.
49. Зворыкин К.В. Сельскохозяйственная оценка земель Изд-во Моск. ун-та, Москва, 1985, 50 с.
50. Иванов А.Л., Кирюшин В.И., Савин И.Ю., Козубенко И.С. Цифровое земледелие // Вестник российской сельскохозяйственной науки, 2018. — № 5.— с. 4-9.
51. Иванов А.Л., Савин И.Ю., Столбовой В.С., Духанин Ю.А., Козлов Д.Н., Баматов И.М. Глобальный климат и почвенный покров – последствия для землепользования России // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. — 2021. — № 107. — С. 6–32.
52. Профессиональный информационно-аналитический ресурс, посвященный машинному обучению, распознаванию образов и интеллектуальному анализу данных. — 2022. — URL: <http://www.machinelearning.ru> (дата обращения: 8.09.2021)
53. Исаченко А.Г., Шляпников А.А. Ландшафты. — М.: Мысль, 1989. — 504 с.
54. Абдрахманов Р.Ф., Мартин В.И., Попов В.Г., Рождественский А.П., Смирнов А.И., Травкин А.И. Карст Башкортостана. Уфа: «Информреклама», 2002 – 384 с.
55. Карта физико-географического районирования СССР. М-б 1:8000000 / Ред. Н.А. Гвоздецкий, Г.С. Самойлова. — М.: ГУГК СССР, 1986.
56. Касимов Н.С., Перельман А.И. Геохимия ландшафта. — М.: Издательство Московского государственного университета, 1999. — 610 с.
57. Кирюшин В.И. Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий. Методическое руководство. — М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2005. — 784 с.
58. Кирюшин В.И. Агрономическое почвоведение. СПб: КВАДРО, 2013. – 678 с.
59. Кирюшин В.И. Экологические основы проектирования сельскохозяйственных ландшафтов. — СПб.: Изд-во «Квадро», 2018. — 568 с.
60. Кирюшин В.И. Методология комплексной оценки сельскохозяйственных земель // Почвоведение. – 2020. - №7. – с. 871–879
61. Классификация и диагностика почв СССР / под ред. В.В. Егорова, Е.Н. Ивановой, В.М. Фридланд, Н.И. Розова. — М.: Колос, 1977. — 221 с.
62. Климатические данные городов по всему миру. — URL: <https://ru.climate-data.org/> (дата обращения: 18.03.2021)

63. 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 // Известия Российской академии наук. Серия географическая. — 2008. - №4. — с. 112-124 с.
64. Козлов Д.Н. Цифровой ландшафтный анализ при крупномасштабном картографировании структур почвенного покрова. Дисс. На соиск. Уч. Ст. канд. геогр. Наук, специальность: 25.00.23 - Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов, 2009
65. Козлов Д.Н., Сорокина Н.П. Традиции и инновации в крупномасштабной почвенной картографии // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. — М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2012. — С. 35–37.
66. Козловский Ф.И. Структурно-функциональная и математическая модели миграционных ландшафтно-геохимических процессов // Почвоведение. — 1972. — № 4. — С. 122–138.
67. Козловский Ф.И. Теория и методы изучения почвенного покрова. — М.: ГЕОС, 2003. — 534 с.
68. Комиссаров М.А., Габбасова И.М. Эрозия почв при снеготаянии на пологих склонах в Южном Предуралье // Почвоведение. — 2014. — № 6. — С. 734–743.
69. Кочуров Б.И., Хазиахметова Ю.А., Ивашкина И.В., Сукманова Е.А. Ландшафтный подход в градостроительном проектировании // Юг России: экология, развитие. 2018. №3. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2018-3-71-82>
70. Крауклис А.А. Применение организационных принципов в физической географии // Методологические вопросы географии. — Иркутск, 1977. — С. 36–50.
71. Кренке А.Н. Отображение факторов формирования компонентов ландшафта на основе тематических карт, дистанционной информации и трехмерной модели рельефа: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.23/ Кренке Александр Николаевич. — М. — 2011. — 28 с.
72. Крестовский О.И. Влияние вырубок и восстановления лесов на водность рек / О.И. Крестовский. — Л.: Гидрометеиздат, 1986. — 116 с.
73. Кречетов П. П. Формы соединений кальция в черноземах. — географический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова Москва, 2017. — 188 с.
