

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
ПОЧВЕННЫЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ В.В. ДОКУЧАЕВА
ОТДЕЛ ГОСУДАРСТВЕННОГО РЕЕСТРА ПОЧВ

На правах рукописи

Филь Павел Петрович

**Влияние западинных урочищ на гидрологическое функционирование
лесостепных ландшафтов Окско-Донской низменности**

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
В.В. Сысуев;
Кандидат географических наук
Д.Н. Козлов

Москва – 2025

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Развитие представлений об особенностях функционирования ландшафтов Окско-Донской низменности.....	9
1.1 История изучения структурно-функциональной организации ландшафтов Окско-Донской низменности	9
1.2 Качественные модели организации ландшафтов Окско-Донской низменности	13
Глава 2. Физико – географическая характеристика Окско-Донской низменности	20
2.1 Геоло-геоморфологическое строение	20
2.2 Климатические особенности экотона лесостепи	25
2.3 Почвы и структура почвенного покрова	30
2.4 Ландшафтная структура Окско-Донской низменности	37
2.4.1 Типы местности.....	40
Глава 3. Материалы и методы.....	59
3.1 Обоснование схемы исследования.....	59
3.2 Мониторинг динамики уровня воды в западинах для параметризации верхних граничных условий поступления влаги.....	61
3.2.1 Параметризация верхних граничных условий	61
3.2.2 Разграничение водных объектов в западинах	63
3.2.3. Учет испарения воды из западины	67
3.3 Постановка краевой задачи и определения граничных условий модели структурно-функциональной организации и межсезонной динамики водного режима почв на ключевом участке детального масштаба.....	73
3.3.1 Модель движения влаги на локальном масштабе.....	73
3.3.2 Параметризация и верификация модели внутрипочвенной фильтрации	75
3.4 Постановка краевой задачи и определения граничных условий модели структурно-функциональной организации и межсезонной динамики водного режима почв на ключевом участке бассейнового масштаба.....	79
3.4.1. Уравнение кинематической волны.....	79
3.4.2 Дискретизация топопоследовательностей (катен) для постановки граничных условий бассейновой модели.....	88
3.4.3 Настройка параметров бассейновой модели и экстраполяция данных	89
Глава 4. Влияние западинных урочищ на функционирование недренируемого типа местности	92

4.1 Динамика функционирования западных урочищ	92
4.2 Динамика влажности почвы на локальном масштабе	98
Глава 5. Влияние западных урочищ на гидрологическое функционирование междуречий Окско-Донской низменности	105
5.1 Динамика уровня грунтовых вод	105
5.2 Динамика уровня грунтовых вод по расчётам бассейновой модели с учетом информации о инфильтрации воды из запада по данным БВС	111
Глава 6. Влияние структуры и функционирования ландшафтов Окско Донской низменности на структуру землепользования	113
Заключение	115
Литература	117

Введение

Развитие системной парадигмы естествознания сформировало представление о географическом ландшафте как об открытой геосистеме регионального уровня. Взаимодействие поверхностного и подземного стока, биогеохимических и минеральных круговоротов обуславливает соответствие растительности, профильного строения почв и их физико-химических и биогеохимических свойств локальным эдафическим условиям (Мамай, 1973, Сочава, 1976; Козловский, 2003; Макунина, 2010; Козлов и др., 2017; Сысуев, 2019; Дьяконов, Сысуев, 2021). Однако исследование структурно-функциональной организации ландшафтов сталкивается с трудностью изучения системообразующих процессов, проявления их периодичности и изменчивости, выявления варьирования интенсивности процессов связанных с сезонными, межгодовыми и более длительными климатическими циклами (Хорошев, 2016), с неопределенностью косвенных признаков функциональной индикации (Козлов 2016, Смирнова 2023) и др.

В условиях Окско-Донской низменности лесостепной зоны, со свойственной для экотонных внутри- и межсезонной динамичностью гидротермических условий, взаимосвязь морфогенетических особенностей почв агроландшафтов с их гидрологическим режимом формируется через сочетание ландшафтного (внешнего) и почвенного (внутреннего) дренирования (Мильков, 1972; Ахтырцев 1976). В семиаридных условиях лесостепи водный режим является ключевым фактором: он определяет динамику водного и солевого баланса, условия миграции веществ и энергии в почве, а также участвует в формировании профильной дифференциации почвенных горизонтов и морфологических признаков почв (Роде, 1955; Глазовская, 1972; Перельман, 1975).

Представления о связи наблюдаемых морфогенетических особенностей почв лесостепной зоны с их функционированием и генезисом основываются преимущественно на качественных подходах (Троцкий, 1970; Ахтырцев, 1976; Самойлова, 1981; Зейдельман, 1998). Несмотря на значимость качественных моделей, они не дают количественного описания трудно измеряемых параметров функционирования. Вследствие этого для одних и тех же участков Окско-Донской низменности в зависимости от времени составления и авторства на почвенных картах отображались не испытывающие дополнительного переувлажнения типичные чернозёмы, а затем под другим авторством и в другое время для этих же участков составлялись карты с преобладанием луговых аналогов черноземных почв. С одной стороны, это было связано с методическими трудностями идентификации признаков переувлажнения, с другой - с различным гидрологическим функционированием почв низменности в разные климатические циклы.

С развитием современных технологий (ДДЗ, ГИС, физико-математическое моделирование), наряду с косвенным подходом изучения функционирования ландшафтов (Козлов, 2017) появилась возможность количественно оценивать пространственно-временные закономерности организации почвенных процессов в ландшафте (Сысуев, 2020, Fil и др. 2021). Выявление особенностей функционирования агроландшафтов в условиях лесостепи позволила сформировать четыре основных подхода: эмпирического (Johnson и др., 2010, Hayashi, 2016), статистического (Woo др., 1993, Shok и др., 2015), сочетания теоретического и эмпирического (Evenson и др, 2016, Taxmabessi и др, 2017, Yurova 2021) и теоретического моделирования (Tangen и Finocchiaro 2018).

Для решения задачи пространственного моделирования гидрологического функционирования почв в условиях замедленно дренируемых междуречий Окско – Донской низменности предложен подход основанный на комбинировании классических подходов цифровой почвенной картографии, гидрологического мониторинга (наземного и почвенного) и моделей тепловлагопереноса в почве и атмосфере, базирующийся на работах (Pitman, 1991, Selles и др., 1997, Володин, Лысоков, 1998, A Güntner 2010).

Цель работы – оценить влияние западинных урочищ в формировании поверхностного и внутрипочвенного стока, структуру водного баланса и морфологическую организацию междуречий лесостепных ландшафтов Окско-Донской низменности в условиях цикличности климатических факторов.

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

1. Обосновать схему описания взаимосвязи морфологической структуры ландшафтов Окско-Донской низменности с режимами их гидрологического функционирования, включая состав и параметризацию моделей поверхностного и внутрипочвенного стока, характерный масштаб их проявления в пространстве-времени, средства прямой и косвенной верификации.
2. Установить вклад западинных урочищ в структуру водного баланса недренируемого типа местности Окско-Донской низменности в годы с различным режимом тепловлагообеспеченности.
3. Охарактеризовать влияние гидрологического функционирования недренируемого типа местности на морфологическую структуру междуречий Окско-Донской низменности.
4. Изучить взаимосвязь пространственного распределения геометрии сельскохозяйственных полей с плотностью встречаемости западинных урочищ.

Методология исследования. В работе используется сочетание понятийной и методологической базы, разработанной в рамках ландшафтно-типологического подхода

(Милюков, 1966), методов цифровой почвенной картографии (McBratney и др., 2003), структурно-функционального подхода к идентификации организации ландшафта (Беручашвили 1997; Козловский, 2003; Мамай, 2004; Линник 2008; Сысуев, 2019; Hayashi, 2016), диагностической идентификации функционирования почв агроландшафтов (Зайдельман, 2001) и подходов к гидрологическому моделированию лесостепных ландшафтов (Pitman, 1991, Selles и др., 1997, Володин, Лыкосов 1998).

Материалы и методы исследования. В работе использовались детальные полученные с применением беспилотных авиационных систем (БАС) и региональные цифровые модели рельефа, архивная метеорологическая информация, архивные и собственные ландшафтные описания автора, использовался полевой и лабораторный инструментарий измерения физических параметров почв, данные разработанной автором автоматизированной системы мониторинга за влажностью почвы и уровнем грунтовых вод, инструментария физико-математического моделирования гидрологического функционирования почв. Обработка и вычисления проводилась с использованием программных сред QGIS, ArcGIS, Agisoft Metashape, SAGA GIS, Python, R и Fortran.

Научная новизна. Установлено, что западинные урочища являются ключевым элементом, влияющим на гидрологическое функционирование ландшафтов лесостепи Окско-Донской низменности, определяя перераспределение поверхностного и внутрипочвенного стока, формирование водного баланса и их морфологической структуры. Впервые показано, что пространственная изменчивость морфологических признаков почв обусловлена не только средне многолетними гидрометеорологическими характеристиками, но и их цикличностью, выражаемой через нелинейный отклик междуречий на их изменчивость, что подтверждено сочетанием структурно-компонентного ландшафтного подхода и физико-математического моделирования.

Теоретическая и практическая значимость. Предложенное сочетание подходов позволило выявить закономерности изменчивости водных режимов почв и их взаимосвязь между пространственным распределением морфологических признаков почвенных горизонтов и морфологической структурой ландшафта, учитывая особенности поверхностного (ландшафтного) и профильного (почвенного) перераспределения тепла и влаги. Выявленная пространственная дифференциация водных режимов определяет особенности геометрической формы производственных участков, выбор севооборотов и технической базы землепользователя, позволяет корректировать технологические мероприятия для целей оптимизации издержек и коадаптации человека и природы.

Степень достоверности, апробация результатов и публикации. Результаты доложены на 10 научных конференциях в том числе на международных (Global Symposium on Soil

Information and Data, Нанкин 2024). По теме работы опубликовано 5 работ: из них 3 статьи в журналах, индексируемых в базах данных Scopus, Web of Science, RSCI. Постановка краевой задачи и косвенная калибровка уравнения кинематической волны для оценки влияния выположенного рельефа междуречий Окско-Донской низменности на формирование повышенного уровня грунтовых вод рассмотрены в работе (Yurova et al., 2021), вклад автора 22%. Изменчивость поступления влаги на верхние граничные условия локальной модели для выявления роли западинных урочищ в перехвате и переводе поверхностного стока во внутрипочвенный рассмотрены в работе (Fil et al. 2021), вклад автора 77%. Методология оценки длительности застойных явлений почв возрастающего ряда гидроморфизма и система автоматизированного мониторинга запасов влаги в почве представлены в статье (Smirnova 2024 et al.), вклад автора 36%. Исходные данные: динамика верхних граничных условий опубликованы в патенте RU 2021621903 2020, физические параметры почв - в патенте RU 2021621903 2021.

Личный вклад автора. Автор участвовал и выполнял сбор фактических материалов и организовывал автоматизированный мониторинг влажности почв и уровня грунтовых вод в пределах ключевого участка в период с 2018 по 2023 г., выполнял полевые и лабораторные измерения, подготавливал материалы для параметризации теоретических моделей, выполнял верификацию и калибровку моделей по данным полевых автоматизированных и дистанционных обследований, выполнял обработку полученных результатов.

Положения, выносимые на защиту.

1. Сочетание результатов моделирования водного баланса с диагностическими показателями водного режима почв западин объясняет разнообразие морфологического строения почв возрастающего гидроморфизма лесостепи Окско-Донской низменности.

2. Западинные урочища в составе недренируемого типа местности лесостепи обеспечивают до 150 миллиметров дополнительного внутрипочвенного стока, питающего грунтовые воды и зависящего от запасов воды в снеге, режима снеготаяния и гидрофизических условий инфильтрации влаги в почву.

3. Наличие западинных урочищ в недренируемом типе местности, выполняющих функцию перехвата поверхностного стока, оказывает влияние на водный режим всего междуречья, способствуя повышению уровня грунтовых вод на 2 метра.

4. Пространственно-временная дифференциация водных режимов почв агроландшафтов определяет геометрическое разнообразие полей. Степень изрезанности, изменчивость и неоднородность гидрологических условий усложняет формирование севооборотов, пространственное размещение культур, выбор технологических мероприятий.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка используемых источников. Работа изложена на 125 страницах, включая 49 рисунков и 5 таблиц. Библиографический список содержит 120 источников, из них 42 на английском языке.

Благодарности. Автор выражает благодарности научным руководителям В. В. Сысуеву и Д.Н. Козлову, А.Ю. Юровой, сотрудникам кафедры Физической географии и ландшафтоведения, отделу агроэкологической оценки земель и проектирования агроландшафтов, отделу государственного реестра почв и лаборатории физики и гидрологии почв Почвенного института им. В.В. Докучаева за поддержку в подготовке диссертационной работы, сборе полевых материалов, выполнения модельных расчетов. Работа выполнена при финансовой поддержке Крупного Научного Проекта Разработка и научное обоснование системы – цифровой двойник почв в структуре агроландшафта, как элемент Индустрии 5.0 для экономики России» (Соглашение № 075-15-2024-545) и проекта РНФ 22-77-10062 «Гидрологическая и секвестрационная функции почв западного комплекса лесостепи».

Глава 1. Развитие представлений об особенностях функционирования ландшафтов Окско-Донской низменности

1.1 История изучения структурно-функциональной организации ландшафтов Окско-Донской низменности

Современная физическая география и ландшафтоведение основываются на системном подходе к изучению природных комплексов, рассматривая их как целостные, динамические системы с тесно взаимосвязанными компонентами. Значительный интерес вызывают вопросы пространственно-временной неоднородности структуры и функционирования ландшафтов, особенно в экотонных зонах, где на фоне общей переходной зональности проявляются сложные локальные условия, обусловленные перераспределением тепла и влаги микрорельефом. Такие условия в лесостепной зоне представлены плоскими междуречьями усложненными западинными урочищами, играющими важную роль в трансформации водных потоков.

Формирование первых качественных представлений о морфологической организации ландшафтов Окско-Донской низменности происходило на основе постепенного накопления знаний о структуре и функционировании природных компонентов, рассматриваемых в их пространственной взаимосвязи. Уже в ранних источниках, таких как «Книга Большому Чертежу» (1627), присутствовали элементы первичной дифференциации территории - описание речной сети, отдельных урочищ - первые попытки осмысления структурной организации региона.

На следующем этапе развития представлений о Окско-Донской низменности передовыми были натурные биогеографические исследования XVIII–XIX веков (Гмелин, 1769; Северцов, 1855) впервые зафиксировали устойчивую взаимосвязь фаунистических и флористических характеристик с формами рельефа, особенно подчёркивая специфику долинных и западинных участков. В частности, работах Н. А. Северцова (1855), охватывающие речные долины Дона, Икорца, Битюга и Хопра, впервые было показана отразили пространственная неоднородность плоских междуречий была показана их мозаичность, которая была обусловлена именно специфичным гидрологическим режимом. Тем не менее, ранние исследования носили преимущественно описательный характер, а теоретическое объяснение генезиса и функциональной роли западинных урочищ оставалось не раскрытыми.

Далее важную роль в формировании научных представлений о низменности сыграли исследования её геолого-геоморфологического строения, выполненные А. А. Вирским, Н. А. Богословским, А. А. Дубянским, М. Н. Грищенко, Б. Ф. Добрыниным, Г. В. Заниным, А. И.

Спирidonовым, Г. И. Раскатовым, Н. В. Тарасевичем и др. В их работах была показана роль тектонических движений и экзогенных процессов в формировании выположенных междуречий.

Параллельно с геолого-геоморфологическими исследованиями региона шло развитие почвенного направления, где ведущую роль сыграл В. В. Докучаев. В фундаментальном труде «Русский чернозем» (1936) Докучаев описал характеристики почв междуречных равнин, однако с ним были выделены здесь только типичные чернозёмы не испытывающих дополнительного увлажнения, но и их «специфичные» песчаные разновидности в долинах Цны и Вороны. Продолжением этих исследований стали работы Г. М. Тумина (1915, 1916) и А. М. Панкова (1930), значительно расширившие морфологическое описание чернозёмных почв и уточнившие их пространственные границы распространения. Однако на первых этапах все еще оставались открытыми теоретические вопросы, связанные с механизмами и условиями формирования почв, их сопряжений и внутренней дифференциацией разновидностей почв, особенно в западинных урочищах.

Существенный вклад в развитие теории внутриландшафтной почвенной дифференциации региона внесли исследования Н. Н. Розова, который впервые обосновал необходимость выделения лугово-чернозёмных почв в самостоятельный тип, существенно отличающийся от типичных чернозёмов условиями повышенного увлажнения (Розов, Вадковская, 1956). В продолжение этого направления были выполнены исследования Т. И. Попова (1914), подробно изучившего особенности осолоделых почв, и работы М. М. Рыбакова (1939), который значительно уточнил их морфологическую структуру. Однако это все еще были описательные работы и вопрос о теоретическом обосновании механизмов формирования гидроморфных почв и роли избыточного увлажнения в пространственной дифференциации почв оставался нерешённым и оставался дискуссионным и методологически не структурированным.

На следующем этапе исследования приобрели комплексный характер, ознаменовав переход от преимущественно описательных работ к детальным стационарным наблюдениям и режимным исследованиям, направленным на понимание функциональных взаимосвязей природных компонентов и их динамики. Наиболее детальные представления о структуре почвенных комплексов западинных урочищ были сформулированы в исследованиях Б. П. Ахтырцева (1960, 1962, 1965, 1967, 1968, 1971, 1972, 1974), Е. М. Самойловой и И. В. Якушевской (1970). Пик этих исследований пришёлся на 1960–1970-е годы XX века — период, характеризующийся наиболее интенсивным увлажнением в регионе за последние сто лет. Авторами были детально охарактеризованы ряды почв возрастающего гидроморфизма, включающие полугидроморфные и гидроморфные почвы (чернозёмно-луговые, осолоделые,

солонцеватые и болотные). Была выявлена устойчивая зависимость их пространственного распределения от морфометрических характеристик микрорельефа и сезонной динамики увлажнения, при этом отмечалось значительное преобладание именно гидроморфных разновидностей чернозёмных почв. Эти исследования заложили основу концептуализации западинных комплексов как структурно-функциональных единиц, определяющих внутриландшафтную гидрологическую специфику и функциональную неоднородность территории Окско-Донской низменности.

В этот период было впервые чётко обозначено, что для территории Окско-Донской низменности характерно широкое распространение процессов гидроморфизма, проявляющихся в переувлажнении почв и формировании специфических условий водного и биогеохимического режима. Явление гидроморфизма, хотя и наблюдается в различных природных зонах, именно в условиях слабодренированных междуречных пространств лесостепной низменности приобретает системообразующее значение. Основой гидроморфизма является устойчивое или сезонное накопление избыточной влаги, поступающей не только с атмосферными осадками, но и за счёт поверхностного стока и подъёма грунтовых вод. Подобная многокомпонентность водоснабжения приводит к формированию обособленных ландшафтных комплексов с особыми почвенными и биогеохимическими характеристиками.

Однако после активного периода изучения гидроморфизма в 1960–1980-е годы наступил почти двадцатилетний перерыв, когда число исследований резко сократилось, что во многом было связано с изменением приоритетов и сокращением финансирования. Возобновление интереса к вопросам гидроморфизма и его влиянию на структуру ландшафтов и продуктивность территорий произошло лишь в начале 2000-х годов.

Современные проявления гидроморфизма в ландшафтах северной части Окско-Донской низменности были описаны в работах Ф. Р. Зайдельмана, А. С. Никифоровой, Л. В. Степановой (2002, 2006), С. Б. Сафронова (2008). Эти исследования показали не только значительное распространение переувлажнённых почв, но и их влияние на сельское хозяйство, трансформацию агроландшафтов и экологическое состояние территорий. На юге низменности изучением подобных процессов занимался А. В. Трубников (2009), указавший на необходимость пересмотра существующих схем функциональной организации ландшафтов с учётом контрастной пространственной динамики водного режима междуречий Окско-Донской низменности.

Особого внимания заслуживает эволюция картографических представлений о пространственной структуре почвенного покрова Тамбовской области, расположенной в пределах Окско-Донской низменности. Несмотря на то, что ещё в 1960–1970-е годы в

результате многолетних полевых и почвенно-генетических исследований было установлено широкое распространение лугово-чернозёмных почв на междуречных водоразделах, эти данные не нашли отражения на официальных картографических материалах. В частности, на почвенной карте 1958 года, составленной отделом землеустройства и севооборотов Тамбовского областного управления сельского хозяйства (рис. 1), а также на более поздней карте 1981 года, опубликованной в Атласе Тамбовской области под редакцией К. К. Мусикова и А. М. Кириллова (рис. 1), междуречья изображены как области преимущественного распространения выщелоченных чернозёмов. Подобное расхождение могло быть обусловлено как методическими трудностями диагностики полугидроморфных и гидроморфных почв, требующими глубокого профиля, так и естественными причинами - в частности, тем, что сбор полевых материалов приходился на годы с пониженным уровнем атмосферного увлажнения, в результате чего характерные признаки переувлажнения в почвах проявлялись слабо или отсутствовали вовсе. Хотя масштаб указанных карт (1:1 250 000) соответствовал требованиям регионального планирования землепользования, они не позволяли достоверно отразить пространственное разнообразие почв и существенно упрощали реальную картину и динамику их распределения. Это особенно проявлялось в отношении полугидроморфных и гидроморфных почв междуречных пространств, информация о которых практически отсутствовала. Такое же положение дел представлено и региональном сводном обзоре «Тамбовская лесостепь...» (2013) (рис. 1.) почвенный покров области продолжает интерпретироваться на основе картографических материалов 1958 и 1981 годов. В результате и в этом источнике междуречные пространства представлены преимущественно как зоны распространения выщелоченных чернозёмов.



Рисунок 1. Различное соотношение не испытывающих (чернозем типичный, выщелоченный) и испытывающих (лугово-черноземный, черноземно-луговых) избыточного увлажнения почв на почвенных картах в годы различного составления

Лишь при составлении Почвенной карты РСФСР 1988 года (рис. 1) сведения о преобладании лугово-чернозёмных почв в пределах междуречий Окско-Донской низменности были впервые обобщены на картографическом уровне. Эта карта стала результатом систематизации материалов третьего тура почвенных обследований, проводившихся под научным руководством Б. П. Ахтырцева и пришедшихся на пик увлажнённости 1960–1970-х годов - одного из самых влажных периодов в истории наблюдений за климатом лесостепи. Для Окско-Донской низменности данная карта стала первым официальным картографическим документом, в котором было зафиксировано широкое распространение полугидроморфных и гидроморфных чернозёмов на слабо дренируемых междуречьях.