74. Кухарук Н.С., Смирнова Л.Г., Нарожная А.Г., Чендев Ю.Г., Глазунов Г.П. Динамика влажности почв заповедных участков лесостепи на фоне внутривековой климатической изменчивости // Научные ведомости БелГУ. Серия: Естественные науки. — 2017. — № 25(274), Вып. 41. — С. 79–90.

75. Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. — М.: Издательство Московского университета, 1993. — 200 с.
76. Схематическая ландшафтно-типологическая карта Центрального Черноземья. Масштаб 1:1000000 — под. ред. Ф.Н. Милькова — 1962. — Саратов.
77. Ландшафтная карта Центрального Черноземья. Масштаб 1:500000. — Кафедра физической географии и оптимизации ландшафтов ВГУ — 2010
78. Ландшафтный сборник (Развитие идей Н.А. Солнцева в современном ландшафтоведении) / Под ред. доктора геогр.наук И.И. Мамай. - М.-Смоленск: Ойкумена, 2013. — 330 с.
79. Лёссовые породы СССР. Том 1. Инженерно-геологические особенности и проблемы рационального использования / под ред. Е.М. Сергеева, А.К. Ларионова, Н.Н. Комиссаровой. — М.: Недра, 1986. — 232 с.
80. Линник В.Г. Ландшафтная дифференциация техногенных радионуклидов: геоинформационные системы и модели: автореферат дис. ... д-ра. геогр. наук: 25.00.23/Линник Виталий Григорьевич — Москва, 2008. — 40 с.
81. Литвин Л.Ф. География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. — 255 с.
82. Нестеренко В.А., Лозбенев Н.И. Пространственно-временное варьирование фактической урожайности культур в контрастных агроэкологических условиях лесостепи Тамбовской области// Плодородие. — 2024. — №1. — С. 79-83. DOI: 10.25680/S19948603.2024.136.20.
83. Лопырев М.И. Основы агроландшафтоведения. — Воронеж, 1995, 181 с.
84. Макунина Г.С. Три составляющие системной организации ландшафта в концепциях Ф.И. Козловского, А.А. Крауклиса и В.Н. Солнцева // География и природные ресурсы. — 2010. — №1. — С. 18–23.
85. Медведев, В. В. Неоднородность почв и точное земледелие в 2 ч. Изд-во Укр. акад. аграр. наук, Ин-т почвоведения и агрохимии им. А. Н. Соколовского. — Харьков, 2007
86. Мильков Ф.Н. Типы местности и ландшафтные районы Центральных черноземных областей // Известия ВГО. — 1954. — Т. 86, Вып. 4. — С. 336–346.
87. Мильков Ф. Н. Физико-географический район и его содержание (на примере Русской равнины). М.: Географгиз. — 1956. — 221 с.
88. Мильков Ф.Н. Тип местности как ландшафтный комплекс и его значение для географического познания страны // Развитие и преобразование географической среды. — М. — 1964. — С. 141-157.

89. Мильков Ф.Н. Ландшафтная география и вопросы практики. — М.: Мысль, 1966. — 255 с.
90. Мильков Ф.Н. Ландшафтная сфера Земли. — М. — 1970 — 207 с.
91. Мильков Ф.Н. Окско-Донское плоскоместье. — Воронеж: Изд-во ВГУ, 1976. — 176 с.
92. Мильков Ф.Н. Природные зоны СССР. — М.: Мысль, 1977. — 296 с.
93. Мильков Ф.Н. Известняковый север Среднерусской возвышенности. — Воронеж: Издательство ВГУ, 1978. — 176 с.
94. Мильков Ф.Н. Поемье. — Воронеж: Издательство Воронежского университета, 1981. — 172 с.
95. Михайлов И.С. Учение И.П. Герасимова об элементарных почвенных процессах и его реализация в различных природных зонах // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. — 2015. — Вып. 81. — С. 103–119.
96. Михно В.Б., Бережной А.В., Федотов В.И. Посеймье – Воронеж: Изд-во ВГУ. – 1986. – 169 с.
97. Михно В.Б., Горбунов А.С., Быковская О.П. Этапы создания ландшафтно-геоинформационной системы Центрально-черноземных областей // Геоинформационное картографирование в регионах России. – Воронеж: Научная книга – 2010. – С. 94–103.
98. Михно В.Б., Быковская О.П., Горбунов А.С. Региональные особенности литоландшафтогенеза Центрального Черноземья // Региональные геосистемы. — 2020. — Вып. 44, №1. — С. 29–40.
99. Морфологическая структура географического ландшафта / Г.Н. Анненская, А.А. Видина, В.К. Жучкова и др. — М.: Издательство Московского университета Москва, 1962. — 54 с.
100. Николаев В.А. Ландшафтоведение. — М.: Изд-во МГУ - 2000. — 94 с.
101. Николаев В.А., Копыл И.В., Сысуев В.В. Природно-антропогенные ландшафты (сельскохозяйственные и лесохозяйственные). Учебное пособие. — М.: Изд-во Географического факультета МГУ — 2008 - 160 с
102. Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупномасштабных почвенных карт землепользований. — М.: Колос, 1973. — 48 с.
103. Подобед Е.А. Структурно-функциональная организация склоновых ландшафтов Курской области и основные пути их оптимизации // Вопросы степеведения. — Оренбург: ИС УрО РАН, 2013. — С. 72–76.
104. Подобед Е.А. Ландшафтно-экологическое состояние территории Курской области: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.23/Подобед Елена Алексеевна. — Воронеж, 2013.
105. Почвозащитное земледелие на склонах. — М.: Колос, 1983. — 527 с.

106. Почвы Башкортостана. Том 1: Эколого-генетическая и агропроизводственная характеристика / Ф.Х. Хазиев, А.Х. Мукатанов, И.К. Хабилов, Г.А. Кольцова, И.М. Габбасова, Р.Я. Рамазанов. — Уфа: Гилем, 1995. — 384 с.
107. Пространственные данные: потребности экономики в условиях цифровизации. Под ред. Белогурова Е. Б., Воробьев В. Е., Гвоздев. О. Г. - Фед. служба гос. регистрации, кадастра и картографии; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики»; НИИ «АЭРОКОСМОС». – М: НИУ ВШЭ. – 2020. – 128 с.
108. Пузаченко Ю.Г., Онуфреня И.А., Алещенко Г.М. Анализ иерархической организации рельефа // Известия РАН. Серия: Географическая. — 2002. — № 4. — С. 29–38.
109. Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях: Учебное пособие для студ. вузов. — М.: Издательский центр «Академия», 2004. — 416 с.
110. Пузаченко Ю.Г., Гагаева З.Ш., Алещенко Г.М. Составление мелкомасштабной карты ландшафтного покрова с использованием мультиспектральной информации // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2004. - №4. – с. 97-109
111. Пузаченко М.Ю. Мультифункциональный ландшафтный анализ юго-запада Валдайской возвышенности: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.23/Пузаченко Михаил Юрьевич. — Москва, 2009
112. Раскатов Г.И. Геоморфология и неотектоника территории Воронежской антеклизы. — Воронеж: Издательство Воронежского университета, 1969. — 164 с.
113. Ретеюм А.Ю. О геокомплексах с односторонним системообразующим потоком вещества и энергии // Изв. АН СССР, сер. Геогр. – 1971 -№5, с. 122-128.
114. Ретеюм А.Ю. Физико-географические исследования и системный подход // Системные исследования: Ежегодник. М., 1972. С. 90-110.
115. Ретеюм А.Ю. Физико-географическое районирование и выделение геосистем // Вопросы географии. — М.: Наука, 1975. — № 98. — С. 5–26.
116. Роде А.А., Ковда В.А. Почвы бассейна р. Дона. / А.А. Роде, В.А. Ковда. – В кн.: Почвы СССР. – т.3. – М., 1939.
117. Розов Н.Н. Почвы центральной лесостепной области. / Н.Н. Розов. – В кн.: Почвы СССР. – т.3. – М., 1939.
118. Роде А.А. Избранные труды. Том 1. Теоретические проблемы почвоведения и вопросы генезиса почв. — М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2008. — 243 с.

119. Руднева О. С. Анализ экологической сети Южного Урала на примере Оренбургской области, Республики Башкортостан и Актыбинской области Республики Казахстан // Вестник Оренбургского государственного университета. — 2007. — Вып. 67. — С. 73–76.
120. Сапожников П. М. Методологические принципы государственной кадастровой оценки сельскохозяйственных угодий/ // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. — 2004. — № 1.
121. Сибирцев Н.М. Избранные сочинения, Т.2. — М.: Сельхозгиз, 1953. — 583 с.