1.2 Качественные модели организации ландшафтов Окско-Донской низменности

Одним из ключевых направлений в формировании качественных моделей пространственной организации ландшафтов Окско-Донской низменности является интерпретация ландшафтной структуры через особенности водного режима почв. Представления о типах увлажнения и их роли в формировании почвенно-ландшафтных комплексов получили развитие в рамках отечественной школы генетического почвоведения, начиная с работ В. В. Докучаева, и впоследствии были теоретически обобщены в трудах С. С. Неуструева, А. А. Роде, Г. Н. Высоцкого, Н. М. Сибирцева, К. К. Гедройца, А. И. Брудастова, Б. П. Ахтырцева и других исследователей.

Ещё в своих ранних работах В. В. Докучаев (1900) подчёркивал, что почвы могут формироваться как в условиях «нормального» поступления влаги, так и при «сверхнормальном» увлажнении. Он обращал внимание на то, что даже в пределах степной зоны встречаются переувлажнённые почвы, что указывает на значительную роль локальных гидрологических условий. Продолжая эту линию, Н. М. Сибирцев (1899) включил переувлажнённые почвы в один из верхних таксономических уровней своей классификации, отнеся их к интразональным типам. Г. Н. Высоцкий (1906) расширил это понимание, введя понятие «совершенно интразональных почв», подчёркивая их формирование вне зональных закономерностей, в условиях стабильного или сезонного избыточного увлажнения. Термин «гидроморфные почвы» был впервые предложен С. С. Неуструевым (1930), который определял их как почвы, испытывающие избыточное по сравнению с зональными условиями поступление влаги. Он акцентировал внимание на сезонном или постоянном застое воды, приводящем к насыщению верхней части почвенного профиля влагой, накоплению инвазивных соединений и формированию анаэробных условий. Эти идеи легли в основу теории гидроморфизма, впоследствии развитой в трудах А. А. Роде.

Согласно концепции (модели) А. А. Роде (1952), водный режим почв представляет собой результат взаимодействия климатически обусловленного влагопоступления и локальных условий аккумуляции воды. Он разграничивал нормальное увлажнение, обусловленное выпадением атмосферных осадков в пределах зонального режима, и переувлажнение — как результат дополнительного поступления влаги за счёт поверхностного стока, капиллярного подъёма и сезонного подтопления. Для диагностики почв по водному режиму Роде предложил разделение на две категории: нормальная влажность (уровень влаги не превышает наименьшую влагоёмкость) и повышенная влажность (влага превышает этот уровень, создавая условия для анаэробного режима).

Механизмы и признаки переувлажнения почв лесостепи были предметом углублённого изучения в работах А. И. Брудасова (1955), А. А. Роде (1947, 1952) и К. С. Ковды (1974). Исследования показали, что избыточное увлажнение способствует активизации анаэробных микроорганизмов, запускающих процессы кислотного гидролиза, восстановление ионов железа и марганца, и последующую миграцию этих элементов. При временном (сезонном) переувлажнении формируются пятнистые окраски - результат частичного восстановления железа и марганца. При постоянном гидроморфизме преобладают восстановленные формы, придающие почвенным горизонтам характерный цианистый, голубовато-серый оттенок (Роде, 1952; Ковда, 1974). Диагностика таких почв в ландшафтах опирается на анализ морфологического облика горизонтов, в частности - их цвета, а также на пространственное распределение водорастворимых соединений железа, марганца и вторичных карбонатов, возникающих при восстановительном режиме в верхней части профиля.

Таким образом, модель водного режима почв, основанная на классификации типов увлажнения и механизмах формирования гидроморфных признаков, теоретически создаёт основу для качественного описания пространственной неоднородности ландшафтов Окско-Донской низменности как следствия дифференциации по степени влагонакопления и характеру водного режима. Однако в условиях высокой морфологической сложности, характерной для экотонных территорий лесостепи, а также нестабильности климатических факторов, целостная концептуальная модель, связывающая морфологические признаки почвенных профилей с режимом их функционирования, не была сформулирована. В отличие от районов Нечерноземной зоны, где такая взаимосвязь получила более чёткое теоретическое и практическое оформление, для ландшафтов лесостепной низменности она сохраняется на уровне частных интерпретаций и требует дальнейшей систематизации и уточнения.

Наиболее полная качественная модель организации ландшафтов лесостепи Окско-Донской низменности была предложена Ф. Н. Мильковым и получила развитие в рамках географической школы Воронежского университета. Её основой послужили

картографические и типологические подходы, направленные на выявление закономерностей морфологической структуры природных комплексов. Наиболее развёрнутая типологическая характеристика территории представлена в коллективной монографии «Физико-географическое районирование центральных черноземных областей» (1961), где материал по низменности был подготовлен Ф. В. Тарасовым. В последующих работах Ф. Н. Милькова и его соавторов (Мильков, Ахтырцева, Дроздов и др., 1976) была предложена концепция типов местности, в рамках которой Окско-Донская низменность интерпретируется как плоскоместье с выраженной мозаикой урочищ различного генезиса. Эти подходы заложили основу структурной типологии, позволяющей выделять как природные, так и антропогенно трансформированные ландшафты.

Типологический подход, разработанный Ф. Н. Мильковым, стал важнейшим этапом в формировании представлений о структурной организации ландшафтов Окско-Донской низменности. В рамках данной концепции подчёркивается принципиальное различие между природными и антропогенными ландшафтами: первые формируются исключительно под действием природных факторов, вторые являются результатом хозяйственного освоения территории и отражают степень её трансформации под влиянием антропогенной нагрузки (Мильков, 1966).

Центральным понятием типологической системы выступает тип местности, трактуемый как морфологически и функционально целостный ландшафтный комплекс, обладающий закономерным сочетанием урочищ и устойчивый в пределах одного природного региона. Тип местности в концепции Ф. Н. Милькова рассматривается не как административно или регионально ограниченная единица, а как структурная форма, способная к дискретному распространению. Это принципиально отличает типологический подход от регионального, поскольку последний опирается на территориальную непрерывность ареалов, тогда как типологические единицы выделяются на основе повторяемости морфологических признаков независимо от территориальной смежности. Такое понимание позволяет наиболее адекватно описывать природную мозаичность, типичную для ландшафтов Окско-Донской низменности, в том числе существование чередующихся автоморфных и гидроморфных урочищ в пределах одного междуречья.

Ключевым критерием для выделения типов местности служат морфологические взаимосвязи между урочищами, отражающие характер внутренней дифференциации территории, закономерности сочленения фаций и урочищ, а также особенности функционирования ландшафта в целом. Подобная логика оказывается особенно продуктивной для изучения слабодренированных равнин, к которым относится Окско-Донская низменность, где пространственная организация природных комплексов определяется не только

историческими процессами морфогенеза, но и современным водным режимом, включающим замкнутые микропонижения, пологие склоны и микроплато. Именно эти элементы в значительной степени определяют гидрологическую специфику и функциональную неоднородность ландшафтов низменности.

Применительно к ландшафтам лесостепи Русской равнины, включая Окско-Донскую низменность, Ф. Н. Мильков (1966) выделил восемь основных типов местности: пойменный, надпойменно-террасовый, приречный (склоновый), плакорный, междуречный недренированный, водораздельно-зандровый, останцево-водораздельный и низкогорный. Эти типы описывают морфологическое и функциональное разнообразие природных комплексов, отражающееся в характере рельефа, типе почв, степени дренированности и преобладающем режиме влагонакопления. Землепользования (рис.2,3).

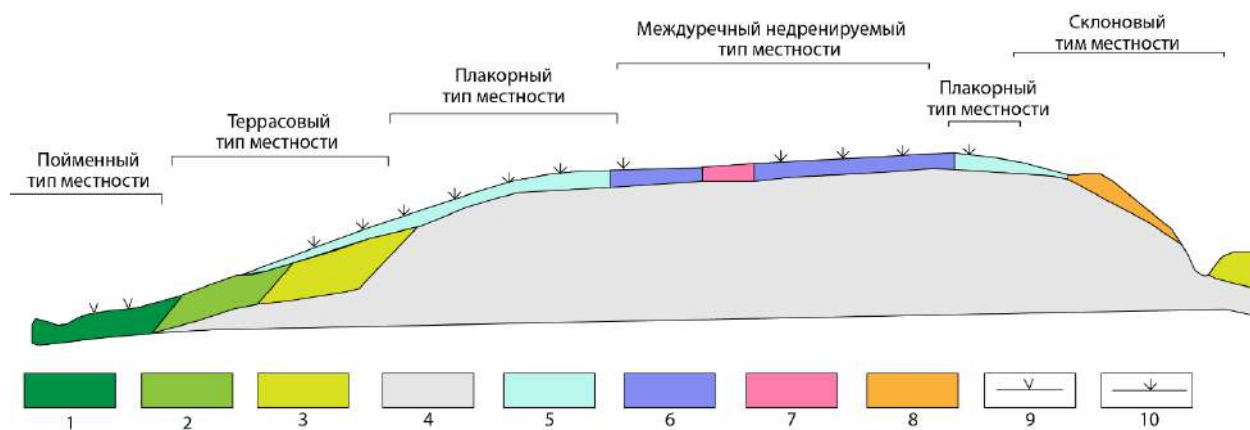


Рисунок 2. Обобщенный ландшафтный профиль междуречий Окско-Донской низменности: 1 - аллювий пойменной террасы, 2 - песчаный аллювий I надпойменной террасы, 3 - супесчаный и лессовый аллювий верхних надпойменных террас, 4 - коренные породы, 5 - типичный чернозем, черноземно-луговые почвы, 6 - лугово-черноземные и черноземно луговые почвы, 7 - солодь, 8 - оподзоленные черноземы и серые лесные почвы, 9 - луговая растительность, 10 - степная растительность (Ф.Н. Мильков 1976)

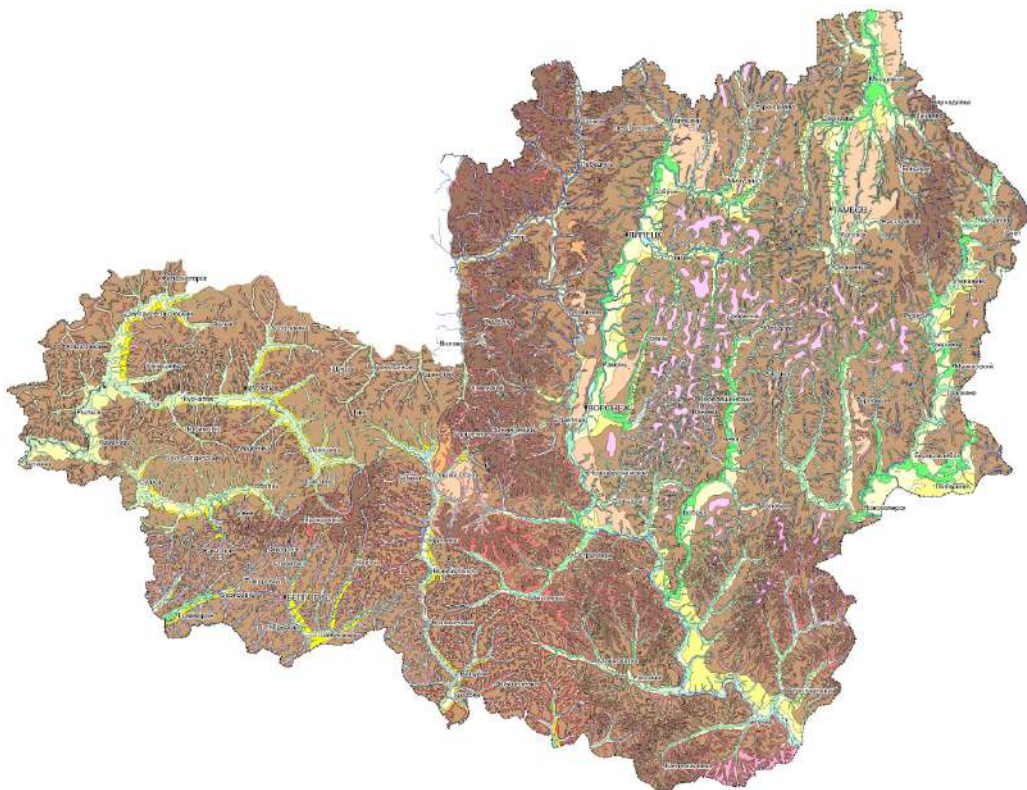


Рисунок 3. Ландшафтная карта Центрального Черноземья (Под ред. Милькова Ф.Н. 1978)

Однако несмотря на свою значимость качественных моделей пространственно временной организации почв и ландшафтов Окско-Донской низменности, до настоящего времени недостаточно разработан вопрос функционирования западных урочищ как ключевых звеньев водного режима ландшафтов. В научной литературе преобладают качественные описания морфологических особенностей почв и элементов микрорельефа, тогда как количественные оценки их вклада в перераспределение влаги остаются фрагментарными.

Таким образом, данная работа направлена на восполнение этих пробелов за счёт: количественно уточнения вклада западных урочищ в функционировании междуречно-недренируемого типа местности и всего междуречья как такового, а так же их отклик на климатическую цикличность используя теоретические физико-математические модели водного режима в постановки краевой задачи и параметризации учитывающих как физические особенности почв так климатическую гидротермическую изменчивость лесостепи Окско-Донской низменности.

На протяжении нескольких десятилетий представления о структурно-функциональной организации ландшафтов Окско-Донской низменности в целом сохранялись на уровне, сформированном в работах середины XX века. По различным причинам в течение почти тридцати лет методологические подходы в этом направлении не подвергались существенному

пересмотру. Основное внимание сохранялось за качественными описательными подходами, основанными на морфологической типологии и стационарных наблюдениях.

В то же время в международной научной практике, особенно в Канаде, исследования подобных природных комплексов развивались непрерывно. Одним из ведущих научных центров в этой области стал Глобальный институт водной безопасности Университета Саскачевана (Global Institute for Water Security, GIWS, at the University of Saskatchewan, USask), где реализуются масштабные междисциплинарные проекты на стыке генетического почвоведения, гидрологии почв и ландшафтоведения с применением физико-математического и имитационного моделирования. Одним из ключевых регионов исследований института является область прерийных подхолмов (Prairie Pothole Region) — обширная территория на севере Великих равнин, характеризующаяся высокой плотностью замкнутых понижений различного размера. Ландшафты этой территории можно рассматривать как физико-географический аналог западинных урочищ лесостепной части Окско-Донской низменности, однако формирующийся в условиях более высокого и устойчивого увлажнения (рис 4). В большинстве случаев днища западин прерийных подхолмов остаются стабильно затопленными и функционируют как водно-болотные угодья. В отличие от них, днища западин Окско-Донской низменности в летний период, как правило, осушаются, а эфемерные условия имеют сезонный и переменный характер. Почвенные катены в пределах подхолмов развиваются в условиях стабильного избыточного увлажнения, что способствует развитию глеевых горизонтов и длительному анаэробному режиму. В условиях Окско-Донской низменности почвенные катены формируются в результате контрастов между автоморфными и временно переувлажнёнными микропозициями, отражая более динамичное взаимодействие между микрорельефом и режимом влагонакопления.

Среди ключевых направлений работы научной группы Университета Саскачевана можно выделить: моделирование поверхностного и внутрипочвенного стока на уровне мелких водосборов, оценку трансформации гидрологического режима при различных климатических сценариях и приёмах агротехники (Dumanski, 2015; Ehsanzadeh, 2015; Elliott, 2001), а также разработку прикладных решений, направленных на экономическую оценку восстановления деградированных почв - в том числе через их вывод из сельскохозяйственного использования, залужение и повышение потенциала секвестрации органического углерода (Alcock, 2017).

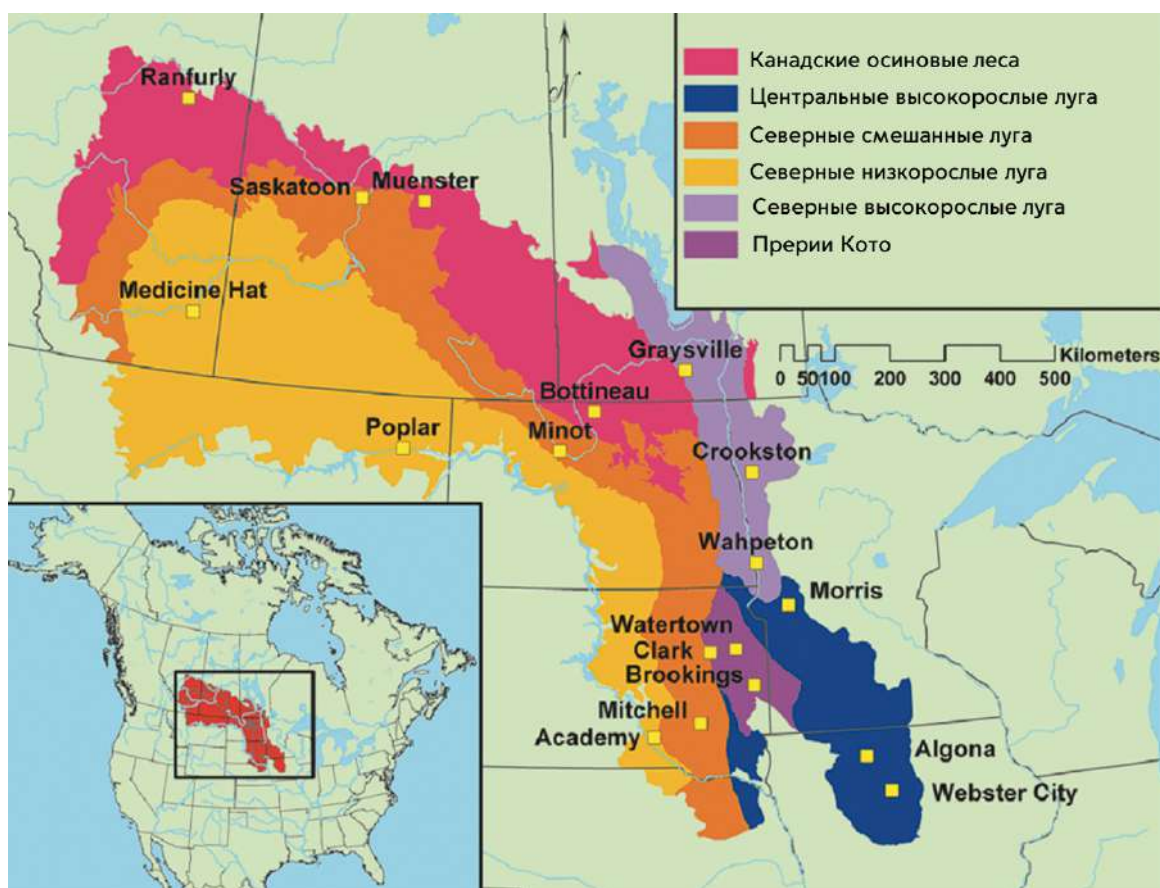


Рисунок 4. Регион Прерий-Потхоллов

Именно поэтому методические подходы и модели, разработанные для условий региона прерийных подхоллов, не могут быть напрямую перенесены на ландшафты западного комплекса лесостепной части Окско-Донской низменности. Существенные различия в режимах увлажнения, микрорельефе, почвенной мозаичности и динамике водного режима требуют адаптации существующих методологий и моделей с учётом региональной специфики. Подход к адаптации методики и обоснование схемы исследования влияния западин на гидрологическое функционирование ландшафтов лесостепи Окско-Донской низменности, применяемой в рамках настоящей работы, подробно изложены в главе 3.

Глава 2. Физико – географическая характеристика Окско-Донской низменности

2.1 Геоло-геоморфологическое строение

Окско-Донская низменность занимает обширную территорию, ограниченную с севера долиной реки Оки, а с южной стороны — Калачской возвышенностью (рис. 5). С запада её рубежи совпадают с границами Среднерусской возвышенности, тогда как на востоке она граничит с Приволжской возвышенностью. В состав данной физико-географической области входят значительная часть территории Тамбовской области (включая Тамбовскую равнину), восточная часть Липецкой области, а также районы Воронежской области, расположенные восточнее рек Дон и Воронеж. Кроме того, северные окраины низменности захватывают южные районы Рязанской области (рис 5).

Абсолютные высоты в пределах междуречных пространств, как правило, составляют 150–180 метров над уровнем моря, что обуславливает их слабую дренированность. Однако в юго-западных районах, к югу от Тамбова, особенно в пределах водораздельных пространств между реками Сухая Липовица и Матыра, встречаются участки, где высоты достигают 200–219 метров.

С точки зрения геологической истории, начиная с неогенового времени территория Окско-Донской низменности являлась областью тектонического опускания. Эти процессы способствовали накоплению мощной толщи рыхлых песчаных и глинистых осадков кайнозойского возраста, определивших современное строение геологических и геоморфологических комплексов региона. Донской выступ днепровского ледника не оказал значительного влияния на геоморфологию территории и слабо отразился в рельефе. Суглинистая морена, залегающая под лессовидными покровными суглинками, приурочена к междуречным пространствам, в то время как в речных долинах она размыта и замещена водно-ледниковыми и аллювиальными отложениями. Средняя мощность морены составляет 10–12 м, однако в верховьях рек Сухой Липовицы и Матыры она может достигать 70 м. Под мореной залегает ергенинская свита опесчаненных суглинков (верхний неоген и начало четвертичного периода). Более древние отложения представлены песчано-глинистыми толщами нижнего мела и юры. В южной части равнины, ближе к Калачской возвышенности, встречаются верхнемеловые отложения, а в основании низменности, на значительной глубине, залегают карбоновые породы на севере и верхнедевонские – в большинстве районов.

Водораздельные поверхности и речные долины низменности имеют асимметричное строение и значительную ширину, что связано с неглубоким (до 50 м) врезом речных долин и наличием рыхлых отложений. В целом низменность характеризуется спокойным, почти плоским рельефом, который местами нарушается небольшими западинами — степными

блюдцами. Овражно-балочный рельеф не является типичным и встречается редко, главным образом на речных склонах. В пределах Тамбовской равнины овраги и балки занимают от 2 до 5%, местами до 8% площади, что существенно меньше, чем на Среднерусской возвышенности в Воронежской области. На значительной части территории равнины эрозионные процессы практически не развиты (рис 6).

Выположенная поверхность водоразделов способствует замедлению поверхностного стока. Многочисленные степные западины, весной превращающиеся в небольшие временные водоемы, играют важную роль в регулировании стока, перехватывая его в подземный дренаж. Реки низменности имеют равнинный характер, образуя меандры в пределах пойм, где встречаются многочисленные протоки, рукава и старицы.

Покровные оледенения раннего и среднего плейстоцена значительно повлияли на геологическое строение Окско-Донской низменности, но по-разному сказались на формировании литологического строения северной и южной части региона. В северной и северо-западной части (рис. 6) на междуречьях залегает валунно-суглинистая морена донского возраста (с 2-3 метров), перекрытая толщей флювиогляциальных (в результате таяния московского ледника) и аллювиальных отложений. Междуречья повсеместно перекрыты средними и тяжелыми лессовидными суглинками. В южной части морена залегает на глубине более 10 метров, а сверху преобладают лессовидные тяжелые суглинки и глины, мощность которых уменьшается до первых метров на склонах к долинам рек. Широкие долинные зандры крупных рек (Цна, Битюг, Ворона, Савала) и надпойменные террасы малых рек сложены облегченными водно-ледниковыми отложениями. Непосредственно по долинам рек распространены аллювиальные отложения, преимущественно, тяжелого гранулометрического состава (рис. 7).