122. Смирнов А.И., Дурнаева В.Н., Абдрахманов Р.Ф. ГИС-технологии в изучении опасных геологических процессов южного Урала и Предуралья // Геологический вестник. — 2018. — № 3. — С. 137–143.
123. Смирнова М.А., Жидкин А. П., Лозбенев Н. И., Заздравных Е.А., Козлов Д.Н. Цифровое картографирование степени эродированности почв с использованием моделей фактор – свойство и фактор – процесс – свойство (юг Среднерусской возвышенности) // Бюллетень Почвенного института имени В.В.Докучаева. — 2020. — № 104. — С. 158–198.
124. Соболев Н.В., Габбасова И.М., Комиссаров М.А. Влияние различной интенсивности дождей и крутизны склонов на развитие эрозии почв в Южном Предуралье (модельный опыт) // Почвоведение. — 2017. — № 9. — С. 1134–1140.
125. Солнцев Н.А. О морфологии природного географического ландшафта // Вопросы географии. — 1949. — № 16. — С. 63–79.
126. Солнцев В.Н. О некоторых фундаментальных свойствах геосистемной структуры // Методы комплексных исследований геосистем. — Иркутск, 1974. — С. 26–36.
127. Солнцев В.Н. О трудностях внедрения системного подхода в географию // Вопросы географии. — 1977. — Вып. 104. — С. 20–36.
128. Солнцев В.Н. Системная организация ландшафтов (проблемы методологии и теории). — М.: Мысль, 1981. — 239 с.
129. Солнцев В.Н. Структурное ландшафтоведение: основы концепции // Структура, функционирование, эволюция природных и антропогенных ландшафтов. — М., СПб, 1997. — С. 11–14.
130. Сорокина Н.П. Элементарные почвенные структуры на полях Курской опытной станции // Крупномасштабная картография почв и её значение в сельском хозяйстве черноземной зоны. — М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 1976. — С. 155–169.
131. Сорокина Н.П. Региональная модель почвенно-ландшафтных связей на примере Клинско-Дмитровской гряды // Почвоведение. — 1998. — № 4. — С. 389–398.
132. Сорокина Н.П. Элементарные почвенные структуры пахотных земель: опыт картографирования // Почвоведение. — 2000. — № 2. — С. 158–168.

133. Сочава В.Б. Определение некоторых понятий и терминов физической географии // Докл. Ин-та географии Сибири и Дальнего Востока. 1963. Вып. 3. С. 50-59.
134. Сочава В. Б. Системная парадигма в географии // Известия ВГО. –1973. – Т. 105. – Вып. 5. – С. 393–401.
135. Сочава В. Б. Геотопология как раздел учения о геосистемах. – В сб.: «Топологические аспекты учения о геосистемах». Новосибирск, 1974.
136. Сочава В. Б. Введение в учение о геосистемах. – Новосибирск: Наука, 1978. – 464 с.
137. Сочава В.Б. Теоретическая и прикладная география. — Новосибирск: Наука, 2005. — 288 с.
138. Степанцова Л.В. Агрофизические свойства, гидрологический режим и диагностика черноземовидных почв севера Тамбовской низменности: автореф. дис. д-ра биол. наук: 06.01.03 / Степанцова Людмила Валентиновна. — М., 2012. — 47 с.
139. Сухановский Ю.П., Прущик А.В., Санжарова С.И., Соловьева Ю.А. Модифицированный метод прогнозирования эрозии почвы и ее последствий // Земледелие. 2016. №2.
140. Сысуев В.В. Морфометрический анализ геофизической дифференциации ландшафтов // Известия РАН, сер. Геогр. – 2003 - № 4 - с. 36-50.
141. Сысуев В.В Введение в физико-математическую теорию геосистем. М.: URSS. 2019. 600 с. ISBN 978-5-9710-7090-0.
142. Тамбовская лесостепь: природа и общество. Под ред. Дудник Н.И., Инякина Е.Е., Панков С.В. Тамбов: Издательский дом ТГУ имени Г.Р. Державина, 2013. 320 с.
143. Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупномасштабных почвенных карт землепользований. - М.: Колос, 1973 – 96 с.
144. Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях: Учебн. пособие для студ. вузов. - М.: Издательский центр "Академия". – 2004 - 416 с.