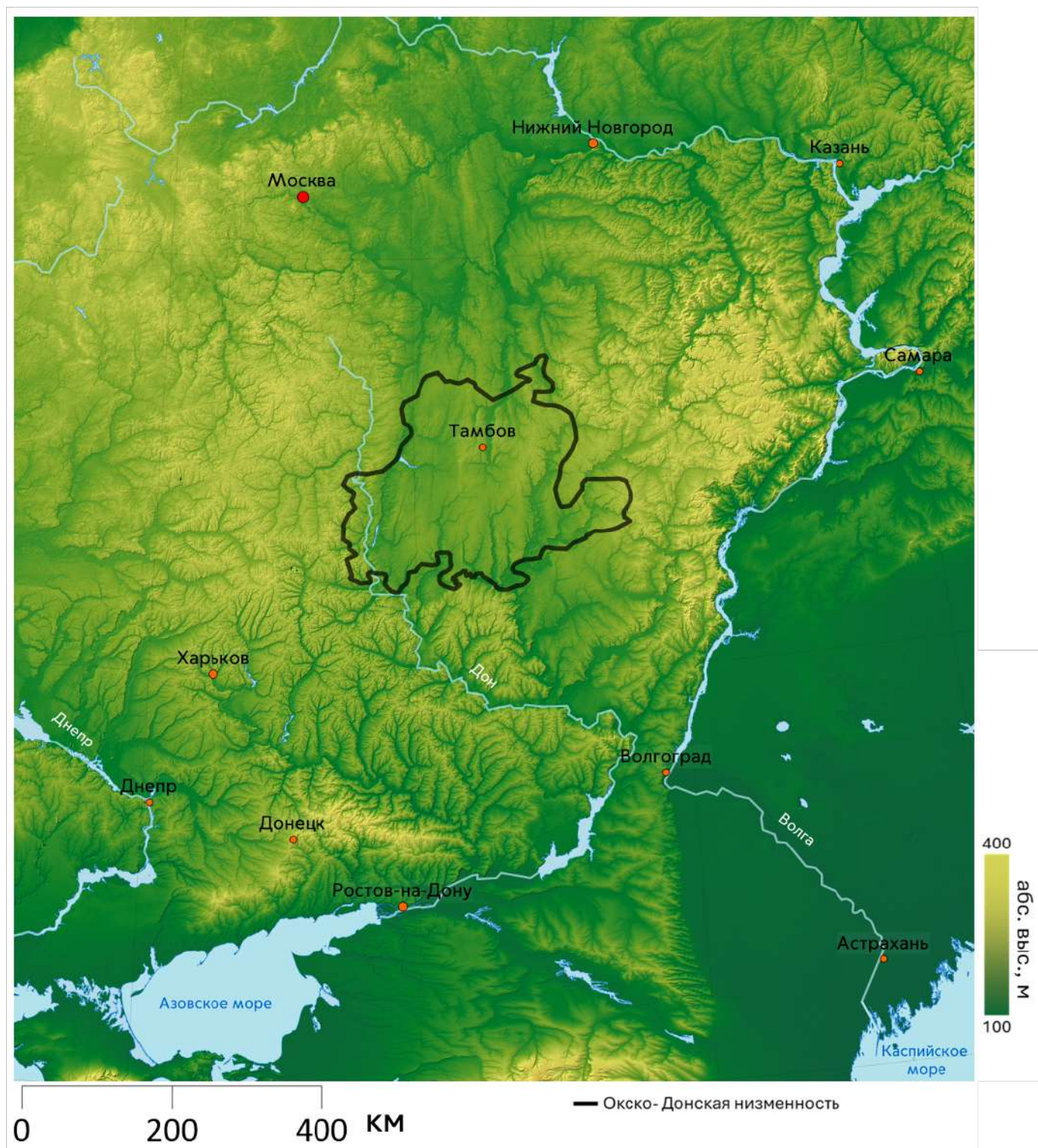


Рисунок 5. Рельеф и границы Окско-Донской низменности

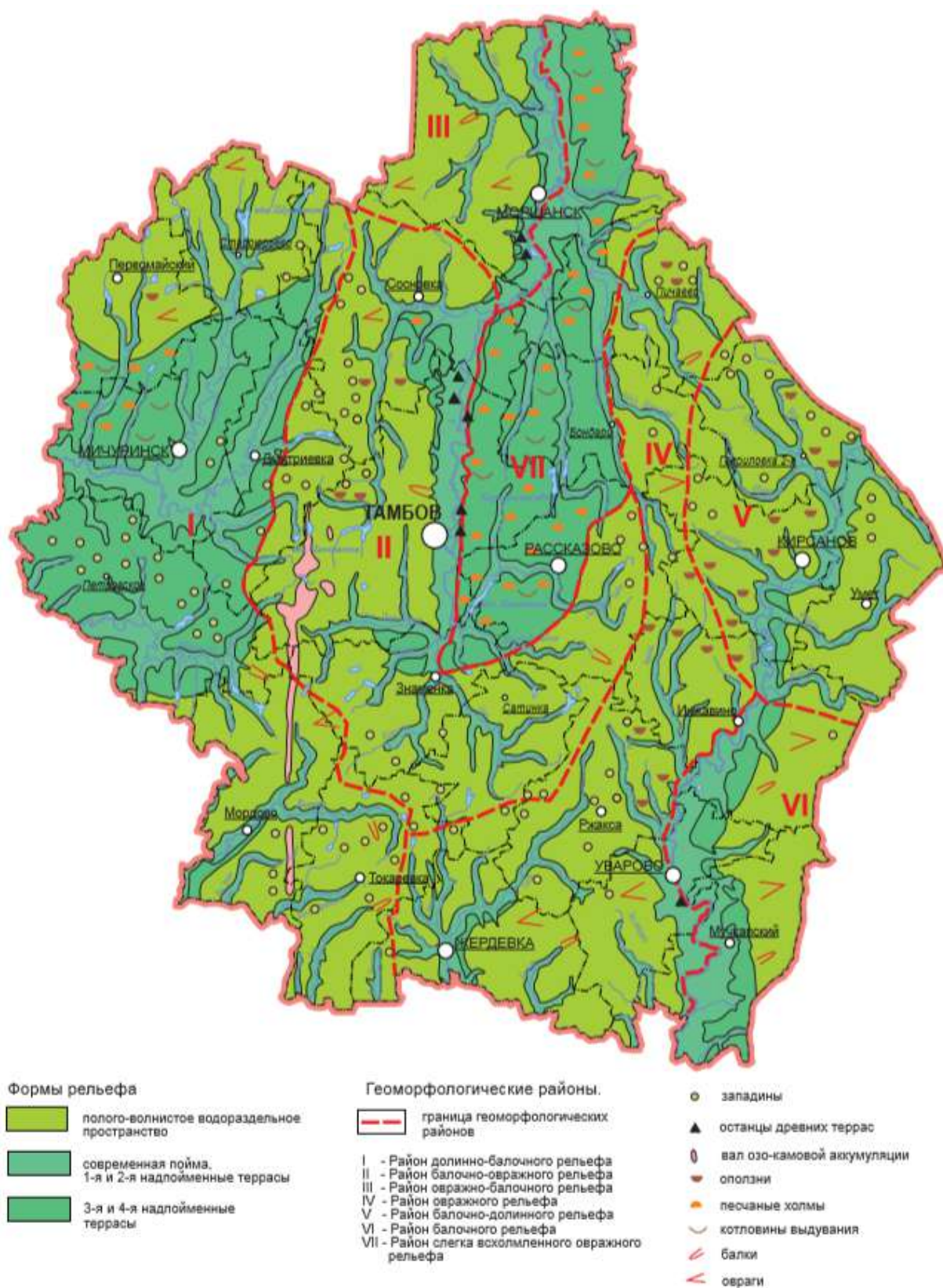


Рисунок 6. Геоморфологическая карта Окско-Донской низменности в пределах Тамбовской области. Авторы: Б.Е. Петухов, А.А. Липецких 2013.

2.2 Климатические особенности экотона лесостепи

Климат Окско-Донской низменности характеризуется умеренно холодной зимой и сравнительно жарким летом. Зимой атмосферное давление убывает с востока на запад, а летом — с запада на восток, что является типичной особенностью для Центрального Черноземья. В связи с этим, в переходные сезоны, такие как весна и осень, возможны резкие колебания атмосферного давления. Среднегодовая сумма солнечной радиации в Тамбовской области варьируется от 968 кВт/м² на севере до 1070 кВт/м² на юге.

Средняя годовая температура воздуха в Окско-Донской низменности области варьируется от +6,4°C на севере области до +8,4°C на юге. Такая разница в температурах имеет значение для лесостепной агроклиматической зоны, поскольку в семи аридных условиях это влияет на продолжительность вегетационного периода. Сумма температур за период с температурами выше +10°C на севере Тамбовской области составляет около 2700°C, а на юге может достигать более 3200°C. Длительность безморозного периода в Окско-Донской низменности составляет 168 дней (с конца апреля по начало октября), что несколько короче, чем в других районах Черноземья, например, в Белгородской области, где безморозный период может длиться до 196 дней.

Атмосферные осадки в Окско-Донской низменности распределены в рамках диапазонов лесостепи неравномерно: на юге области медианное количество осадков около 560 мм, в то время как на севере их количество достигает 680 мм. Так же присутствует градиент с запада на восток, в среднем количество осадков за вегетационный период (с температурами выше +10°C) варьируется от 290 мм на востоке области до 340 мм на западе (рис. 8).

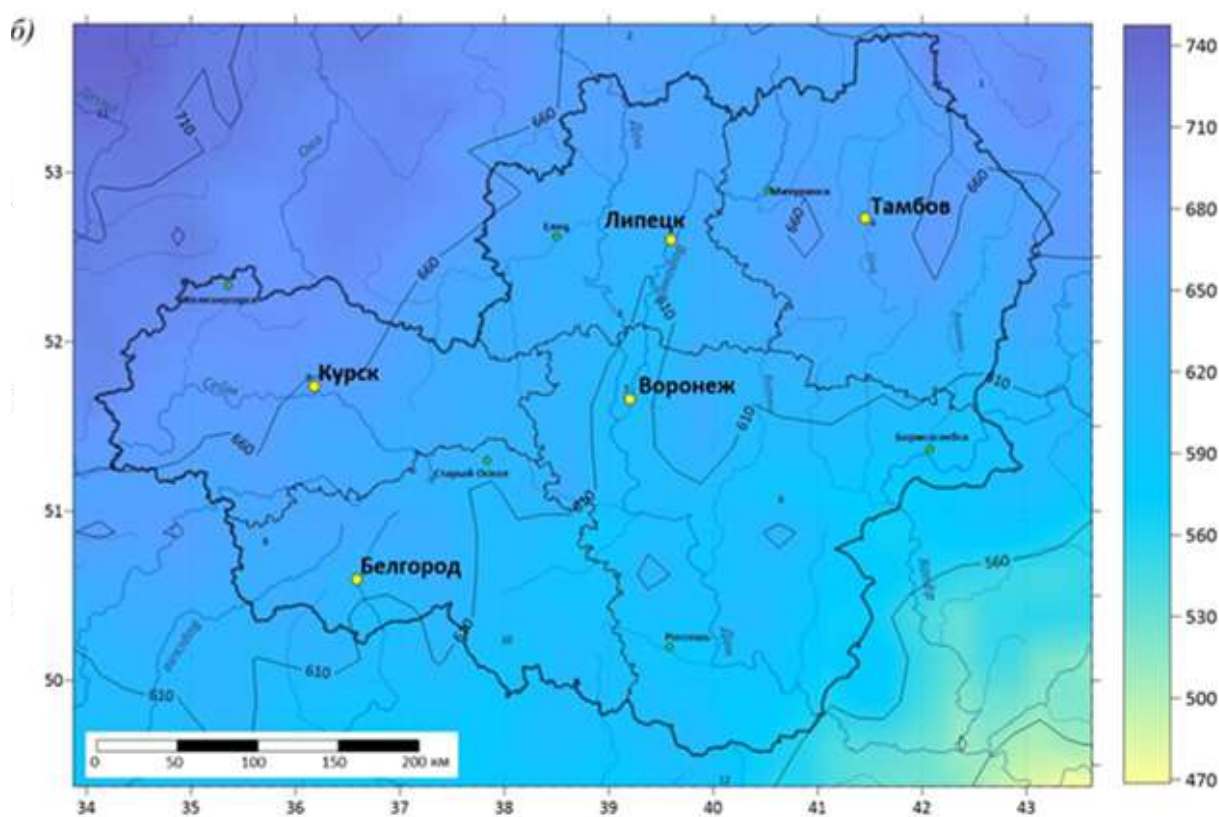
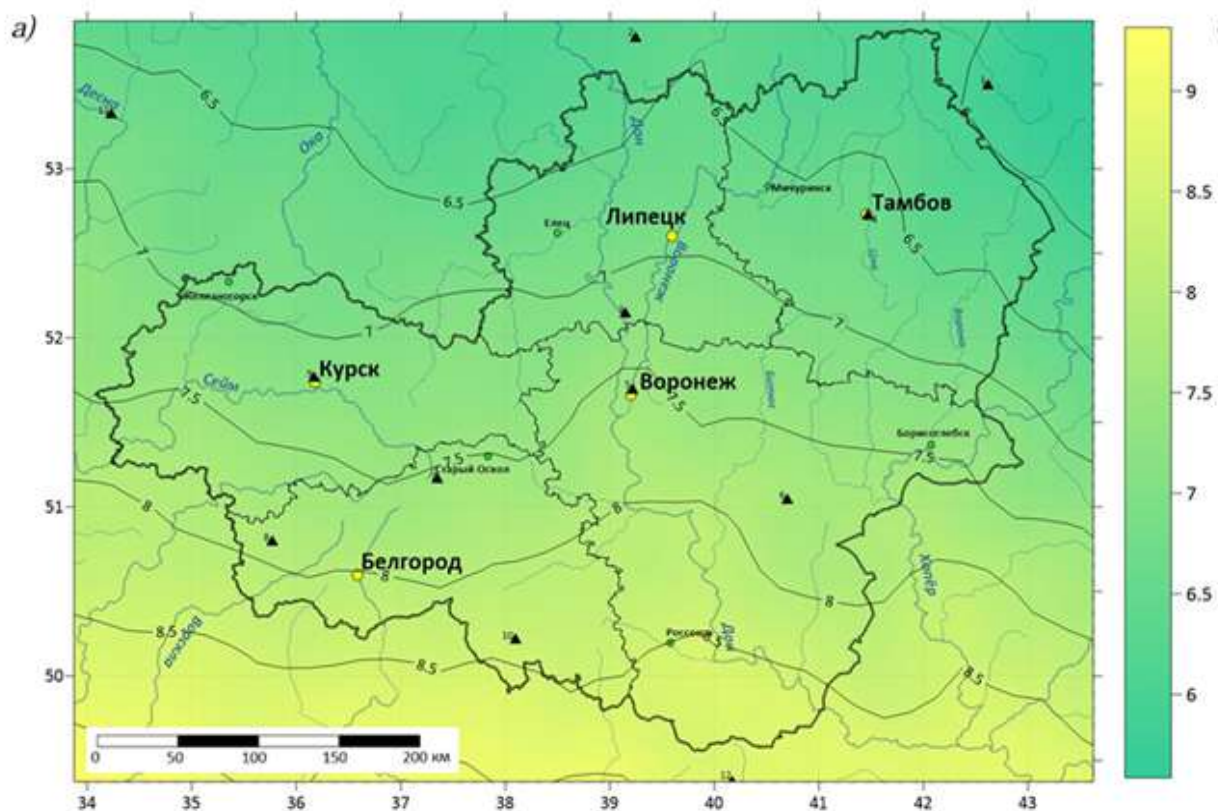


Рисунок 8 – Среднегодовая температура воздуха (а) и годовая сумма осадков (б) Центрального Черноземья (ERA 5)

Зима в Окско-Донской низменности наступает в конце ноября, а высота снежного покрова достигает максимума в декабре или январе, составляя 10-50 см. Средняя температура января на юго-западе области составляет $-5,2^{\circ}\text{C}$, а на северо-востоке — до $-8,5^{\circ}\text{C}$. Абсолютные минимумы температуры могут достигать -34°C на северо-востоке области, что указывает на более континентальный климат в этой части региона по сравнению с более южными и западными территориями, например, в Белгородской области, где температура в январе может быть около -5°C (рис. 9).

Лето в Окско-Донской низменности жаркое, со средней температурой июля от $+20,4^{\circ}\text{C}$ на севере до $+23^{\circ}\text{C}$ на юге. Абсолютные максимумы температуры в июле могут достигать $+39,5^{\circ}\text{C}$ на востоке области, что сходно с показателями в более южных регионах Центрального Черноземья. Сумма атмосферных осадков за период с температурами выше $+10^{\circ}\text{C}$ варьируется от 340 мм на западе области до 290 мм на востоке.

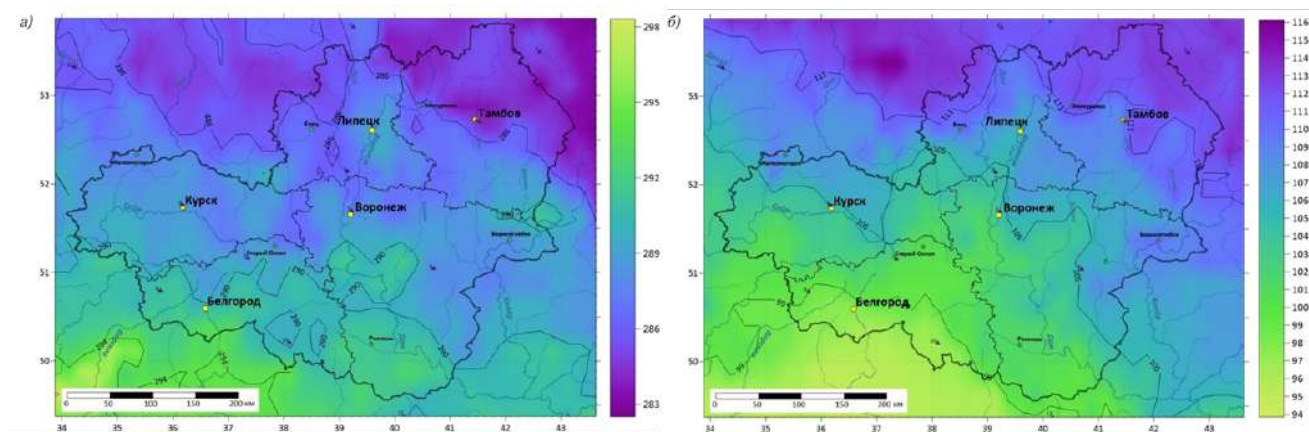


Рисунок 9 – День года по порядку начиная с 1 января, на который приходится среднегодовое первое осеннее заморозок (а) и последнее весеннее заморозок 290 день – 16 октября, 105 день – 15 апреля (ERA 5)

Засушливость территории по ГТК Селянинова, коэффициенту увлажнения Н.Н. Иванова-Г.Н. Высоцкого и радиационному индексу сухости М.И. Будыко увеличивается с северо-запада на юго-восток (рис. 10).

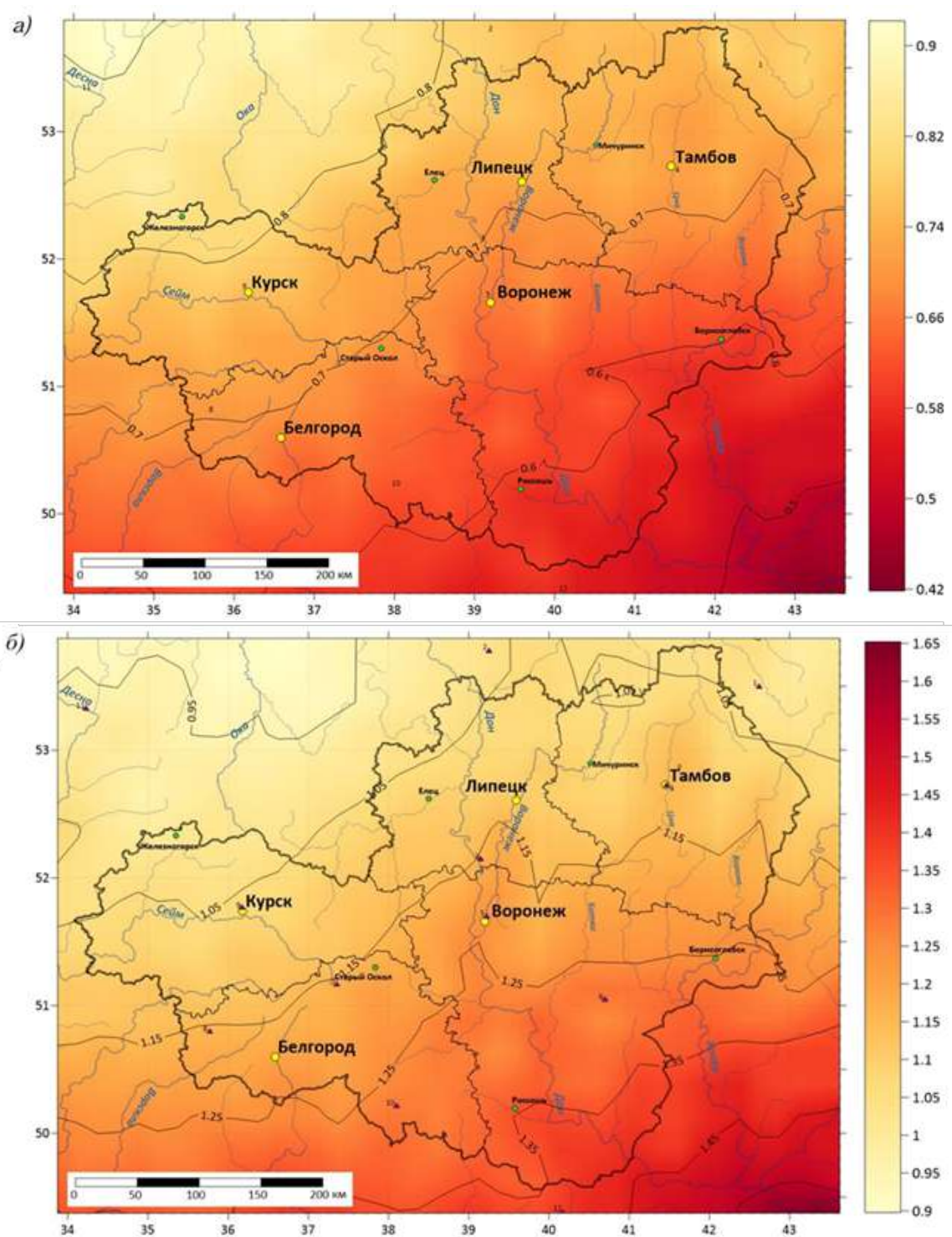


Рисунок 10 – Коэффициент увлажнения Н.Н. Иванова-Г.Н. Высоцкого (а) и радиационный индекс сухости М.И. Будыко (б) (ERA 5)

В южной части области часты засухи, которые проявляются в основном в мае и августе. Это явление, при котором сухие и горячие ветры с восточной составляющей оказывают влияние на состояние почвы и растений, повышает риск засухи в летний период.