145. Федеральный закон "О землеустройстве" от 18.06.2001 N 78-ФЗ
146. Фишман М.И. Черноземные комплексы и их связь с рельефом на Среднерусской возвышенности // Почвоведение. – 1977 - №5 – с. 17-29
147. Фридланд В.М. Структуры почвенного покрова мира. - М.: Мысль. – 1984. – 235 с.
148. Халевицкая Г.С., Бабкина М.И., Кузнецова В.В. Агроклиматические ресурсы Башкирской АССР. – Ленинград: Гидрометеиздат – 1976. – 235 с.
149. Хорошев А. В. Географическая концепция ландшафтного планирования // Известия Российской академии наук. Серия географическая. — 2012. — № 4. — С. 103–112.

150. Хорошев А. В. Ландшафтно-экологическое планирование. — Москва: Общество с ограниченной ответственностью Товарищество научных изданий КМК, 2023. — 261 с.
151. Хорошев А. В., Еремеева А. П., Мерекалова К. А. Оценка межкомпонентных связей в степном и таежном ландшафтах с учетом изменяемой пространственной единицы // Известия Русского географического общества. — 2013. — Т. 145, № 3. — С. 32–42.
152. Хорошев А.В. Полимасштабная организация географического ландшафта. — М.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. — 416 с.
153. Хорошев А. В. Современные направления структурного ландшафтоведения // Известия Российской академии наук. Серия географическая. — 2016. — № 3. — С. 7–15.
154. Цессельчук Ю.Н. Помощь подшефным колхозам // Московский университет. — 1952. — №1 (1178).
155. Чендев Ю. Г., Лупо Э. Р., Лебедева М. Г., Борбукова Д. А. Региональные особенности климатической эволюции почв южной части Восточной Европы во второй половине голоцена // Почвоведение. - 2015. - № 12. - С. 1411-1423. DOI: 10.7868/S0032180X15120047
156. Чендев Ю.Г., Геннадиев А.Н., Лукин С.В., Соэр Т.Д., Заздравных Е.А., Белеванцев В.Г., Смирнова М.А. Изменение лесостепных черноземов под влиянием лесополос на юге Среднерусской возвышенности // Почвоведение. — 2020. — № 8. — С. 934-947. DOI:10.31857/S0032180X20080031
157. Черкашин А.К., Коновалова Т.И., Бессолицына Е.П., Владимиров И.Н. Ландшафтно-интерпретационное картографирование. Новосибирск: Наука – 2005. — 424 с. — ISBN 5-02-032449-3.
158. Черногоров А.Л., Чекмарев П.А., Васенев И.И., Гогмачадзе Г.Д. Агроэкологическая оценка земель и оптимизация землепользования. М.: Изд-во Московского университета, 2012. — 268 с.
159. Черноземы СССР. Том 1 под ред. Фридланд В.М. М.: изд-во Колос, 1974
160. Чижова В.П., Бухарова Е.В., Лозбенев Н.И., Лужкова Н.М., Разуваев А.Е. Ландшафтно-экологическое обоснование развития познавательного туризма в Баргузинском заповеднике // Географический вестник. — 2016. - №2(37). — с. 97-109
161. Швебс Г.И. Концепция парагенетических ландшафтов и природопользование// География и практика науки. М.: 1988, с. 107-120.
162. Шилов П.М. Литолого-геоморфологические факторы переувлажнения почв Центрального Нечерноземья. Дисс. на соиск. Ст. канд. биол. наук по специальности 1.5.19 Почвоведение, 2023

163. Almalki R., Khaki M., Saco P.M., Rodriguez, J.F. Monitoring and Mapping Vegetation Cover Changes in Arid and Semi-Arid Areas Using Remote Sensing Technology: A Review // Remote Sens – 2022. – Vol. 14 - pp. 5143 <https://doi.org/10.3390/rs14205143>
164. Arrouays D., Lagacherie P., Hartemink A.E. Digital soil mapping across the globe // Geoderma Regional, Vol. 9, 2017, pp. 1-4. ISSN 2352-0094, <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.03.002>.
165. Arrouays D., McBratney A., Bouma J., Libohova Z., Richer-de-Forges A.C., Morgan C.L.S., Roudier P., Poggio L., Mulder V.L. Impressions of digital soil maps: The good, the not so good, and making them ever better // Geoderma Regional, Vol. 20, 2020, ISSN 2352-0094, <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00255>.
166. Chen S., Arrouays D., Mulder V.L., Poggio, L., Minasny B., Roudier P., Libohova Z., Lagacherie P., Shi Z., Hannam J., Meersmans J., Richer-de-Forges A., Walter C. Digital mapping of GlobalSoilMap soil properties at a broad scale: A review // Geoderma. – 2022 – Vol. 409 – pp.115567. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115567>.
167. Easy trace – Гис для автоматической векторизации карт URL: <http://www.easytrace.com/> (дата обращения: 09.12.2020)
168. Ervin S.M. Digital landscape modeling and visualization: a research agenda // Landscape and Urban Planning – Vol. 54 - Is. 4 – 2001. – pp. 49-62, [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(01\)00125-6](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(01)00125-6).
169. Hengl T., J.M. de Jesus, Heuvelink G.B.M., Gonzalez M.R., Kilibarda M., Blagotic A., Shangguan W., Wright M.N., Blagotic A., Geng X.Y., Bauer-Marschallinger B., Guevara M.A., Vargas R., MacMillan R.A., Batjes N.H., Leenaars J.G.B., Ribeiro E., Wheeler I., Mantel S., Kempen B. SoilGrids250m: global gridded soil information based on Machine Learning // PLoS ONE, Vol. 12, №2, 2017 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>
170. Jung M., Nelson J., Migliavacca M., El-Madany T., Papale D., Reichstein M., Walther S., Wutzler T. Technical Note: Flagging inconsistencies in flux tower data // Biogeosciences – Vol. 21 - Is. 7 – 2024. – pp. 1827-1846. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-21-1827-2024>
171. Forman R.T.T., Godron M. Landscape ecology. – New York: John Wiley and Sons, 1986. 619 p.
172. Global mapper (GIS) URL: <https://www.bluemarblegeo.com/global-mapper/> (дата обращения: 23.11.2022)
173. Global network of micrometeorological tower sites. URL: <https://fluxnet.ornl.gov/> (дата обращения: 20.03.2020)
174. GoldenSoftware Surfer (GIS) URL: <https://www.goldensoftware.com/products/surfer/> (дата обращения: 10.02.2021)

175. Hengl T., MacMillan R.A. Chapter 19. Geomorphometry — A Key to Landscape Mapping and Modelling // *Developments in Soil Science* – 2009 – Vol. 33 – pp. 433-460
176. Hengl T., MacMillan R. A. Predictive Soil Mapping with R – 2019. – 372p.
177. Khoroshev A.V. Geosystem Approach to Landscape Pattern and Process Studies in Russia // *Current Landscape Ecology Reports*. 2022. Vol. 7. Issue 3. P. 25-40.
178. Khoroshev A. V., Kalmykova O. G., Ashikhmin A. P. Hydrothermal conditions of the temporal variability of the phytoproductive functioning: case study of the burtinskaya steppe landscape (southern urals) // *Вестник Карагандинского университета. Серия: Биология. Медицина. География* – 2022. - Vol. 106 - no. 2 – pp. 191–202
179. Kirkby M. J. Topmodel: a personal view // *Hydrological Processes* – 1997 – Vol. 11(9) – pp. 1087-1098
180. Kozlov D. N., Levchenko E. A., Lozbenev N. I. Soil combinations as an object of DSM: A case study in chernozems area of the Russian plain // *GlobalSoilMap - Digital Soil Mapping from Country to Globe: Proceedings of the Global Soil Map 2017 Conference, July 4-6, 2017, Moscow, Russia.* — 2018 - CRC Press, 188p.
181. Lozbenev N.I., D. N. Kozlov The regional model of landscape relationships of forest-steppes of Middle-Russian upland / // *Global Soil Map 2017, Москва, 03–07 июля 2017 года.* – Москва: Почвенный институт имени В.В. Докучаева, 2017. – P. 17. – EDN ZIQSIJ.
182. Lozbenev N., Smirnova M., Bocharnikov M., Kozlov D. Digital mapping of habitat for plant communities based on soil functions: A case study in the virgin forest-steppe of Russia // *Soil Systems.* — 2019. — Vol. 3, no. 1, pp. 19.
183. Lozbenev N., Yurova A., Smirnova M., Kozlov D. Incorporating process-based modeling into digital soil mapping: A case study in the virgin steppe of the Central Russian upland // *Geoderma.* — 2021. — Vol. 383. — P. 114733.