Характерное варьирование гидроклиматических условий в 1936–2024 гг. для Окско-Донской низменности, можно видеть на графике среднегодового количества осадков по данным метеостанции г. Тамбов (рисунок 11). Главной составляющей динамики осадков является 12.6 летний цикл, в пределах которого среднегодовое количество осадков может варьировать на 150–200 мм, от 400 до 600 в год. В сочетании с особенностями поверхностного перераспределения осадков, связанного с изменяющимися границами водосборных площадей западин междуречий, вследствие перетекания количество поступающей влаги, может варьироваться в 2-4 раза для одних и тех же геоморфологических условий в течении цикла (рис 11).

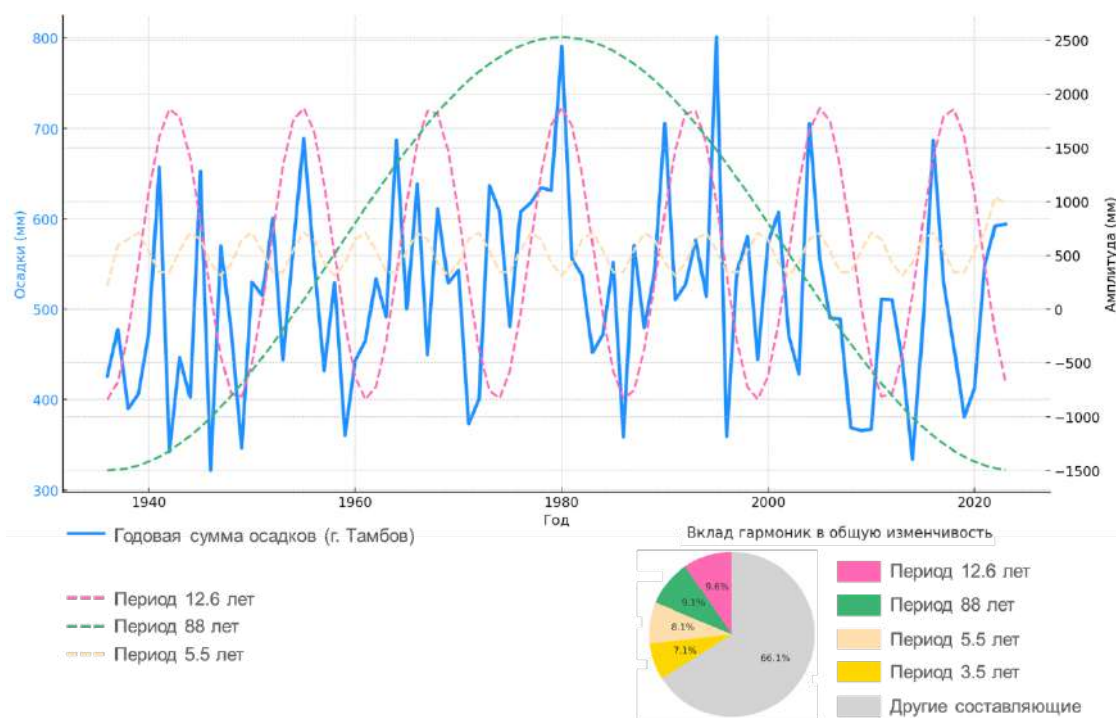


Рисунок 11. Динамика среднегодового количества осадков и частотные составляющие динамичности по данным метеостанции г. Тамбов

С точки зрения внутригодовой и межсезонной динамики снежного покрова Окско-Донская область низменность так же характеризуется высокими показателями изменчивости. В зависимости от особенностей года устойчивый снежный покров может формироваться как в середине ноября (1954) так и в конце декабря (2005) так и иногда не сформироваться вообще (2007). Мощность снежного покрова в случае его наличия, перед снеготаянием может варьироваться от 3 см (2020) до 80 см (1945), так же и дата схода снежного покрова от

середины февраля (2000) до середины апреля (2006). В таких изменчивых климатических условиях в пределах почв приуроченным к одним и тем же типам местности из года в год формируются различные гидротермические условия их функционирования (рис 12).

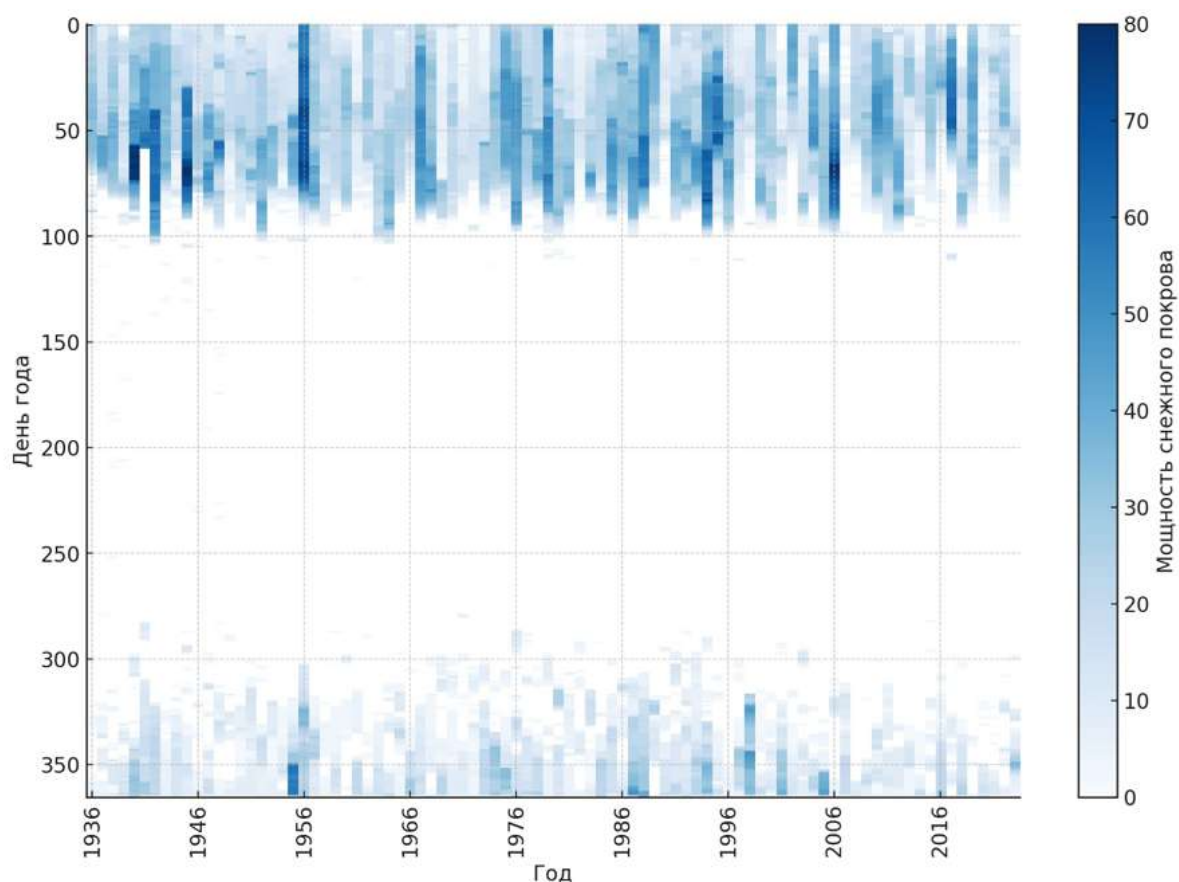


Рисунок 12. Диаграмма изменчивости снежного покрова данным метеостанции г. Тамбов

2.3 Почвы и структура почвенного покрова

Почвенный покров Тамбовской равнины получил всестороннее освещение в ряде научных работ. Значительный вклад в изучение черноземов региона внесли Г. М. Тумин (1915, 1916) и А. М. Панков (1921), чьи исследования стали основой для последующих почвенных классификаций. В дальнейшем Н. Н. Розов (1939) обосновал необходимость выделения лугово-черноземных почв в отдельный тип. До его работ такие почвы рассматривались лишь как разновидность высоко гумусных черноземов.

Развитие представлений о распределении почв по элементам рельефа и их генетической обусловленности связано с концепцией С. С. Неуструева (1915). Он предложил отказаться от термина «зональные почвы» в пользу понятия «зональные комбинации», включающих почвенные сочетания по мезорельефу и комплексы — по микрорельефу. Эти идеи легли в

основу научного подхода к изучению пространственной структуры почвенного покрова (по Добровольскому и Урусевской, 2004).

Проблематика осолодения почв равнинных территорий впервые была затронута в исследованиях Т. И. Попова (1914), а в дальнейшем получила развитие в трудах Б. П. Ахтырцева, П. Г. Адерикина и Г. М. Кадера (1975). Уже в ранних работах отмечалась выраженная зональность почв, связанная с рельефом и водным режимом.

Почвенный покров Окско-Донской низменности нашёл отражение в региональных почвенных картах Тамбовской, Воронежской и Липецкой областей. Так, на почвенной карте Тамбовской области (1952) основными типами почв указаны типичные и выщелоченные черноземы. В рамках почвенно-климатического районирования Центрально-Черноземного округа под редакцией П. Г. Адерикина (1957) территория Тамбовской равнины была подразделена на три района, отличающихся преобладанием мощных и выщелоченных черноземов.

При изучении междуречья Битюга и Воронежа Н. Н. Розов (1939) выявил участки лугово-черноземных почв, формирующихся в условиях широких понижений с близким залеганием грунтовых вод. В то же время на возвышенных и лучше дренированных участках водоразделов преобладали типичные тучные черноземы. Почвенно-мелиоративная карта Центрально-Черноземного округа зафиксировала обширные территории с глубинами грунтовых вод свыше 10 метров. Однако, как по этой карте, так и по более поздним картографическим источникам Тамбовской области, основными почвами междуречий остаются тучные черноземы.

Ранее предполагалось, что лугово-черноземные почвы имеют ограниченное распространение и приурочены, главным образом, к западинам. Эти выводы подтверждаются данными Б. П. Ахтырцева (1959), П. Г. Адерикина и Л. А. Лесниковой (1967), а также последующими наблюдениями Адерикина (1968), в которых подчёркивается отсутствие широкого развития этих почв на водоразделах. Работы Е. М. Самойловой и И. В. Якушевской (1969, 1970), в которых описаны водораздельные лугово-черноземные комплексы Тамбовской равнины на ключевых участках, противоречат данной точке зрения. Материалы полевых исследований, проведенных на территории Тамбовской равнины в 1968–1969 гг., свидетельствуют о том, что степные черноземы занимают незначительные участки, преимущественно в узких приречных и прибалочных зонах (Иванова и соавт.). Луговые почвы приурочены к понижениям на равнинах и формируются в межколочных участках в сочетаниях с дерновыми глеевыми солодами, а также группами солончаковых и луговых или солончаковатых луговых солонцов. Фон почвенного покрова на доминирующих водораздельных пространствах с усложненным дренажом способствует формированию лугово-черноземных почв.

Почвенный комплекс западин на территории Тамбовской равнины получил детальное освещение в ряде фундаментальных исследований. Существенный вклад в изучение этих ландшафтных элементов внесли В. К. Бугаевский (1972а, 1972б), А. Б. и Б. П. Ахтырцевы (1976, 1993), Е. М. Самойлова, И. В. Якушевская (1970), а также А. Д. Пряхин (1996, 1997). В этих работах подробно охарактеризована пространственная организация, морфология и типологическое разнообразие почв западин.

Отдельное внимание уделялось изучению лугово-черноземных и серых лесных почв, анализ которых позволил выделить их в самостоятельные типы, отличающиеся от черноземов и черноземно-луговых разновидностей (Ахтырцев А. Б., Адерихин П. Г., Ахтырцев Б. П., 1981). Позднейшие исследования подтвердили преобладание полугидроморфных и гидроморфных почв на равнинной территории Тамбовской области (Ахтырцев, 1999).

Широтная зональность почвенных сочетаний Тамбовской равнины, исследованная воронежскими почвоведом (Ахтырцев Б. П., Ахтырцев А. Б., 1993), проявляется особенно отчетливо. В основу дальнейшего изложения положено обобщение географических особенностей почвенного покрова региона, основанное на материалах этих и других авторов.

Структура почвенных комплексов в пределах крупных западин — как правило, покрытых древесно-кустарниковой растительностью и не затронутых пахотным использованием — была всесторонне описана А. Б. Ахтырцевым (1974а, 1982). В западинах наблюдается микрозональность, выражающаяся в кольцевом расположении почвенных типов. Эта структура обусловлена спецификой увлажнения, различной по интенсивности и продолжительности.

Мелкие и неглубокие западины (диаметром от нескольких до 20–35 метров и глубиной до 30–36 см) характеризуются, как правило, однородным почвенным строением. Здесь доминируют выщелоченные черноземно-луговые и тёмно-серые лесные почвы с поверхностно-глеево-элювиальными признаками и слабо выраженной дифференциацией по профилю.

Для временно затопляемых западинных болот, которые насыщаются влагой весной и осенью, а в летний период пересыхают, характерны торфяно-глеевые и лугово-болотные выщелоченные почвы. Эти почвы развиваются не только в днищах западин, но и на их склонах, вытесняя серые поверхностно-глеевые почвы к периферийным участкам (Ахтырцев А. Б., 1873, 1974б, 1981).

Переходная полоса между северной — Окской — и южной — Донской — частями равнины отличается особенно сложным, мозаичным почвенным строением. В эту зону входят южные части Никифоровского района, северные участки Знаменского, Петровского,

Тамбовского и Рассказовского районов Тамбовской области, а также фрагменты территории Грязинского района Липецкой области.

В пределах этой зоны наблюдается снижение степени выщелоченности почв. Здесь наиболее распространены черноземы слабо- и средневывщелоченные, а также лугово-черноземные почвы. Сильновывщелоченные черноземы, широко распространённые в северной части равнины, встречаются крайне редко. Типичные черноземы и лугово-черноземные почвы занимают существенную долю почвенного покрова: от 10 % в Тамбовском и Рассказовском районах до 25–30 % в Петровском районе.

Наряду с этим, в составе почвенного покрова встречаются отдельные участки с солончаковыми почвами, а в западинах — серые глеево-элювиальные, лугово-болотные и солодовые разновидности (Ахтырцев А. Б., Адерихин П. Г., Ахтырцев Б. П., 1981), что указывает на высокую вариативность и сложную микроморфологию западинных ландшафтов. Структура почвенного покрова значительно варьирует в направлении с запада на восток. В западной части переходной зоны, занимающей плоское междуречье Воронежа и Матыры с абсолютными высотами 135–150 м, широко распространены выщелоченные и типичные лугово-черноземные и черноземно-луговые почвы, формирующие типичные ячейки почвенно-пространственных паттернов (СПП). Для западного отрога переходной полосы, где преобладает междуречный недренируемый тип местности, характерно почти повсеместное распространение лугово-черноземных и черноземно-луговых почв. Соотношение почвенного покрова в отдельных участках варьирует в следующих пределах: лугово-черноземные выщелоченные почвы – 35–50 %, обычные – 0–40 %, черноземно-влажно-луговые – 1–10 %, солоды – 0,5–1 %, лугово-болотные – 0,3–0,9 %. На юге равнины почвенный покров представлен сочетаниями лугово-черноземных почв (обычных, карбонатных и солонцеватых), черноземно-луговых почв (обычных, карбонатных, солонцеватых, а также солончаковатых), а также типичных и карбонатных черноземов в сочетании с почвами западин. Засушливость климата, локально залегающие засоленные породы и наличие грунтовых вод с повышенной минерализацией способствуют развитию процессов засоления, осолонцевания и осолодения в западинах, что приводит к формированию мозаичного почвенного покрова, включающего черноземно-луговые солонцы, солончаки, черноземно-луговые засоленные и солонцеватые почвы, солоды, осолоделые и лугово-болотные почвы. В составе лугово-черноземных почв и черноземов преобладают тучные и среднегумусные мощные и среднемощные глинистые разновидности (Ахтырцев А. Б., 1973, 1974б, 1981).

Структура почвенного покрова тесно связана с типами местности. Для междуречного недренированного типа местности характерны сложные пятнисто-кольцевые депрессионные паттерны. Структурный фон формируют лугово-черноземные почвы в сочетании с

черноземно-луговыми: первые приурочены к выровненным, слабодренированным междуречьям и слабопологим склонам, вторые окаймляют различные понижения и покрывают плоско-вогнутые участки водоразделов, лощины, лиманы. Эти почвы формируют обширные и изоморфные ареалы. Характерными компонентами структуры почвенного покрова являются сложные западинные комплексы и мелкомозаичные структуры почв.

Структура почвенно-пространственных паттернов южной части Окско-Донской низменности значительно усложнена западинными комплексами и высокой степенью мелкомозаичности. Характеристики составляющих их компонентов и сложность строения почвенного покрова коррелируют с разнообразием морфологии, гидрологических условий, этапов развития и биотического состава западин.

Почвы западин низменности представлены в различных сочетаниях луговыми, заболоченными и осолоделыми почвами. В южных провинциях равнины в почвенном покрове западин формируются ареалы солонцеватых почв. Почвенный покров западин формируется под влиянием внутренних факторов их функционирования, определяемых глубиной вреза, режимом увлажнения, особенностями растительного покрова и ионным составом грунтовых вод.

В крупных, но неглубоких западинах (площадью несколько гектаров) доминируют черноземно-луговые корковые, мелкие и среднестолбчатые солонцы. Часто они имеют солончаковатые свойства и характеризуются содовым засолением. Такие депрессии испещрены солонцовыми пятнами диаметром от 2–3 до 15–25 м. Поверхность этих пятен понижена на 10–15 см, местами на 30–35 см, по сравнению с черноземно-луговыми солончаковато-солонцеватыми почвами, демаркирующими их границы. В наиболее пониженных участках западин периодически формируются осолоделые солонцы (рис. 13).

Из-за слабой концентрации поверхностных вод в таких крупномасштабных слабоврезанных понижениях осолодение выражено слабо, тогда как процессы засоления и осолонцевания проявляются более интенсивно. Источники ионов Na различны. В исследованиях Е. М. Самойловой, В. К. Бугаевского, В. И. Макеевой (1972) описана динамика вод вниз по уклону западин, в ходе которой они обогащаются двууглекислой содой, теряя гидрокарбонаты кальция и магния. Эти минерализованные воды застаиваются в понижениях на глубине 1–3 м, а последующий капиллярный подъем приводит к засолению и осолонцеванию почв.

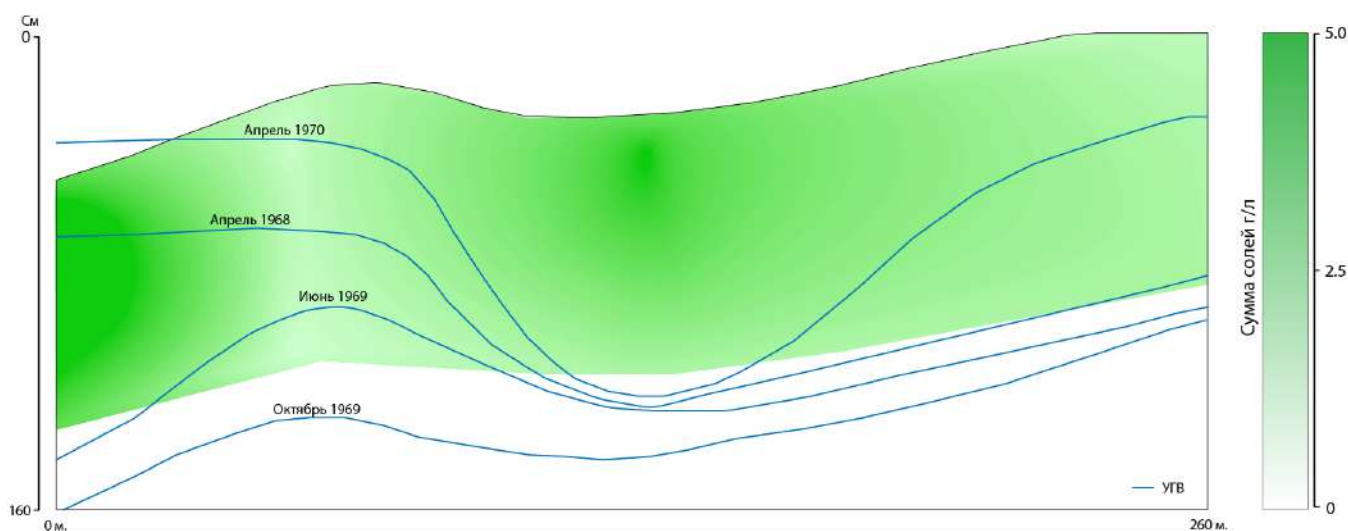


Рисунок 13. Распределение солей и динамика уровней грунтовых вод в характерном для Окско-Донской низменности профиле. По данным Е.М. Самойловой и др 1972 г.

Наиболее типичными для территории Окско-Донской низменности являются западины небольших размеров — с диаметром до 150–300 м и глубиной вреза от 0,5 до 2 м. Благодаря морфологическим особенностям, такие понижения эффективно аккумулируют поверхностные воды, нередко превосходя в этом более обширные, но слабоврезанные депрессии. В весенний и осенний периоды западины заполняются водой, а в летнее время, как правило, пересыхают. Воды, собирающиеся в этих формах рельефа, слабо минерализованы и обогащены гидрокарбонатами кальция и магния, что создает условия для осолодения, лессиважа и локального оглеения верхнего почвенного слоя.

Глубоковрезанные западины характеризуются преобладанием гидроморфных почв: лугово-болотных, луговых солодей, черноземно-луговых почв с признаками засоления и осолонцевания, а также серых лесных остаточно-осолоделых почв с отдельными пятнами осолодевающих солонцов.

Более упрощённые по морфологии западины — диаметром до 250 м и глубиной около 70 см — имеют ограниченный набор почвенных элементов. Здесь преобладают серые лесные остаточно-осолоделые и черноземно-луговые почвы, организованные в кольцевые микроструктуры. При этом лугово-болотные и лугово-осолоделые почвы, как правило, в таких формах рельефа отсутствуют (Ахтырцев Б. П., 1982).

Кроме того, отдельными участками встречаются лугово-черноземные выщелоченные почвы суглинистого и легкосуглинистого механического состава. Они характеризуются пониженным содержанием физической глины — от 30–35 % до 20–25 %, а в нижней части профиля на глубине около 1 м часто залегают супесчаные и песчаные отложения. В гумусовом

горизонте преобладают фракции песка (до 64–66 %) и ила (в пределах 13–17 %), причём по мере углубления содержание песчаных частиц увеличивается.

Лугово-черноземные почвы отличаются сложной генетической историей. В процессе их формирования чередовались фазы активного элювиирования и его ослабления, что было обусловлено колебаниями влажности и интенсивностью инфильтрации поверхностных вод (Ахтырцев А. Б., Ахтырцев Б. П., Пряхин А. Д., 1996, 1997). Анализ распределения ила по профилю указывает на частичный вынос тонкодисперсных частиц из верхней части почвы в более глубокие, некарбонатные горизонты. В гумусовом горизонте содержание ила на 5–7 % ниже по сравнению с подстилающими слоями. Это различие связано с процессами лессиважа, оглинивания, а также с воздействием сельскохозяйственной обработки, способствующей водному и ветровому выносу тонких частиц. На больших глубинах вариативность содержания ила объясняется неоднородностью аллювиальных и делювиальных отложений, слагающих нижние горизонты (Ахтырцев, 1999) (рис 14).

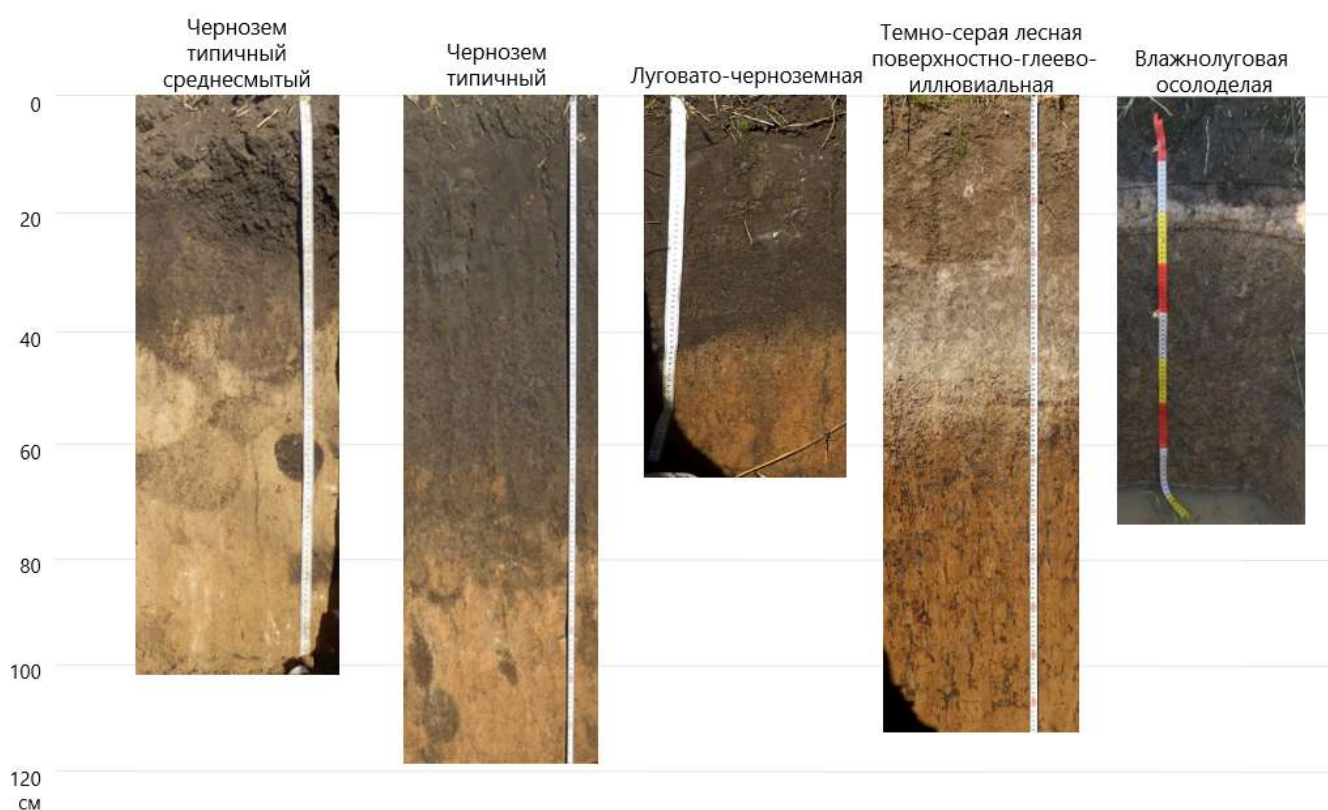


Рисунок 14. Возрастающий по степени гидроморфной (слева направо) ряд почв междуречий Окско-донской низменности

2.4 Ландшафтная структура Окско-Донской низменности

Ландшафтная структура Окско-Донской низменности формируется под влиянием как природных компонентов регионального уровня, так и сложных историко-геоморфологических процессов. Наиболее полное представление о пространственной организации этой территории дает ландшафтно-типологическое картографирование, в рамках которого возможно не только выявление преобладающих и второстепенных типов урочищ, но и количественная оценка их соотношения в пределах конкретных единиц физико-географического районирования лесостепной зоны. Существенный вклад в разработку этого подхода был внесён сотрудниками кафедры физической географии Воронежского университета в 1960-х годах, когда были проведены крупномасштабные полевые исследования (рис. 15)

Низменность представляет собой сложную систему продольных полос, каждая из которых отличается морфологическими и геоморфологическими характеристиками. Западная зона приурочена к долине реки Воронеж и отличается выраженной речной расчленённостью. Центральная полоса включает наиболее приподнятые участки территории — плоско-увалистые междуречья, протянувшиеся от Касимова на севере до станции Таловая у подножия Калачской возвышенности. Эта часть практически не дренируется водотоками, а абсолютные отметки высот здесь достигают 175–180 м, поднимаясь до 219 м в районах истоков рек Челновой, Липовицы и Матыры — высшей точки всей низменности.

Центральная зона включает бассейны рек Цны, Елани и Савалы, где формируется своеобразная лотковидная равнина с повышенным восточным бортом. Водораздельные пространства между Цной и Савалой, Бурначкой и Бипогом маловыразительны, лишены ярко выраженного расчленения и редко превышают 170 м над уровнем моря. Здесь ландшафт приобретает черты плоского плато с минимальной дренированностью.

К востоку от этой зоны прослеживается субмеридиональный водораздел, простирающийся от устья реки Выши до долины Хопра в окрестностях Борисоглебска. На севере его высоты достигают более 210 м, но ближе к Борисоглебску ландшафт постепенно понижается, и холмистая поверхность теряет высоту, переходя в склоны Приволжской возвышенности.

Далее — ещё одна, наиболее пониженная полоса, соответствующая долинам рек Вороны и Хопра. Здесь формируется переход к Хоперско-Бузулукской равнине. Субширотные водоразделы в этой части заметно короче и выполняют функцию границ между речными системами Волжского и Донского склонов. Примером может служить водораздел, совпадающий с северной границей Тамбовской и Липецкой областей, который далее поворачивает к югу и вновь выравнивается в районе истоков рек Кариай, Цны и Савалы.

Морфологическое строение равнины, ориентировка долин и водоразделов, их относительные высоты и направления развития обусловлены глубинной тектонической структурой и историей развития территории, особенно интенсивной в течение четвертичного периода. Отсутствие осадков верхнего мела и палеогена на территории низменности свидетельствует о том, что её формирование как депрессии происходило лишь с неогенового времени. В течение миоцена и плиоцена гидрографическая сеть существенно отличалась от современной, однако крупные тектонические прогибы, очерчивающие западные и восточные окраины равнины, вероятно, существовали уже тогда (Кривоборский, Мучкапский).

В период неогена произошло накопление мощной толщи озёрно-речных песков и глин, перекрывших нижнемеловые отложения, выровнявших поверхность и частично засыпавших древнюю сеть долин. По мнению Г. И. Раскатова, главные неотектонические структуры региона начали активно проявляться на стыке неогена и четвертичного периода, то есть около 1–2 миллионов лет назад. В этот временной отрезок оформились основные речные долины и дифференцировались склоны, заложились контуры вторичных водоразделов.

Плейстоцен ознаменовался оледенением, в ходе которого весь массив Окско-Донской низменности оказался под мощным ледниковым покровом, достигавшим, по оценкам, 500 м толщины. Первоначальный рельеф был почти полностью трансформирован. Тем не менее, толща моренных отложений на большей части равнины осталась сравнительно небольшой — на междуречьях её мощность ограничивается несколькими метрами, тогда как в погребённых долинах она может достигать 15–20 м. Лишь на Суренской озово-камовой гряде зафиксированы ледниковые отложения толщиной свыше 50 м. В речных долинах морена залегает с уклоном к современным руслам.

Масштаб 1:1 500 000

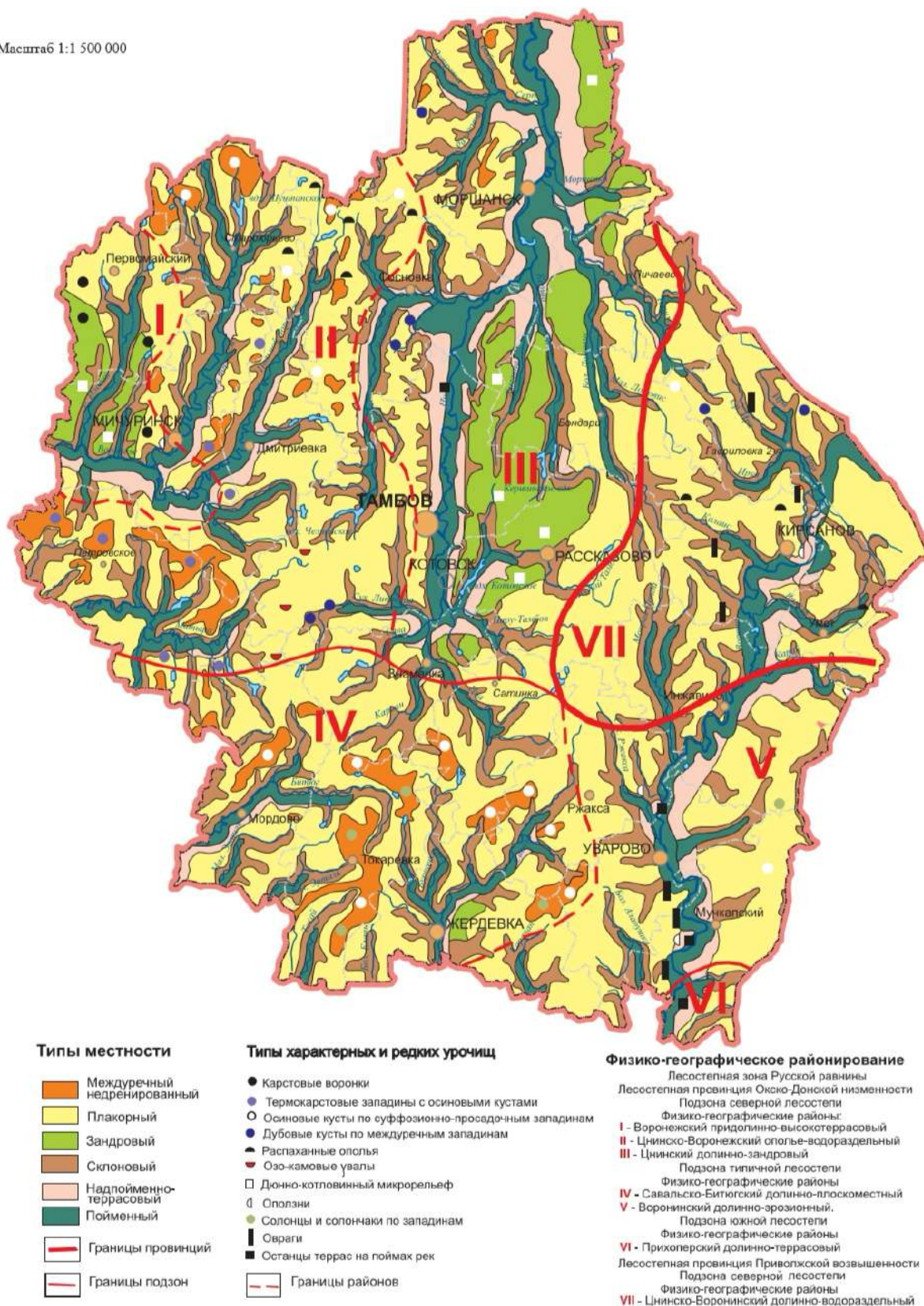


Рисунок 15. Ландшафтная карта Тамбовской области. Авторы: А.В. Берест, А.А. Липецких 2013

Во-вторых, как на территории Окско-Донской низменности, так и на смежных возвышенностях отсутствуют конечные моренные гряды, что указывает на малоподвижный характер ледника в данной области. Вместо поступательного движения здесь преобладал стационарный режим деструкции ледяного покрова, сопровождавшийся его блоковым распадом. Основные водно-ледниковые потоки, судя по структуре отложений, формировались преимущественно вдоль краевых участков равнины, где и происходило активное накопление зандровых осадков. Особенно ярко это проявляется в долинах рек Воронежа и Вороны, где надморенные террасы сложены типичными водно-ледниковыми супесями и песками.

В пределах долин Цны и Пары, в период донского и московского оледенений, дренаж на север значительно осложнялся ледниковым покровом. В этих условиях формировались обширные полупроточные озёрные системы, осадочные толщи которых — представленные супесями и песками — ныне образуют четыре отчетливо выраженные террасы. Специфика таяния ледника способствовала не только формированию этих озёрных бассейнов, но и интенсивному заложению речных долин и балочных систем, многие из которых сохраняют среднеплейстоценовый возраст. Это, в свою очередь, привело к значительной глубине врезов, выравниванию междуречных пространств и обособлению наиболее возвышенных террасных уровней (III и IV).

Геоморфологическая эволюция Окско-Донской низменности, по имеющимся данным, включала по меньшей мере три эрозионно-аккумулятивных цикла, приуроченных к московскому и валдайскому оледенениям. В настоящее время основная часть территории испытывает медленное тектоническое опускание — в пределах 1,5–2 мм в год. Однако на ряде структур второго порядка, таких как Окско-Донское плато и западные склоны Приволжской возвышенности, фиксируются подъемные движения, что способствует активизации современных эрозионных процессов.

Современные фации растительности также отражают как рельефную, так и субстратную дифференциацию. По поймам, песчаным террасам, зандровым отложениям и крутым коренным склонам речных долин распространяется древесная растительность, преимущественно вторичного происхождения. Междуречья, сложенные карбонатными лёссовидными суглинками, заняты лугово-степными сообществами. На склонах водоразделов и в пределах эрозионных форм рельефа — балок и долин — формируется система прямых склонов, широко распространённая в пределах южной лесостепи.

2.4.1 Типы местности

На территории Окско-Донской низменности широко распространены участки, обладающие схожими природными характеристиками. Такое сходство обусловлено

однотипностью рельефа, генезиса и гранулометрического состава материнских пород, особенностями микроклимата, строения почвенного покрова и растительности. Указанные признаки формируют устойчиво повторяющиеся ландшафтные комплексы — **урочища**, представляющие собой устойчивые сочетания нескольких фаций, связанных общностью морфологических и генетических признаков. Для плоских междуречий типичны урочища, представленные распаханнами равнинными участками, лесными и степными западинами, а для склоновых участков — балками, овражными и оползневыми телами. Урочища, близкие по природной структуре и одинаково вовлечённые в хозяйственное использование, формируют **типы местности**, которые рассматриваются как относительно однородные в природно-хозяйственном отношении территориальные единицы (рис. 17).

В пределах Окско-Донской низменности выделяют следующие типы местности:

Пойменный тип местности в виде продолжительных полос до 6 км характерен для оснований речных долин. Основным ландшафтообразующим процессом здесь является деятельность постоянных водотоков, связанная с флуктуациями русла, переложением пойменного аллювия при размыве его на вогнутых и намыве на выпуклых берегах, а также периодическими затоплениями пойм во время паводков. В результате этих процессов на дне долин сформировались выровненные поверхности — поймы, сложенные в основании крупно- и среднезернистыми песками (русловой аллювий), перекрытыми суглинистыми и глинистыми наносами весенних паводков (пойменный аллювий), с включением торфяно-илистых отложений по депрессиям рельефа (старичный аллювий).

Динамика относительных высот в поймах исчисляется первыми метрами, однако они играют важную роль в формировании почвенно-растительного покрова. В самых низких местах распространены мокрые луга, тростниковые болота, черноольшаники на перегнойно-глеевых, торфянисто-глеевых и иловато-болотных почвах. На повышенных участках встречаются разнотравно-злаковые луга, пойменные дубравы с черноземно-луговыми и серыми пойменно-лесными почвами.

Типичными урочищами пойменного типа местности являются озера-старицы, травяные болота, черноольшаники, луга и пойменные дубравы. Их хозяйственное значение очень велико: в настоящее время они служат ведущей естественной кормовой базой.

Террасовый тип местности представлен узкими полосами по левым (иногда правым) склонам средних и крупных речных долин равнины. Главную ландшафтообразующую роль здесь играет состав пород — преимущественно песчаных древних речных отложений, а также особый характер рельефа — ступенчатое залегание выровненных поверхностей.

Надпойменно-террасовый тип местности описывается двумя вариантами — песчаным и лёссовым. Песчаный вариант приурочен к нижним надпойменным террасам, сложенным

непосредственно с поверхности боровыми песками. На этих террасах произрастают сосновые боры — Усманский, Хреновской, Цнинский. Типичными урочищами здесь являются боры, суборы и дубравы, песчаные степи, молодые посадки сосны, плоскодонные широкие балки. Лёссовый вариант представлен преимущественно на верхних террасах, сложенных лёссовидными суглинками.

Склоновый тип местности приурочен к крутым склонам долин и крупных балок, включая водораздельные склоны междуречий с уклонами более 3°. Он характеризуется активизацией эрозионных процессов, широким распространением оползней, оврагов и участков с вымытыми почвами. Этот тип местности наиболее характерен для окраин Окско-Донской низменности, но его основные черты становятся менее выраженными в центральной части равнины — на территории ЦЧО, которая наименее освоена в эрозионном отношении.

Наиболее часто встречаемыми урочищами склонового типа местности в пределах Окско-Донской низменности являются склоны с крутизной более 15 градусов, покрытые степным типом растительности речных долин с проявлениями эрозионного микрорельефа, а также крутые склоны речных долин с аналогичной растительностью, долины с проявлением микрооползневого рельефа, слабоврезанные балки с переувлажненными заболоченными днищами, нагорные дубравы, пруды и овраги.

Плакорный тип местности представляет собой ровные, дренированные междуречные равнины. Этот тип местности связан с наиболее продуктивными структурами почвенного покрова, такими как чернозёмы типичные и выщелоченные, которые не имеют морфологических признаков смывости. Среди характерных урочищ можно выделить распаханые равнины, лугово-степные ложбины стока.

Зандровый тип местности сформировался на водораздельных песках, оставленных потоками талых вод днепровского оледенения. Здесь типичен бугристо-котловинный рельеф, который покрывает дерново-подзолистые и серые лесные почвы песчаного и супесчаного гранулометрического состава, березово-сосновые леса и низкоплодородные распаханые песчаные поверхности. Наиболее ярко этот тип местности проявляется по правобережьям рек Цны — у Тамбова и Воронежа — западнее Мичуринска.

Междуречно недренируемый тип местности характерен для наиболее плоских, лишенных дренажа участков междуречий с неглубоким (0–5 м) залеганием грунтовых вод. Здесь черноземы уступают место лугово-черноземным почвам с луговыми солонцами и солодами, приуроченными к западинам. Часть западин занята осиновыми кустами. Междуречный недренированный тип местности является характерным природным комплексом Окско-Донской низменности. В других районах Черноземного Центра он встречается локально, не доминируя (рис 16).



Рисунок 16. Междуречно недренируемый тип местности (аэрофотоснимок)

Лугово-черноземные почвы по ресурсной ценности не уступают типичным и выщелоченным черноземам плакоров. Но для этих ландшафтов характерны засоленные и заболоченные почв, что понижает их хозяйственную ценность в противопоставлении с плакорными. Напротив, от практически полностью распаханых плакоров на недренированных междуречьях широко распространены луговостепные участки, приуроченные к скоплениям западин. Площади отдельных участков (с включенными в них западинами) достигают 200 га и более.

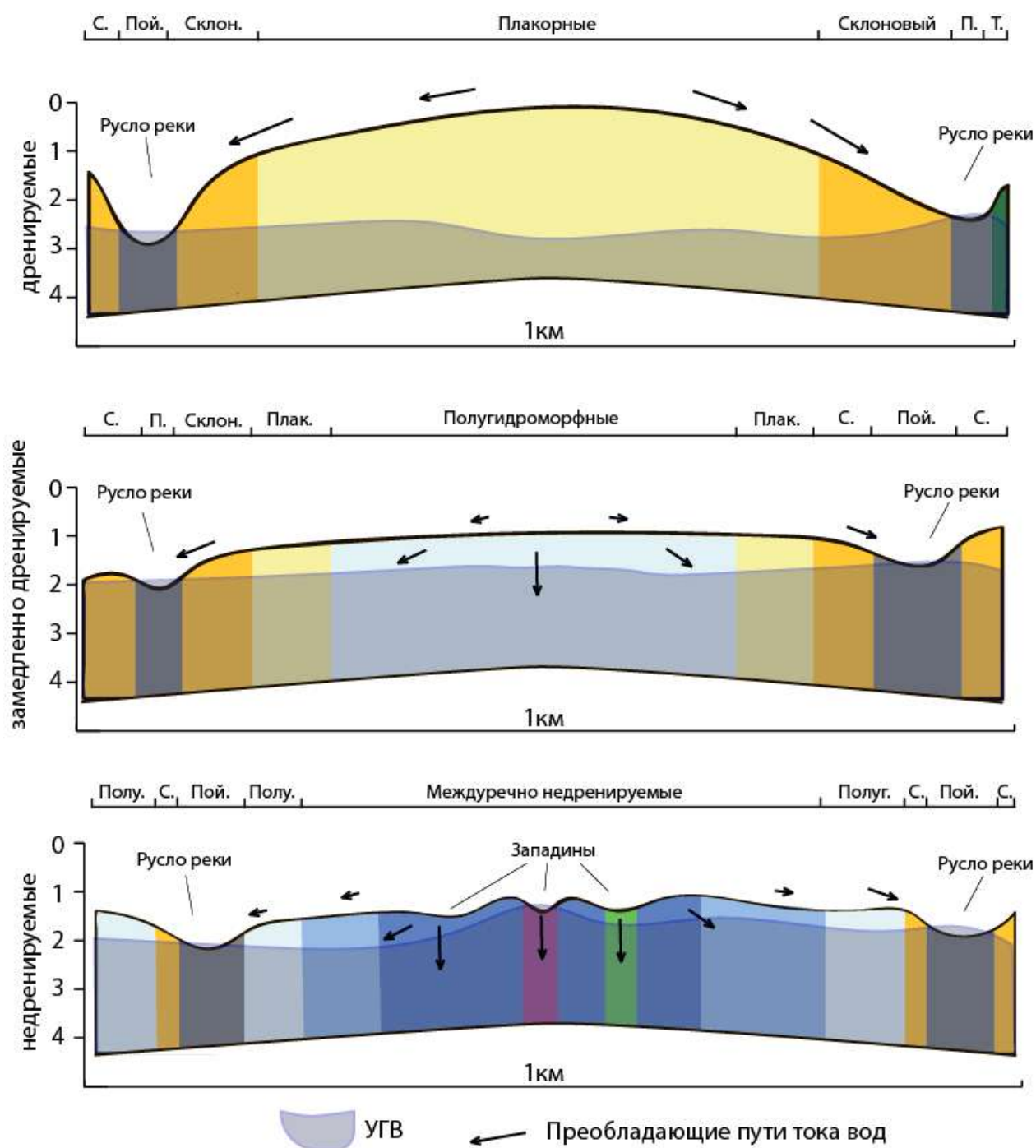


Рисунок 17. Основные варианты ландшафтных профилей Окско-Донской низменности

В пределах междуречного недренированного типа местности Окско-Донской низменности выделяются три основных морфотипа западинных форм рельефа, различающихся по размерам, очертаниям и генезису:

Блюдца (типичные западины) — это локальные понижения с глубиной от 0,3–0,5 до 2,0, реже до 3,0 м. Они характеризуются крутыми склонами и преимущественно плоским либо

воронкообразным днищем. Диаметр таких форм варьируется от 20–50 м до 100–200 м и более, при этом они встречаются наиболее часто и отличаются хорошо выраженной морфологией.