184. Lozbenev N., Komissarov M., Zhidkin A., Gusarov A., Fomicheva D. Comparative Assessment of Digital and Conventional Soil Mapping: A Case Study of the Southern Cis-Ural Region, Russia // *Soil Systems* – 2022 – Vol. 6, No. 1 - pp. 14.
185. McBratney. A.B., Mendonça Santos. M.L., Minasny. B. On digital soil mapping // *Geoderma.* – 2003. - №117 (1-2) - pp. 3–52.
186. Minasny B., McBratney A.B., Digital soil mapping: A brief history and some lessons // *Geoderma* – 2016 – Vol.264 – Part B- pp. 301-311
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.017>.
187. Murphy P.N., Ogilvie J., Paul A. A. Topographic modelling of soil moisture conditions: A comparison and verification of two models // *European Journal of Soil Science* – 2009 – vol. 60(1) - pp. 94 – 109 DOI: 10.1111/j.1365-2389.2008.01094.x

188. Nikiforova A.A., Fleis M.E., Nyrtsov M.V., Kazantsev N.N., Kim K.V., Belyonova N.K., Kim J.K. Problems of modern soil mapping and ways to solve them // CATENA, Vol. 195, 2020,104885, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104885>.
189. Olaya, V., Conrad, O. Geomorphometry in SAGA // Developments in Soil Science – 2009. – Vol. 33 pp. 293–308.
190. Planet Labs satellite images URL: <https://www.planet.com/> (дата обращения: 09.06.2021)
191. Renard, K., Foster, G., Weesies, G., McCool, D. and Yoder, D. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA Agriculture Handbook – 1997 – 384 p.
192. Sculla P., Franklina J., Chadwick O.A., McArthur D. Predictive soil mapping: a review // Progress in Physical Geography – 2003 – vol.27 - pp. 171–197 DOI:10.1191/0309133303pp366ra
193. Seibert, J., K. Bishop, A. Rodhe, and J. J. McDonnell. Groundwater dynamics along a hillslope: A test of the steady state hypothesis // Water Resources Research – 2003 - Vol. 39(1) - pp. 1014, doi:10.1029/2002WR001404
194. Shary P.A. Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures // Mathematical Geology – 1995. - vol. 27 - №3. - pp. 373–390
195. Terribile F., Coppola A., Langella G., Martina M., Basile A. Potential and limitations of using soil mapping information to understand landscape hydrology// Hydrology and Earth System Sciences. Vol. 15, 2011. DOI: 10.5194/hess-15-3895-2011.
196. Turcotte D. Fractals and chaos in geology and geophysics // Cambridge University Press. – 1992. - 221 p.
197. Van Oost K., Govers G., Desmet PJJ. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage // Landscape Ecology. – 2000 – Vol.15. – pp. 577-589.
198. Van Rompay A., Verstraeten G., Van Oost K., Govers G., Poesen J., Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach // Earth Surface Processes and Landforms. – 2001 – Vol. 26 (11) - pp. 1221-1236.
199. Webster R., Burrough P. A. Multiple discriminant analysis in soil survey // European Journal of Soil Science. – 1974. – Vol. 25(1). – pp. 120-134
200. Weiss, A. Topographic position and landforms analysis // Proceedings of the Poster Presentation, ESRI User Conference, San Diego, CA, USA, 9–13 July 2001. – 2002. – Vol. 200.
201. Wieland R., Dalchow C., Detecting landscape forms using Fourier transformation and singular value decomposition (SVD) // Computers and Geosciences. – 2009. – Vol. 35. – pp. 1409–1414.

202. Yurova A.Y., Smirnova M.A., Lozbenov N.I., Fil P.P., Kozlov D.N. Using soil hydromorphy degree for adjusting steady-state water table simulations along catenas in semiarid Russia // CATENA. – 2021. - Vol. 199. – p. 105109
203. Zhidkin A., Gennadiev A., Fomicheva D. Shamshurina E., Golosov V. Soil erosion models verification in a small catchment for different time windows with changing cropland boundary // Geoderma. — 2023. — Vol. 430. — P. 116322.
204. Zhang G., Liu F., Song X.-D. Recent progress and future prospect of digital soil mapping: A review // Journal of Integrative Agriculture. – 2017. – Vol. 16(12) – pp. 2871-2885. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61762-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61762-3).
205. Zhou Q., Lees B., Tang G. Advances in Digital Terrain Analysis (Lecture Notes in Geoinformation and Cartography). – 2008 – 476 p.