Поды — это крупномасштабные депрессии с диаметром от 5–6 до 10 км, при глубине заложения, как правило, не превышающей 5–8 м. Они представляют собой крупные, стабильно функционирующие западины, нередко включающие внутреннюю микроразнональность почвенного покрова.

Лиманы — слабо выраженные понижения неопределённой конфигурации, размерами от нескольких десятков и сотен метров до нескольких километров. В их пределах формируются отдельные чётко очерченные западины, иногда объединённые системой ложбин стока, создающей определённую гидрографическую связность.

Пространственное распределение западин и лиманов тесно связано с морфологией поверхности. Они приурочены преимущественно к выровненным участкам рельефа — плакорам, водоразделам, надпойменным террасам и поймам. На плакорных поверхностях междуречного недренированного типа местности эти формы встречаются наиболее часто, в то время как на склоновых участках фиксируются крайне редко либо полностью отсутствуют. В литературе также имеются упоминания о приуроченности блюдцеобразных западин к вершинам балок, что может быть отражением сложных переходных морфогенетических условий (рис. 18).

Одной из важнейших закономерностей в географии западин Окско-Донской низменности является их концентрация на относительно низких гипсометрических уровнях, соответствующих древнеаллювиальным и флювиогляциальным поверхностям. Это подчёркивает их генетическую связь с позднечетвертичной эволюцией равнинного рельефа.

Западины, как морфологические элементы, обладают чёткой региональной спецификой. Их распространённость на равнинных и плакорных формах резко контрастирует с ограниченным или полным отсутствием на возвышенных участках. Подобная морфогенетическая асимметрия характерна в целом для южной части Русской равнины.

Особого внимания заслуживает взаимосвязь между распространением западинных форм и овражных урочищ. Для территории Центрального Черноземья чётко прослеживается обратная зависимость между этими формами: области с высокой плотностью западин практически не содержат овражных систем, и наоборот, овражные урочища, будучи продуктами линейной эрозии, вытесняют западины из структуры ландшафта. Это противостояние отражает фундаментальные различия в гидроморфной и эрозионной организации рельефа.



Рисунок 18. Западины на типичных плоских недренируемых междуречьях

Проблематика происхождения типичных западин (блюдец) на территории Русской равнины нашла широкое отражение в отечественной научной литературе. Эти понижения рельефа впервые были описаны в 1860-х годах харьковским геологом И. Ф. Леваковским, что стало отправной точкой для последующего многолетнего обсуждения их генезиса. Вопрос заинтересовал целый ряд выдающихся естествоиспытателей, изучавших природные условия лесостепного и степного юга Восточно-Европейской равнины — в их числе В. В. Докучаев, А. А. Измаильский, А. Н. Краснов, П. А. Тутковский, Г. И. Танфильев и другие.

В совокупности, накопленные ими взгляды на происхождение западин, можно систематизировать в рамках следующих концептуальных гипотез:

Гипотеза об остаточной эрозии. Согласно А. Н. Краснову (1894), западины представляют собой заключительную стадию денудационного процесса, связанного с замыванием ложбин стока в условиях степного климата.

Эоловая гипотеза. П. А. Тутковский (1910), сторонник ветрового (эолового) генезиса южнорусских лессов, рассматривал западины как реликтовые котловины выдувания, сформированные в условиях аридного режима.

Гипотеза ледниковой эрозии. А. А. Измаильский (1894) полагал, что формирование западин связано с механическим воздействием талых ледниковых вод, прорвавших и переработавших верхние горизонты степных ландшафтов.

Гипотеза выщелачивания. Ряд исследователей, включая Ласкарева (1914), объясняли происхождение западин как результат вымывания легкорастворимых солей из почвогрунтового массива, приводящего к последующей просадке и образованию депрессий.

Криогенная гипотеза. По версии Г. И. Танфильева (1922), западины могли возникать на месте таяния льдин, занесённых водноледниковыми потоками на водораздельные поверхности. Согласно этой модели, ледниковые воды транспортировали с собой фрагменты льда, которые, оседая и покрываясь лёссовыми наносами, при последующем таянии оставляли после себя локальные понижения — прототипы современных блюдец.

Просадочная гипотеза. Одной из наиболее устойчивых концепций, нашедшей широкую поддержку у гидрогеологов, является представление о западинах как просадочных формах, возникающих в результате снижения объёма и пористости лессов и лессовидных суглинков при их переувлажнении.

Таким образом, интерпретации генезиса западин отражают широкий спектр подходов — от водно-эрозионного и эолового до криогенного и геохимического, что свидетельствует о многофакторности и сложности процессов, участвовавших в формировании этих характерных элементов рельефа южной части Русской равнины.

Современные представления о генезисе западных форм рельефа включают широкий спектр гипотез, отражающих как разнообразие физико-географических условий их формирования, так и многокомпонентную природу самих процессов. Одной из наиболее ранних и устойчивых концепций является предположение о криогенном происхождении западин — как следствии деградации многолетнемёрзлых пород, сопровождавшей окончание валдайского оледенения и позднеледниковый период. Согласно точке зрения А. А. Величко (1965), оттаивание внутрисочвенных льдов в условиях глубокого сезонного промерзания приводило к формированию локальных просадочных понижений, ставших впоследствии основой для типичных блюдцеобразных западин.

Менее распространённой, но обсуждаемой в рамках геоэкологического подхода является биогенная гипотеза, объясняющая возникновение западин деятельностью роющих степных животных. Согласно этой версии, длительное и массовое перемещение грунтов мелкими млекопитающими могло приводить к перераспределению почвенного материала и образованию поверхностных понижений.

В последние годы получает развитие гипотеза тектонического инициирования экзогенных форм. Так, Д. В. Ильяш (2014) рассматривает западины как результат воздействия экзогенных процессов (денудация, дефляция, суффозия), происходящих в пределах тектонически ослабленных зон земной коры. В этих участках, соответствующих зонам сочленения блоков и очагов вертикальных движений, формируются очаговые разуплотнения, играющие роль морфогенетических триггеров. Результатом становятся депрессионные кольцевые микроформы, впоследствии перерабатываемые современными процессами.

В рамках анализа морфогенеза западин важно разграничивать два уровня:

- а) происхождение первичных неровностей рельефа,
- б) трансформацию этих неровностей в финальные морфологические формы с характерной плоскодонной и круто-склоновой архитектурой.

Ф. Н. Мильков (1946) предложил полигенетический подход к трактовке западин, подчёркивая их разновозрастный и многофакторный характер. В зависимости от морфолитологического контекста, западины могут быть результатом выдувания (на песчаных равнинах), просадок (в пределах лессовых плато), гидродинамической эрозии (на поймах), карстовых процессов (в местах залегания мела и известняков) или замытых старичных русел. При этом, несмотря на различия в происхождении, все они приобретают сходную морфологию — относительно плоское днище и крутые борта, что позволяет говорить о наличии универсального механизма переработки исходных неровностей.

Таким механизмом, по мнению ряда авторов, является суффозия — вынос мелкодисперсного материала из верхней части профиля под действием инфильтрационных

потоков дождевых и талых вод. При этом растворённые и взвешенные вещества задерживаются на поверхности и постепенно мигрируют вглубь профиля, что способствует уплотнению материала, оседанию и формированию замкнутого понижения.

В контексте современного ландшафтного анализа особый интерес представляет гипотеза, предложенная Д. В. Ильяшом, касающаяся морфометрических характеристик западин и их связи с положением по отношению к порядкам водотоков на материнском водоразделе. Автор устанавливает, что уменьшение диаметра западин с удалением от гребневой части водораздела может описываться через разность потенциалов рельефа между наиболее возвышенной точкой и локальным базисом эрозии. Это указывает на возможность количественной интерпретации распределения западин как отражения внутренней энергетики геоморфосистем.

Также Д. В. Ильяшом была предложена гипотеза о связи морфометрических признаков западин с их положением относительно порядков водотока материнского водораздела. Он утверждает, что уменьшение размера западин с удалением от гребня водораздела в монотонных литологических условиях описывается как функция разности потенциалов рельефа между гребнем и местным базисом эрозии: $D=f(g_1-g_2)$,

где D - диаметр циркумmenta,

g_1 -- потенциал рельефа на гребне водораздела,

g_2 - потенциал рельефа базиса эрозии,

При этом для размера западины имеет значение не просто разница высот, но и градиент изменения потенциала рельефа (крутизна склона):

$D=k(H-h)/L$, где:

D - размер воронки в поперечнике;

H – абсолютная высота воронки;

h – абсолютная высота местного базиса эрозии;

L –проекция расстояния s по склону между точками H и h .

$(H-h)/L$ - градиент перепада высот

Данное выражение соотносится с конечной работой перемещения частицы из породного массива от гребня водораздела до базиса эрозии, производимой

силой тяжести $A=mg(H-h)$, где m – масса этой частицы. Коэффициент отношения градиента перепада высот к диаметру западин равен 1150 (рис. 19).

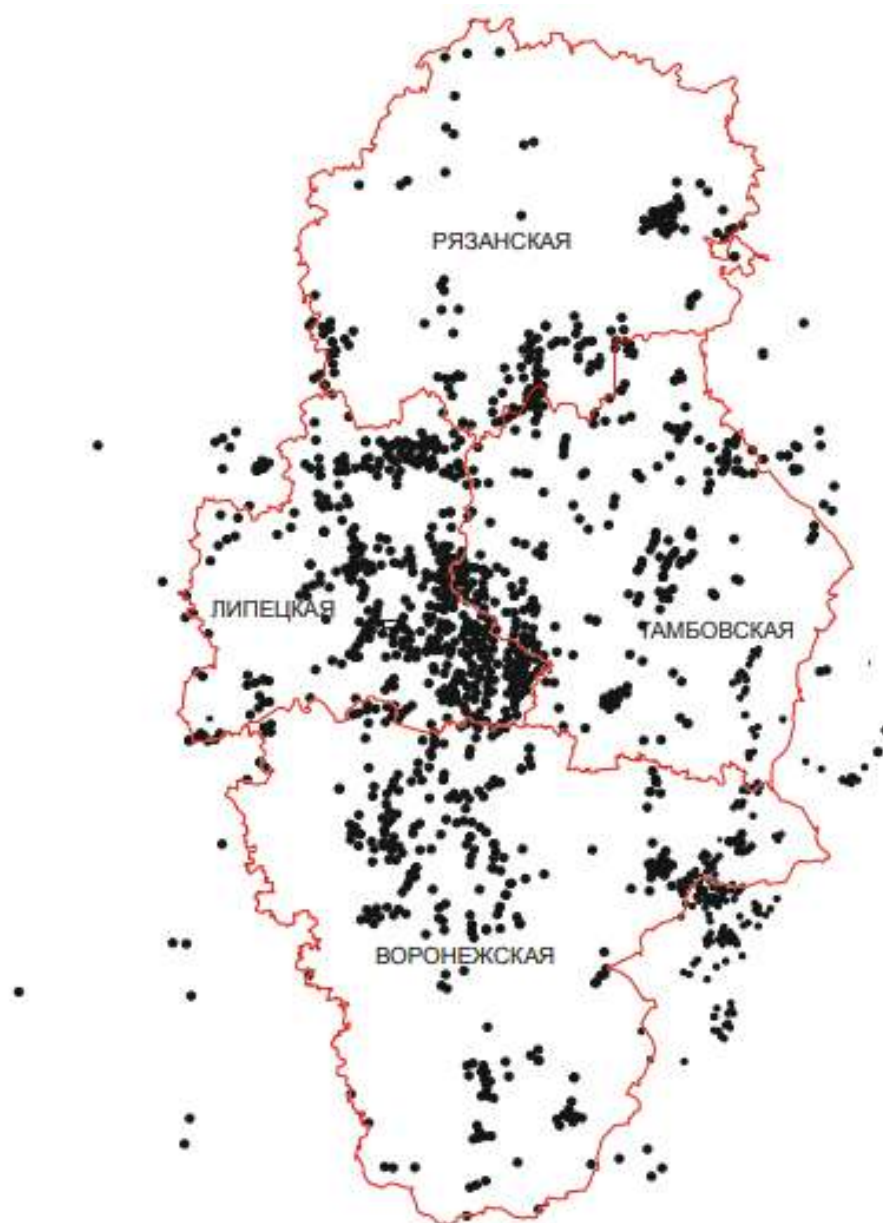


Рисунок 19. Схема распространения западин на территории Воронежской антеклизы в пределах областей Окско-Донской низменности (Ильяш Д.В. 2014).

Западины как ландшафтные комплексы отличаются разнообразием. Ф.Н. Мильков различал семь типов западин:

1) распаханные западины, 2) луговины, 3) осоково-кочкарные болота, 4) озера, 5) ивовые кусты, 6) осиновые кусты, 7) дубово-осиновые кусты (Мильков, 1976) (рис. 20).



Рисунок 20. Иерархия западин (Ф.Н. Мильков 1976)

С позиций современного ландшафтоведения западины следует рассматривать как особое семейство урочищ, состоящее из целого ряда родов и видов. Чертами, общими для всего семейства западинных урочищ, помимо их уже отмеченной морфологии, являются бессточность, повышенная увлажненность, преобладание болотно-луговой и древесно-кустарниковой растительности. По своей природе это аazonально-зональные комплексы, растительность, почвы и животный мир которых, хотя и подчиняются закону зональности, но с некоторыми отклонениями.

I. Род распаханых западин

Неглубокие западины часто распахиываются и используются под посевы зерновых, реже — под частные огороды. Посевы в западинах часто угнетены, страдают от вымокания. На севере встречаются распаханые западины, густо заросшие бекманией. Распаханные западины выделяются на фоне черноземной пашни светлой окраской. В северной части равнины на днищах таких западин развиты серые глеево-элювиальные почвы, отличающиеся низким плодородием. Центр западины обычно занят светло-серыми глеево-элювиальными почвами, которые вверх по склону западины сменяются серыми и темно-серыми глеево-элювиальными почвами, переходящими на окраине западины в лугово-черноземные (А. Б. Ахтырцев, 1974). На юге, в полосе типичных и обыкновенных черноземов, в западинах развиваются солонцеватые и осолоделые почвы в комплексе с лугово-черноземными. Распаханные западины постепенно заносятся мелкоземом и прекращают свое существование.

II. Род луговинных западин, или луговин

Луговинные урочища — неглубокие (до 0,5 м, редко глубже), отчетливо проявляющиеся в рельефе западины, не имеющие ясно выраженных признаков заболачивания, с густым травяным покровом разного состава — от влажных лугов до разнотравных степей. Почвы этих урочищ сходны с почвами распаханых западин. Луговины представляют собой сенокосные и пастбищные угодья с участием в травостое таких ценных кормовых злаков, как мятлик луговой, лисохвост луговой, костер безостый, пырей ползучий. В остепенённых луговинах встречаются келерия, земляной орешек, типчак. Для засоленных участков характерна солонцовая растительность. Хозяйственное использование луговин затруднено из-за их незначительных размеров и изолированности друг от друга. Травяной покров многих из них значительно нарушен выпасом скота.

III. Род солонцовых западин

В некоторых местах Окско-Донской низменности (например, у пос. Токаревка Тамбовской области) наблюдаются обширные (в десятки гектаров), но слабоврезанные западины, полностью занятые корковыми и среднестолбчатыми черноземно-луговыми солонцами. Они формируются на тяжелых суглинистых и глинистых почвах в условиях недостаточного поверхностного увлажнения (промыва) и ясно выраженного подтока со стороны грунтовых вод. Растительность здесь бедная, разреженная, с участием типчака, полыни одностолбиковой, кермека опушенного, одуванчика бессарабского, подорожников тонкоцветкового и наибольшего. Мелиорация таких западин встречает большие затруднения.

IV. Род западинных болот

Западинные болота — один из наиболее распространенных типов блюдцев на Окско-Донской низменности. Весной, после снеготаяния, и поздней осенью они на некоторое время заполняются водой и напоминают озера, а летом пересыхают, превращаясь в легкопроходимые болота. Западинные болота — сложные комплексы, состоящие из двух, трех и более членов. Наиболее простыми являются двухчленные комплексы, состоящие из болотной центральной части западины и лугово-степных склонов. К этим двум основным членам могут присоединяться солонцовые урочища, куртины кустарников и небольшие озёрки.

В почвенном покрове западин этого рода на севере равнины преобладают торфяно-болотные и лугово-болотные почвы, на юге — болотные солоди и солончаковатые заболоченные почвы. По характеру растительности выделяются следующие виды заболоченных западин:

1. Вид разнотравных болот. Характеризуется наличием густого лугово-болотного разнотравья, включающего щучку, полевицу побегообразующую, мятлик болотный, вейник сероватый, некоторые виды осок, лабазник вязолистный, подмаренник болотный, сабельник болотный, лютик ползучий и другие.

2. Вид осоковых кочкарников. Поверхность таких западин усеяна крупными кочками (высотой до 0,7–1,0 м), образованными осоками омской и дернистой. Между кочками — участки почти незадернованной голой почвы, вязкой во влажное время и твердой в сухое.

3. Вид камышово-тростниковых крепей. Сильно увлажненные западины с близким залеганием грунтовых вод в сухое лето густо зарастают тростником обыкновенным и камышом лесным, иногда рогозом широколистным.

4. Вид гипновых болот. Этот редкий для всей Окско-Донской низменности вид сильно увлажненных западин характеризуется наличием сплошного покрова из зеленых (гипновых) мхов, преимущественно *Calliergon* и *Drepanocladus* (Хмелев, 1973). На моховом ковре иногда встречаются кусты ивы пепельной и розмаринолистной. Гипновые западины в чистом виде встречаются редко и являются одним из членов сложных парагенетических западинных комплексов.

5. Вид сфагновых болот. Очень редкий для Тамбовской равнины, впервые описан С. В. Голицыным (1966) и Н. С. Камышевым (1967), позднее более подробно изучен К. Ф. Хмелевым (1970, 1972, 1973). Сфагновые болота — последняя стадия зарастания степных западинных озер. Из растений сфагнового комплекса наиболее интересны росянка круглолистная и клюква болотная. Произрастание этих северян на распаханых черноземных степях — одно из самых удивительных явлений в живой природе Черноземного Центра. На сфагновом ковре обычно растет низкорослая береза пушистая, иногда береза повислая, реже встречаются различные виды кустарниковых ив. Сфагновые болота являются частью западинного парагенетического комплекса и почти всегда окаймлены поясом осокового кочкарника. Будучи своеобразным феноменом природы не только Тамбовской равнины, но и всего Черноземного Центра, сфагновые западинные болота нуждаются в охране.

V. Род западинных озер. Самые глубокие западины (до 2,5–3,0 м), в течение всего лета сохраняющие воду, носят характер небольших мелководных степных озер. Они интенсивно зарастают рдестами, тростником, камышом, рогозом, сусаком зонтичным, осоками, в отдельных случаях — гипново-сфагновой сплавиной. Западинные озера в сочетании с осоковыми кочкарниками и камышово-тростниковыми крепями представляют стацию для гнездовья огромного числа водоплавающей и болотной орнитофауны.

VI. Род кустарниковых западин. Кустарниковые западины, бесспорно, представляют собой самостоятельный род западинных комплексов. В одних случаях они могут занимать всю

западину, в других — ограничиваться ее отдельными участками. В условиях Окско-Донской низменности наиболее широко представлен вид ивняковых западин. Ивняки широко распространены по всей Окско-Донской низменности. На севере, в полосе серых лесных почв и оподзоленных черноземов, где осиновые кусты выпадают, ивняки становятся едва ли не преобладающим родом западинных комплексов (Мильков, 1951).

Основной компонент ивняков - ива пепельная. Она является пионером древесно-кустарниковой растительности в западинах. Для ее успешного развития необходимо:

- а) временное, обычно весеннее затопление водой,
- б) умеренное, но постоянное увлажнение почв в летнее время,
- в) выщелоченные в верхних горизонтах почвы,
- г) отсутствие связной дернины.

Легко разносимые ветром семена ивы пепельной дают всходы одиночных экземпляров кустарника в большинстве блюдцев. Однако массовое размножение ивы пепельной происходит лишь в неглубоких западинах, в которых соблюдаются все четыре условия, обеспечивающие оптимальное развитие этого кустарника. Ива пепельная, при наличии благоприятных условий, со временем сама изменяет среду обитания в необходимую для себя сторону. Иногда вокруг одиночных кустов ивы зимой образуются сугробы снега, способствующие дополнительному увлажнению и промыванию почвы. Разрастаясь, кусты ивы препятствуют перегреву и иссушению верхних горизонтов почвы летом, умеряют крайности температур воздуха, повышают его относительную влажность. Под защитой ивы разрастается высокотравье (мятлик болотный, василистник простой, чина луговая, кукушкин цвет, тысячелистник хрящеватый, герань луговая, кровохлебка лекарственная, горошек мышиный). Практически во всех ивняках можно встретить ежевику и смородину черную. Помимо ивы пепельной, в ивняках часто встречается ива розмаринолистная, иногда — черемуха и крушина слабительная. Почвы ивняковых западин — серые поверхностно-глеево-элювиальные на севере равнины и луговые солоды на юге. На правах особого вида кустарниковых западин выделяются относительно сухие, неглубокие остепненные терново-бобовниковые западины с лугово-черноземными почвами.

VII. Род лесных западин

Лесные западины, наряду с кустарниковыми формами, относятся к числу понижений с временно-озёрным режимом увлажнения. Однако, в отличие от последних, водонасыщенность здесь менее продолжительна, а в летний период грунтовые воды залегают значительно глубже. Это создаёт условия для активного промывания почвенного профиля, в результате чего, при участии лесной растительности, формируются серые лесные остаточные-осолоделые и солонцевато-осолоделые почвы.

Фаунистическое население этих урочищ включает как типичных обитателей лесостепи, так и представителей более влажных биотопов: лось, лисица, ёж, заяц-русак, многочисленные грызуны, включая полёвок. Из орнитофауны отмечаются кобчик, пустельга, сорокопуд, овсянка садовая, славки, дятлы, соловей, кукушка и другие виды.

Выделяются следующие основные виды лесных западин:

Осиновые - наиболее характерная и широко распространённая форма, определяющая региональную специфику Окско-Донской низменности как физико-географической провинции. Хотя традиционно их относили исключительно к данной равнине (Берг, 1947), в действительности подобные фитоценозы встречаются и на Среднерусской, и на Приволжской возвышенностях, а изредка — и на Приднепровской низменности. Классическая форма осинового куста — это плотная группа тонкоствольных осин высотой от 8–10 до 15–18 м, окаймлённая по периметру труднопроходимыми зарослями ивы пепельной, с вкраплениями ивы розмаринолистной, тёрна, крушины и бобовника. Помимо внешнего бордюра, отделяющего куст от степной растительности, может формироваться и внутренний, разграничивающий древесный массив и осоковый кочкарник либо небольшое озерко в центре западины. Наличие кустарникового пояса, как внешнего, так и внутреннего, подтверждает гипотезу о высоком уровне увлажнения и близком залегании грунтовых вод под ивняками.

Подлесок развит слабо, но включает грушу, яблоню, крушину (ломкую и слабительную), черёмуху, калину, смородину чёрную, ежевику. В травянистом покрове преобладают влаголюбивые и теневыносливые виды: тростник, полевица побегообразующая, осоки лисья и вздутая, вербейник, будра, чемерица лобеля, крапива, борщевик. Реже встречаются ландыш и купена.

Берёзовые - относительно редкая форма лесных западин в пределах низменности, сосредоточенная преимущественно в северной части, в зоне распространения серых лесных почв.

Смешанные - одна из наиболее часто встречающихся форм лесных западин. Наряду с осинкой здесь присутствуют вяз полевой, липа, клён остролистный, реже ясень и дуб. Подлесок включает груши, яблони, черёмуху, крушину, калину, смородину. В травостое наблюдается преобладание дубравных видов: сныть, ландыш, купена многоцветковая, зорька. Часто древесно-кустарниковая растительность переплетена хмелем. По сравнению с осиновыми кустами, осиново-дубовые характеризуются более глубоким уровнем залегания грунтовых вод и, соответственно, более сформированным почвенным профилем — от серых до тёмно-серых лесных, преимущественно остаточно-осолоделых. Переходы между осиновыми и осиново-дубовыми кустами постепенные: сначала в травостое появляются виды широколиственных лесов, затем — дубравные кустарники, и только после — ясень, вяз, дуб, клён, липа.

Дубовые кусты — чистые дубравы в западинах встречаются крайне редко, их формирование характерно преимущественно для Среднерусской возвышенности, где почвы более промыты и имеют лучшую фильтрационную способность. Такие кусты формируются в неглубоких западинах, затопляемых весной на короткое время, при относительно низком уровне грунтовых вод. Почвы — тёмно-серые лесные с признаками оглеения в северной части и остаточного осолодения на юге, обладают высокой продуктивностью и лесопригодностью. Лишь самые небольшие западины типа классического блюдца могут относиться к одному роду или даже виду урочищ, представляя собой или луговину, или кочкарник, или осиновый куст в чистом виде. Это элементарные, или простые, урочища. Более крупные западины (от 1—2 га и более) чаще всего представляют сочетание различных родов и видов урочищ. Разнообразие элементарных урочищ в парагенетических западинных системах обусловлено особенностями генезиса самих западин (например, группа западин в лимане) и их последующим эволюционным развитием (заболачивание озера, появление кустарников в луговине, смена ивового куста осиновым и т. п.).

Между различными видами и родами урочищ, как контрастными средами, в парагенетической системе протекает активный взаимный обмен веществом и энергией, что находит свое выражение в перераспределении снежного покрова и поверхностного увлажнения, в обмене грунтовыми водами, в миграции солей, в микроклиматическом воздействии одного урочища на другое (например, влияние леса на прилегающую луговину или кочкарник), во внедрении растительных видов одного урочища в другое, в трофических связях животного мира этих урочищ и т. д. Площадь наиболее крупных западинных парагенетических систем измеряется десятками, а в отдельных случаях сотнями гектаров.

Сами парагенетические системы бывают различной сложности. Простейшие из них состоят из двух членов (например, луговина + кочкарник; луговина + ивняк; осинник + ивняк и т. д.); более сложные парагенетические системы состоят из четырех-пяти членов (например, луговина + ивняк + осинник + кочкарник + озеро).

Взаимный обмен веществом и энергией осуществляется не только внутри западинного комплекса, между его отдельными членами, но и между западинным комплексом, с одной стороны, и окружающей его степью (пашней) — с другой. Западинный комплекс с окружающей его степью (пашней) образует парадинамический комплекс (систему). Парадинамическая система, в отличие от парагенетической, характеризуется тем, что ее члены не связаны общностью происхождения. Любые смежные комплексы, хотя бы генетически и не связанные друг с другом, но взаимодействующие между собой, образуют парадинамическую систему.

Взаимодействие западного комплекса с окружающей степью (пашней) лучше всего прослеживается на примере лесных и кустарниковых западных урочищ. Сносимый с полей снег задерживается в лесных кустах, и возникающее при этом избыточное увлажнение почвы распространяется и на прилегающие к кусту участки степи (поля). Еще шире полоса микроклиматического воздействия лесного куста на степь: вблизи кустов степная и полевая растительность более влаголюбива, чем вдали от них. Значительная часть птиц, гнездящихся в лесных кустах, вылетает кормиться в открытую степь.

На первый взгляд западные ландшафтные комплексы могут показаться малодинамичными. Процессы преобразования рельефа здесь крайне замедлены, а именно они определяют динамику большинства других типов урочищ. Однако высокая динамичность западных ландшафтных комплексов связана с другим фактором — колебаниями уровня грунтовых вод и поверхностного увлажнения западин. Как известно, годовая сумма осадков в лесостепи подвержена большим изменениям: многоснежные зимы чередуются с бесснежными, влажное лето сменяется засушливым. Эти колебания незамедлительно сказываются на увлажнении западин, а вместе с тем и на составе их растительного покрова.

Наряду с флуктуирующей динамикой в западных ландшафтных комплексах хорошо прослеживается и эволюционная динамика. Подробное изучение этой динамики показало, что происходит естественный процесс облесения западин по схеме: засоленная западина — ивняк — осиновый куст — дубрава. Процесс этот мыслится как спонтанное развитие (саморазвитие) западных ландшафтов, не связанное с изменениями общей физико-географической среды (Попов, 1914). Классическая схема эволюции западных комплексов Т. И. Попова нуждается в пересмотре (Милюков, 1958).

Во-первых, расселение почв не является единственным ведущим фактором эволюции западных комплексов; в северной лесостепи (полоса серых лесных почв и оподзоленных черноземов) оно вообще не имеет места. Исходным звеном эволюции западных комплексов на севере чаще всего является не солонец, а озерко или просто луговина с достаточно хорошо промытыми почвами. Что касается солонцов, то и здесь совсем не обязательна стадия ивняков: известно много фактов, когда на солонце сразу появляются угнетенные осина и дуб.

Во-вторых, эволюция западных комплексов Тамбовской равнины совершается на фоне прогрессирующего понижения уровня грунтовых вод, вызванного ростом эрозионного расчленения территории. Уровень же грунтовых вод, а не стадия эволюции, является определяющим фактором становления того или иного рода западных ландшафтных комплексов. При поверхностном обводнении или близком залегании грунтовых вод (десятки сантиметров от поверхности) западное болото никогда не превратится ни в осиновый, ни в смешанный (осиново-дубовый) куст. В то же время опускание уровня грунтовых вод глубже

5-6 м от поверхности, когда междуречный тип местности эволюционирует в плакорный, сопровождается отмиранием осиновых кустов и их переходом в дубраву.

Развитие западинных комплексов всей Окско-Донской низменности происходило следующим образом. В первой половине голоцена, когда равнина была недостаточно дренирована, более широко, чем сейчас, был распространен междуречный недренированный тип местности с множеством озерных и болотных западин, ивняков и осиновых кустов. До понижения уровня грунтовых вод в прошлом многие осиновые кусты соединялись между собой лесными рощами, образуя сплошные лесные массивы. Позже, по мере врезания рек и роста овражно-балочной сети, происходило понижение уровня грунтовых вод, сокращение площади междуречного недренированного типа местности, а вместе с этим отрыв осиновых кустов от верховодки и их гибель. Вследствие понижения уровня грунтовых вод произошло частичное остепнение межзападинных пространств, а впоследствии — их распашка. В составе лесных западин усилилась роль смешанных (осиново-дубовых) кустов.

Таким по мнению Ф.Н. Милькова образом, многие современные осиновые и осиново-дубовые западины следует рассматривать не как авангард наступающего на степь леса, а как остатки существовавших в прошлом водораздельных лесов. Подтверждением сказанного являются западинные лесные комплексы (рис. 21).



Рисунок 21. Схема эволюции западинных комплексов (Ф.Н. Мильков 1976)

Глава 3. Материалы и методы

3.1 Обоснование схемы исследования

В Окско-Донской низменности, как и в других лесостепных ландшафтах с умеренным климатом (Walter, Breckle, 1989), снежный покров формируется не каждый год, и его мощность может сильно варьироваться от сезона к сезону. Сильные засухи происходят нечасто, и, как правило, они случаются только в годы с крайне низким количеством осадков. В условиях аридности в лесостепи низкий уровень грунтовых вод является обычным явлением (Ахтырцев, 1999).

Не значительный по интенсивности поверхностный сток, который образуется на пологих склонах междуречий, перехватывается множеством западин. Они собирают поверхностные воды и перераспределяют их в подповерхностный сток (Hayashi et al., 2016; Meyboom, 1966; Роде, 1963). Но в годы с условиями избыточного увлажнения уровень грунтовых вод поднимается близко к поверхности, различия в глубине его залегания могут приводить к тому, что доступность воды в разных частях ландшафта может сильно разниться от недостаточной до избыточной. Это создает проблемы при применении адаптивных подходов в устойчивом управлении земельными ресурсами, и использования основных диагностических признаков как индикаторов режима функционирования ландшафтов (Spence et al., 2019).

В годы с повышенной влажностью высокий уровень грунтовых вод может негативно влиять на развитие сельскохозяйственных культур, создавая анаэробные условия для их корней. Напротив, в засушливые годы высоко поднятые грунтовые воды становятся важным источником влаги для растений. Однако в большинстве лесостепных регионов мира, включая Окско-Донскую низменность, до сих пор не разработаны модели взаимосвязи уровня грунтовых вод с гидротермическими особенностями лесостепного климата и морфологическими особенностями почв этих ландшафтов. В связи с этим возникла необходимость разработать модели, сочетающие структурно-функциональные подходы, предлагаемые ландшафтоведением с теоретическим физико-математическим гидрологическим моделированием, которые помогут принимать обоснованные решения в сельском хозяйстве и обнаружить взаимосвязь между основными диагностическими признаками почв и режимом их функционирования для целей картирования лимитирующих факторов возделывания культур. Существуют некоторые примеры таких моделей — VSMB-DUS (Noorduijn et al., 2018) и PDMROF (Mekonnen et al., 2014) - они используются для моделирования гидрологических процессов на различных пространственных масштабах в прериях Северной Америки, однако они не имеют взаимосвязи между особенностями структурной организации агроландшафта и его функционирования.

Для выявления особенностей структурно-функциональной организации и межсезонной динамики водного режима почв в работе были выполнены исследования на двух ключевых участках 1:10000 (бассейнового) и 1:500 (детального) масштабов. В обоих случаях основной акцент делался на использовании междисциплинарного подхода, заключающегося в сочетании методов полевых исследований, лабораторных анализов собранных образцов почв, мониторинговых наблюдений, применения алгоритмов дистанционного зондирования и методов статистического, эмпирического, теоретического моделирования. Исследование включало сбор и анализ данных, параметризацию моделей, а также организацию автоматизированный стационарный мониторинг влажности почв и уровня грунтовых вод.

Методические подходы, применяемые для выявления особенностей структурно-функциональной организации прерий Северной Америки, требовали адаптации для условий лесостепи Окско-Донской низменности, учитывая поставленные задачи и особенности объекта исследования была предложена схема описания взаимосвязи морфологической структуры ландшафтов Окско-Донской низменности с режимами их гидрологического функционирования, включая состав и параметризацию моделей поверхностного и внутрипочвенного стока, характерный масштаб их проявления, (рис. 22).

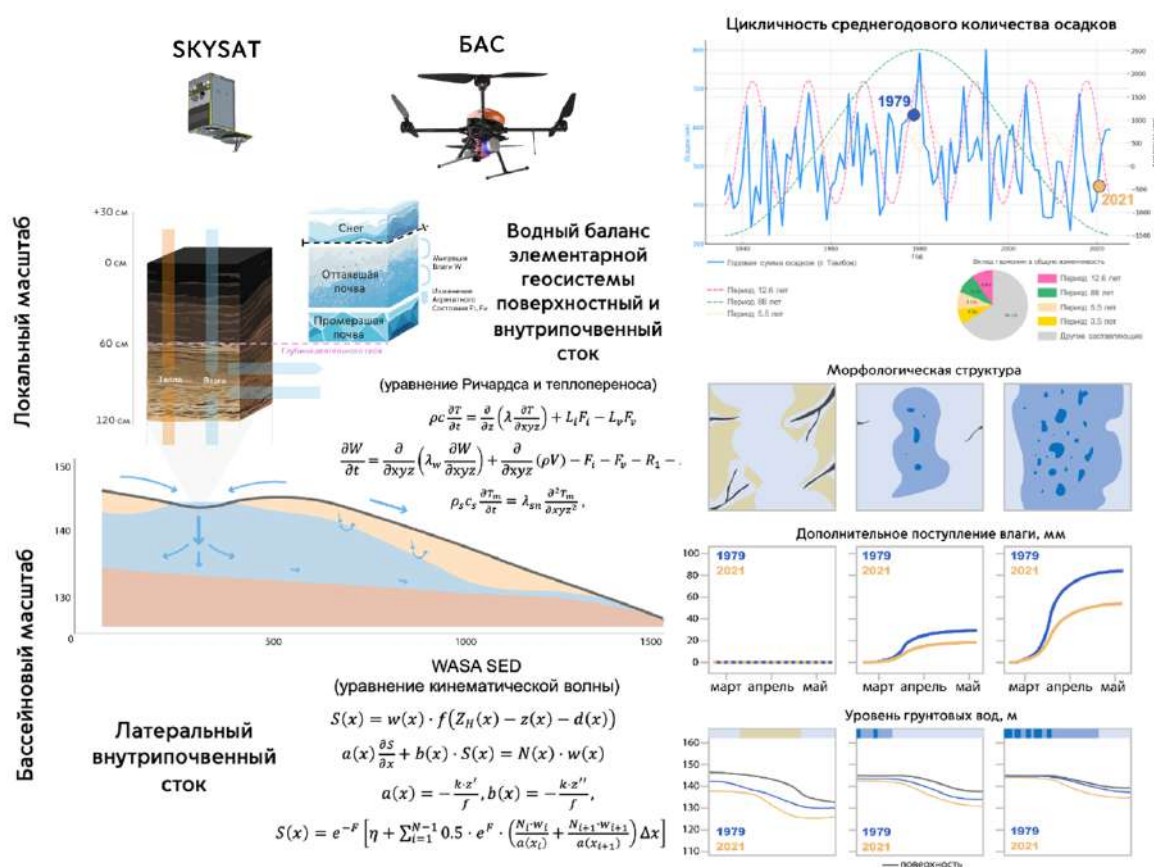


Рисунок 22. Схема описания взаимосвязи морфологической структуры ландшафтов Окско-Донской низменности с режимами их гидрологического функционирования

Для обоснования схемы описания взаимосвязи морфологической структуры ландшафтов с режимами их гидрологического функционирования была разработана многоуровневая методика, объединяющая результаты гидрофизического моделирования, цифровой почвенной картографии, автоматизированного мониторинга и дистанционного зондирования. В рамках данной схемы ландшафтная структура представлена в виде иерархии — от бассейнов до элементарных склонов и гидрологически связанных почвенных профилей. В основе схемы — совмещение моделей поверхностного и внутрипочвенного стока: уравнение Ричардса (для влагопереноса и фазовых переходов в почвенном профиле) и уравнение кинематической волны (модель WASA SED) для латерального стока в топопоследовательностях. Установка граничных условий и параметризация моделей осуществлялась по данным полевых описаний, цифровых моделей рельефа и составленных почвенных и ландшафтных карт. Характерные масштабы проявления стока определялись на уровне топопоследовательностей в зависимости от морфологического строения и плотности западин. Для верификации и калибровки моделей использовались данные автоматизированного мониторинга влажности почв и уровня грунтовых вод, косвенные подходы через сопоставление основных морфологических признаков почв с режимом их функционирования, а также материалы дистанционного зондирования (БАС, спутниковые данные группировки Planet Labs - SKYSAT) и ЦМР сверхвысокого разрешения. Схема позволила интегрировать пространственные данные и моделирование в единую систему, пригодную для анализа гидрологического функционирования ландшафтов в условиях климатической изменчивости и оценить вклад западинных урочищ.

3.2 Мониторинг динамики уровня воды в западинах для параметризации верхних граничных условий поступления влаги

3.2.1 Параметризация верхних граничных условий

Для параметризации верхних граничных условий поступления влаги в локальную модель необходимо учитывать изменение уровня воды в западинах, так как они влияют на распределение поверхностных и подповерхностных потоков.

Мониторинг и моделирование динамики уровня воды в западинах весной 2021 года были выполнены с использованием трех типов данных (рис. 24). Для построения цифровой модели рельефа сверхвысокого разрешения (25 см) использовались данные, полученные с малогабаритного беспилотного воздушного судна (БВС) DJI Mavic 2 Pro. Ортофотопланы местности в видимом диапазоне со сверхвысоким разрешением (25 см) получены с беспилотного летательного аппарата (БПЛА), а ортофотопланы высокого разрешения (3 м) — с датчиков мини-спутников RapidEye и SkySat системы Planet Labs (рис.23, 24). Данные об осадках с суточным разрешением поступали с ближайшей метеостанции в городе Липецке.

Для расчета испарения с поверхности воды использовалось уравнение Пенмана, основанное на метеорологических данных той же станции.

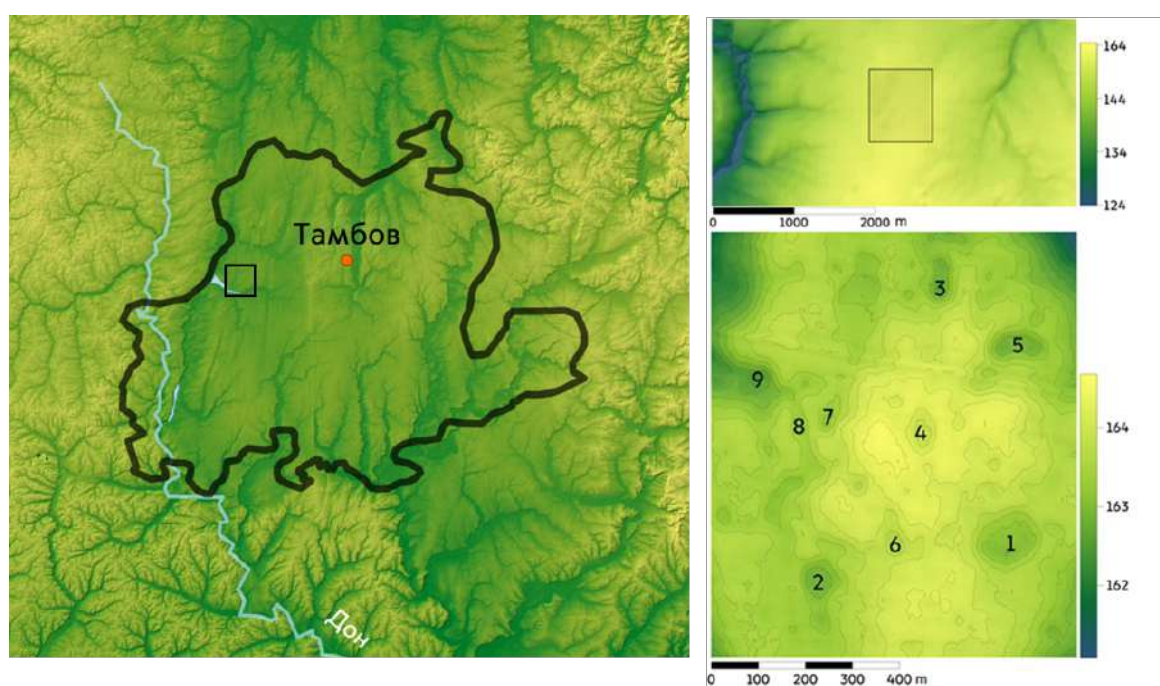


Рисунок 23. Расположение ключевого участка исследования и изучаемых западин

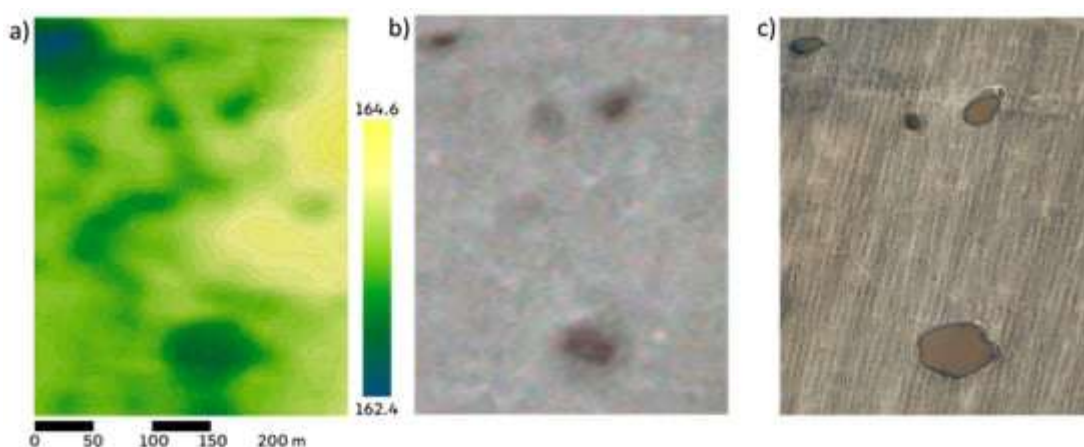


Рисунок 24. Источники пространственных данных. (а) ЦМР высокого разрешения, полученная фотограмметрически, с цветами, обозначающими высоты. (б) Цифровые изображения местности Planet Labs в видимом спектре с разрешением 3 м. (в) Цифровое изображение высокого разрешения, полученное с помощью БПЛА в видимом диапазоне спектра.

Данные были получены с использованием метода цифровой стереофотограмметрии, который заключается в оценке трехмерных координат точек объекта по двум и более фотоизображениям, сделанным с разных позиций малогабаритным БВС. Применялся

стандартный метод построения цифровой модели местности с использованием малого БВС, обеспечивающий точность до 0,03 м (далее — ЦМР БВС).

Использовалось приложение маршрутизации Mavic 2 Pro (DroneDeploy.com). Геолокационные маркеры размещались на поверхности, а их координаты определялись с помощью системы STONEX GNSS (высота полета 150 м, перекрытие изображений 75%). В результате полета были получены цифровые фотографии местности, на основе которых в программном обеспечении Agisoft Metashape было создано плотное облако точек для формирования цифровой модели местности. Затем вручную отфильтровывались точки, связанные с агролесомелиорацией и лесополосами, находящимися в пределах полей. Обработка проводилась в ArcGIS Pro с использованием маски поля и маски растительности, полученных путем ручной расшифровки материалов БВС. Для идентификации деревьев использовались ортофотокарты, созданные на основе спутниковых снимков, загруженных через сервис Bing. Точки, соответствующие высоте деревьев, были удалены.

На основе оставшегося облака точек была создана цифровая модель территории с разрешением 25 см с помощью инструмента интерполяции крикинга в ArcMap Pro. Ортофотоплан был создан в Agisoft Metashape и экспортирован с разрешением 25 см. Для анализа динамики временных водоемов в исследуемый период использовались временные ряды ортофотопланов высокого разрешения (1–3 м), загруженные с портала Planet Labs Inc. Изображения загружались в периоды отсутствия облачности, начиная с начала весеннего таяния снега и до пересыхания временных водоемов в начале лета.

3.2.2 Разграничение водных объектов в западинах

Ортофотокарты, созданные с помощью БВС, позволяют легко дешифровать водные поверхности, так как они могут быть визуально проанализированы для точного определения границ воды и суши. В то же время ортомозаичные карты, полученные от Planet Labs, имеют более низкое разрешение и подвержены большему влиянию атмосферного шума. В связи с этим для разграничения водной поверхности и суши в этих данных был использован инструмент Interactive Supervised Classification в настольном приложении ArcGIS Pro.

Для выполнения классификации водных объектов был сформирован обучающий датасет, основанный на ортофотоплане сверхвысокого разрешения. Этот референсный набор использовался в качестве основы для автоматизированного выделения водоёмов на спутниковых изображениях Planet Labs с применением объектно-ориентированного подхода к контролируемой классификации, реализованного средствами инструментов ArcGIS Pro. Объектно-ориентированная классификация демонстрирует более высокую эффективность по

сравнению с пиксельной классификацией при работе с изображениями высокого пространственного разрешения (Li, 2014), и ранее успешно применялась для идентификации замкнутых природных форм, включая западины (Waz, 2017; Gadai, 2020).

Процедура классификации включала несколько этапов. На первом этапе был сформирован анализируемый растровый массив, ограниченный границами кадастрового участка (по данным Росреестра), с последующим расширением на 15 метров за его пределы с каждой стороны. Такая буферизация позволила исключить из анализа объекты, не относящиеся к стабильным водным поверхностям — например, оголённые почвы на сельскохозяйственных полях в начале вегетационного сезона или участки временного затопления. Кроме того, для повышения точности распознавания была реализована процедура маскирования, позволившая удалить из выборки нежелательные объекты, включая древесную растительность, транспортную инфраструктуру и строения.

На втором этапе выполнялась сегментация изображения по методу среднего сдвига (mean shift), который применяется для агрегирования пикселей на основе их спектральной однородности и пространственной близости (Fukunaga, 1975; Comaniciu, 2002). Данный алгоритм, интегрированный в инструментарий ArcGIS Pro, позволил объединить сходные по спектральным признакам пиксели в связные пространственные объекты. В качестве параметра сегментации использовался минимальный размер объекта, выраженный в количестве пикселей, что обеспечило контроль над детализацией результирующих участков классификации. Параметры безразмерной шкалы сегментации, определяющие средний размер объектов и регулирующие допустимую степень их однородности для объединения, были установлены равными 10 по шкале RGB.

На третьем этапе создавалась обучающая выборка. Поскольку по мере приближения лета запасы воды в западинах неизбежно сокращаются (рис. 26), можно было предположить, что водные поверхности, присутствовавшие на момент полета БВС, также были зафиксированы в более ранние даты. Для каждой группы дат перед съемкой БВС создавалось три обучающие выборки (рис. 3), в которых выделялись две категории: вода и поверхность почвы.

На завершающем этапе для каждого снимка были применены два метода машинного обучения: метод случайного леса (RF) (Breiman, 2001; Belgiu, 2016) и метод опорных векторов (SVM) (Vapnik, 1995). Эти алгоритмы использовались для классификации сегментированных изображений на основе обучающих данных, что позволило получить набор бинарных растров, разделяющих поверхность на классы «вода» и «не вода». Для проверки точности классификации тестовый набор из следующего полета БВС использовался для валидации полученных бинарных моделей.

Это позволило идентифицировать площади водного зеркала в западинах для каждой сцены. Однако на классифицированных изображениях границы водоемов не имели постоянной высоты относительно ЦМР БВС, что могло привести к искажениям. Чтобы избежать этого неестественного изменения высоты, классифицированный растр был преобразован в векторный слой, содержащий только полигоны водной поверхности.

Далее вдоль внешней границы каждого водного полигона производилась выборка значений ЦМР БВС с шагом 25 сантиметров. Для извлеченных значений рассчитывалась медиана, после чего контур водного объекта создавался заново, но уже в соответствии со средним значением высоты на ЦМР БВС. Таким образом, внешние границы водоемов принудительно принимали постоянное значение высоты.

Применение данной процедуры позволило избежать ошибок классификации, вызванных смешанными пикселями Planet Labs из-за относительно низкого разрешения, поскольку вместо растровой области использовался векторный формат. Для сравнения также была выполнена классификация исключительно по пиксельным значениям. Полученные ЦМР и векторный слой полигонов водных объектов использовались для расчета объема воды в каждой западине в дни, когда были сделаны снимки. Для этого применялся инструмент Surface-Volume из ArcGIS Pro, который позволял вычислить площадь и объем между поверхностью воды и опорной плоскостью (Polygon Volume, 3D Analyst). В результате было определено содержание воды в каждой западине в кубических метрах на каждый день наблюдений (рис. 25).

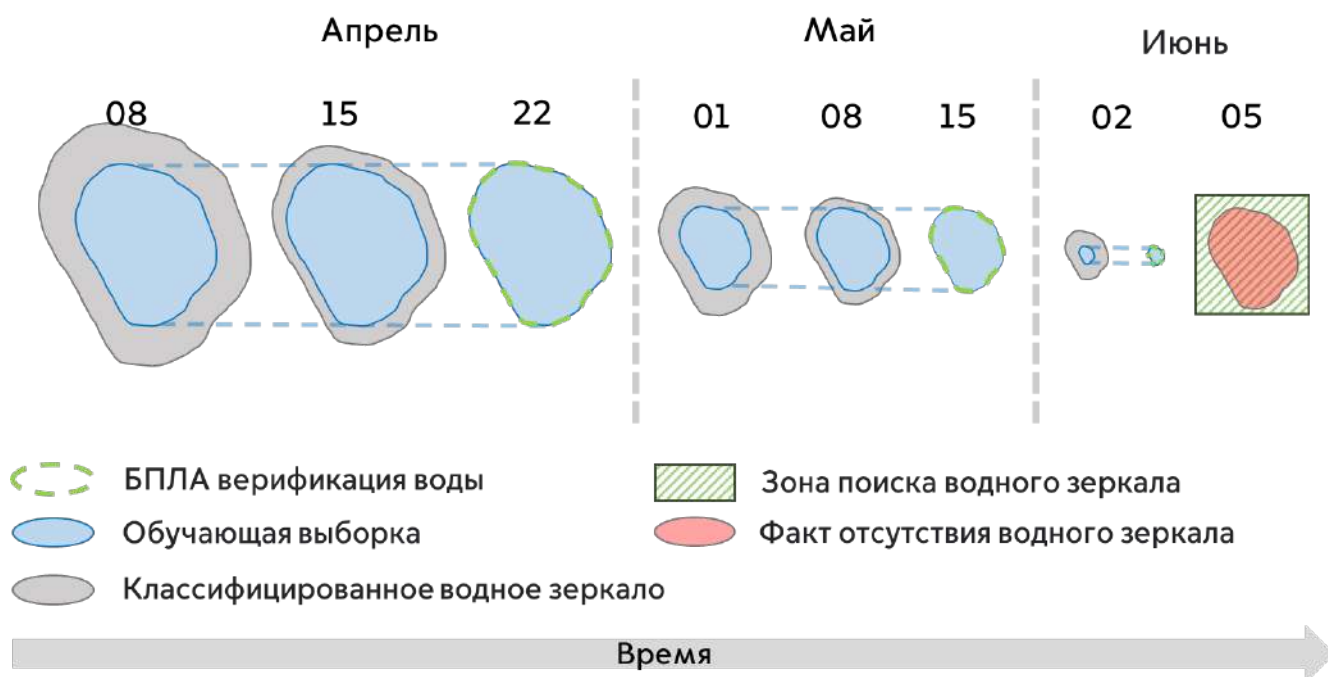


Рисунок 25. На представленной схеме визуализированы ключевые этапы объектно-ориентированной классификации водоёмов. В нижней части рисунка стрелкой обозначен обобщённый тренд сезонного осушения западин весной — в направлении слева направо. Зеленые пунктирные контуры, окружающие синие участки, отражают конфигурацию водной поверхности, зафиксированной с помощью беспилотного летательного аппарата (БВС) в контрольные даты: 22 апреля, 15 мая и 2 июня. Серым цветом выделены площади, распознанные как водные объекты в результате объектно-ориентированной классификации спутниковых изображений, обученной на подмножестве точек, отобранных из более поздних БВС-съемок.

Для построения обучающего набора использовались данные трёх временных интервалов. Область, закрашенная светло-красным цветом и покрытая зелёной штриховкой, представляет собой зону, в которой осуществлялся поиск признаков водного зеркала БВС в дату, когда водоём уже пересох. Таким образом, фиксируется не только динамика осушения, но и пространственный максимум распространения воды в пределах западины.

Максимальная площадь водной поверхности интерпретируется как площадь, соответствующая объёму воды до начала перелива. Этот объём определяется как уровень, при котором вода достигает минимального значения высоты по векторной границе водосборного бассейна, построенной на основе цифровой модели рельефа (ЦМР), полученной с БВС. Граница бассейна определялась с использованием инструмента Basin в ArcGIS, на основе раstra направления потока, рассчитанного с применением инструмента Flow Direction (ArcGIS Pro), также по данным ЦМР БВС.

Для расчёта необходимого слоя воды, обеспечивающего заполнение западины до уровня перелива, использовалось отношение максимального объёма воды к площади соответствующего водосборного бассейна. Полученное значение (в мм) позволяет количественно оценить вклад локального стока в формирование сезонной водной поверхности в пределах каждой западины.

3.2.3. Учет испарения воды из западины

Результаты многолетних исследований показывают, что все три общепринятых метода оценки эвапотранспирации из водонасыщенных и покрытых растительностью западин имеют приемлемую точность для оценки испарения из открытой воды (Armstrong 2008). Наиболее удобный из этих методов, классическая форма уравнения Пенмана (Penman 1948, 1956), который был использован в данной работе для оценки потенциального испарения:

$$E_{PEN} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n}{\lambda} \frac{\gamma}{\gamma + \Delta} \frac{6.43 E_A}{\lambda}, \quad (1)$$

где: E_{PEN} – потенциальное (открытая вода) испарение (мм/сутки); R_n – чистая радиация на поверхности (МДж/м²/сутки); Δ — наклон кривой давления насыщенного пара (кПа/°C); γ — психрометрический коэффициент (кПа/°C); λ — скрытая теплота парообразования (МДж/кг); E_A — осушающая способность воздуха, которую можно найти, используя следующую формулу типа Дальтона:

$$E_A = f(U) D = (1 + 0.536U) (e_s - e_a) \quad (2)$$

Здесь: $f(U)$ — ветровая функция с линейными коэффициентами для исходного уравнения Пенмана (1948, 1963); u — скорость ветра на высоте 2 м (м/с), $D = (e_s - e_a)$ — дефицит давления пара (кПа); e_s — давление насыщенного пара (кПа); e_a — фактическое давление паров (кПа). Испарение в открытой воде было рассчитано на основе доступных данных, как описано ранее (Valiantzas 2006) и реализовано в библиотеке Evaplib Python. Исходными данными для этого были температура воздуха (T , °C), солнечная радиация (RS , МДж/м²/сут), относительная влажность (RH , %) и скорость ветра (u , м/с).

В отсутствие актинометрических измерений чистой радиации на поверхности она была рассчитана на основе количества облачного покрова, зарегистрированного на метеостанции, и предыдущей региональной калибровки (Allen 199)

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r (\omega_s \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)) \quad (3)$$

Где: R_a — внеземное излучение (МДж/м²/сут**), G_{sc} — солнечная постоянная (0,0820 МДж/м²/мин), d_r — величина, обратная относительному расстоянию между Землей и Солнцем, ω_s — часовой угол захода Солнца. (рад), ϕ — широта (рад), а δ — солнечное склонение (рад)

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (4)$$

где J - день в году;

Солнечное излучение, R_s , можно рассчитать по значению облачности:

$$R_s = (a_s + b_s (1 - N)) R_a \quad (5)$$

Где N — количество облаков (в диапазоне от 0 для ясного неба до 1 для полной облачности), а a_s и b_s — значения ангстрем, и без региональной калибровки рекомендуются значения 0,25 и 0,50 соответственно (Wade 2003).

Чистое длинноволновое излучение (R_{nl}) можно оценить по температуре воздуха, фактическому давлению пара и солнечному излучению. Чистое длинноволновое излучение выражается законом Стефана – Больцмана:

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T}{T_{min}^2} (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \right) \quad (6)$$

Где T_{max} — максимальная суточная температура воздуха (К), T_{min} — минимальная суточная температура воздуха (К), а R_{so} — радиация при ясном небе (МДж/м²/сутки) согласно:

$$R_{so} = (a_s + b_s) R_a \quad (7)$$

Была принята постоянное альбедо 7% (0,07) для водных поверхностей в расчетах, основанное на широте и опубликованных средних эталонных значениях [51].

$$R_n = (1 - \alpha) R_s - R_{nl} \quad (8)$$

Были рассчитаны суточные значения испарения. Исходные данные для уравнений (1а), (1б) и (4) и суточные осадки были получены с ближайшей метеостанции (г. Липецк).

Водный баланс и повторная калибровка модели уровня подземных вод

Скорость инфильтрации (мм/сут) рассчитывалась по уравнению суточного водного баланса:

$$F = 1000 \cdot [-\Delta V - A_t (E_{PEN} - P)] / A_t \quad (9)$$

где $-\Delta V$ — суточная скорость уменьшения объема воды (м³), A_t — текущая площадь водного зеркала (м²), P — дневное количество осадков (мм/сутки).

Объем воды в данный юлианский день (день T) был получен из объема в первый юлианский день в серии (день F) и следующего отрицательного экспоненциального уравнения:

$$V = a \cdot e^{-c(\text{day}T - \text{day}F)} \quad (10)$$

Масштабный коэффициент a и степень показателя c (приблизительный начальный объем воды и скорость расхода соответственно) были получены методом наименьших квадратов, который дал аппроксимацию с $R^2 > 0,9$ для каждого из исследованных водных зеркал. Предполагаемый объем в каждый день использовался для расчета скорости уменьшения объема воды с дневным временным шагом (рис 26).

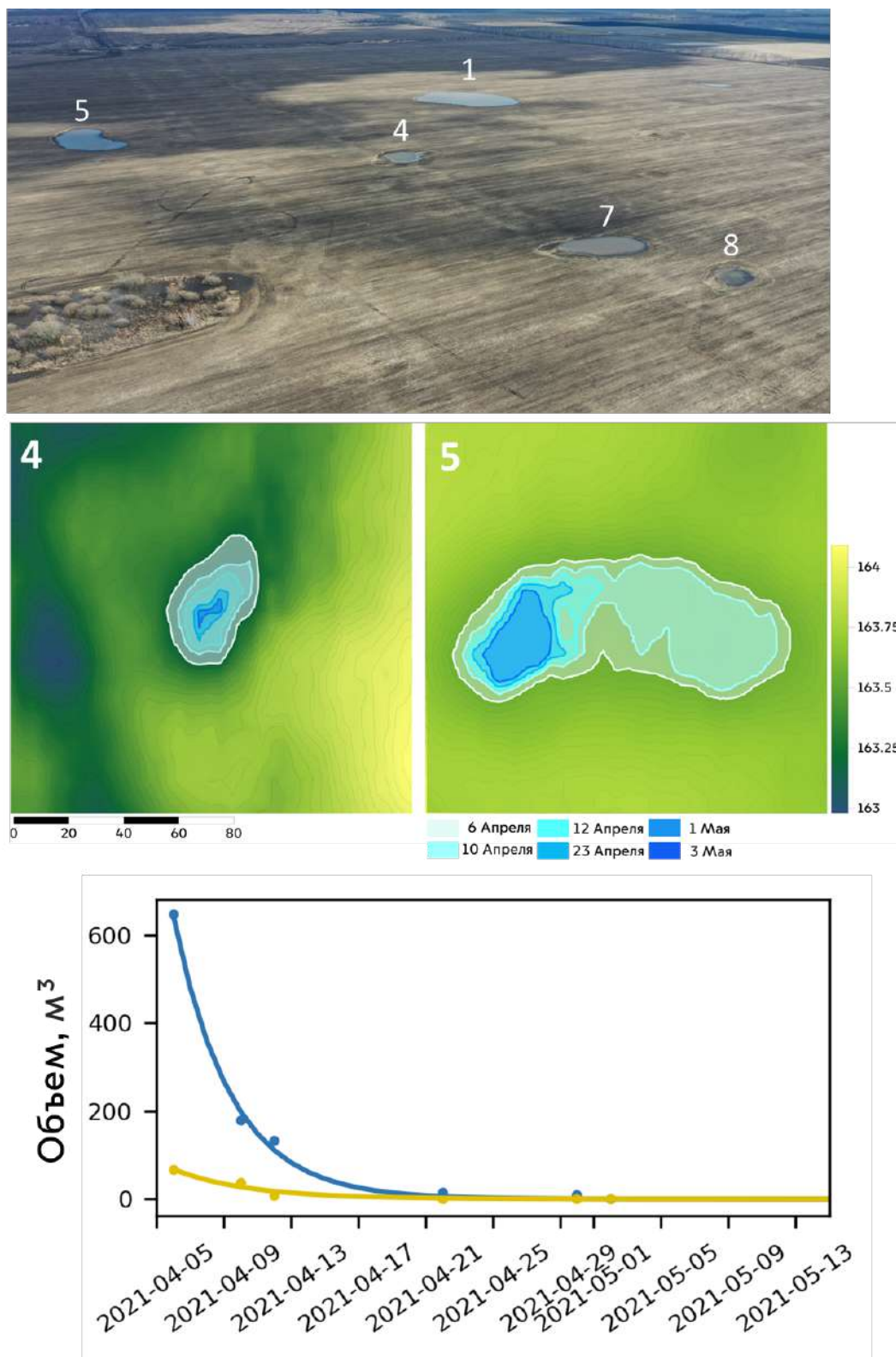


Рисунок 26. Временная изменчивость функционирования западин. В верхней части положение западин 4 и 5 на фотоизображении с БВС. Ниже - уровни воды в западинах в указанные даты по классификации снимков (выделены цветом по дням). Нижняя часть - объемы воды в западинах 4 и 5 в указанные даты (точки) и отрицательные экспоненциальные аппроксимации(линии).

Ограничением метода является выбор первого дня инфильтрации, так как невозможно определить границу воды в западинах, когда они покрыты снегом. Вода начинает проникать в почву при положительных температурах, но классификация снимков с частичным снежным покровом затруднена или невозможна. Поэтому для анализа использовался первый снимок Planet Labs, на котором, согласно данным ближайшей метеостанции (г. Липецк), отсутствовал снежный покров.

Двумерный профиль стационарной глубины уровня грунтовых вод был построен на основе аналитического решения уравнения неразрывности потока, откалиброванного с использованием редоксиморфных признаков как прокси-индикаторов окислительно-восстановительного режима в почвенном профиле. В предыдущем разделе, на основании экспертных знаний о типах почв и их соотношении с уровнями грунтовых вод, была предложена гипотеза о наличии устойчивой связи между архивными морфологическими характеристиками почв и современными гидрологическими условиями. В качестве индикаторов использовались признаки оглеения и ржавчин, фиксируемые в пределах корнеобитаемой зоны, как отражение длительности и частоты анаэробных условий.

Далее данная гипотеза была проверена численно, с учётом ограничений, накладываемых на непрерывность подземного потока по склону. В этом контексте использовалась стационарная формулировка уравнения, включающая два свободных параметра — гидравлическую проводимость почвенного массива и скорость пополнения водоносного горизонта. Эти параметры задавали форму профиля и регулировали положение изолиний уровня грунтовых вод вдоль склона.

Горизонтальный профиль входящего потока (скорости пополнения) определялся как интеграл уравнения по времени, а пространственное варьировался вдоль ландшафтной трансекты — с учётом положения локальных понижений, микрозападин и зон аккумуляции стока. Поскольку инфильтрация атмосферных осадков не тождественна скорости пополнения водоносного горизонта, для адекватного описания пространственной изменчивости использовалась нормализация значений в диапазоне 0;1. Абсолютные значения, в свою очередь, калибровались в зависимости от гидравлической проводимости по соотношению N/k , где N — эффективная скорость пополнения, k — коэффициент насыщенной фильтрации.

Такой подход позволяет перейти от качественной оценки глееватой к количественной реконструкции уровня грунтовых вод с привязкой к конкретным морфологическим условиям микрорельефа и типам почв, закладывая основу для последующего прогноза гидрологического функционирования западинных урочищ. Средняя во времени инфильтрация рассчитывалась по объёму воды, просочившейся в замкнутые западины. Для этого было заложено 10 регулярных топографических профилей, представляющих собой обобщенный

разрез протяженностью 3 км, пересекающий междуречье вдоль основного склона. Профили включали равномерно расположенные точки с шагом 5 м, в каждой из которых определялась величина слоя воды (мм), фильтрующегося в замкнутом понижении. Затем 10 топографических профилей были объединены в единый разрез путем усреднения значений, соответствующих порядку точек водного слоя. Регулярное размещение топографических профилей и точек отбора проб было направлено на оптимизацию двухмерной характеристики дополнительной инфильтрации влаги вдоль изучаемого разреза (рис. 27).

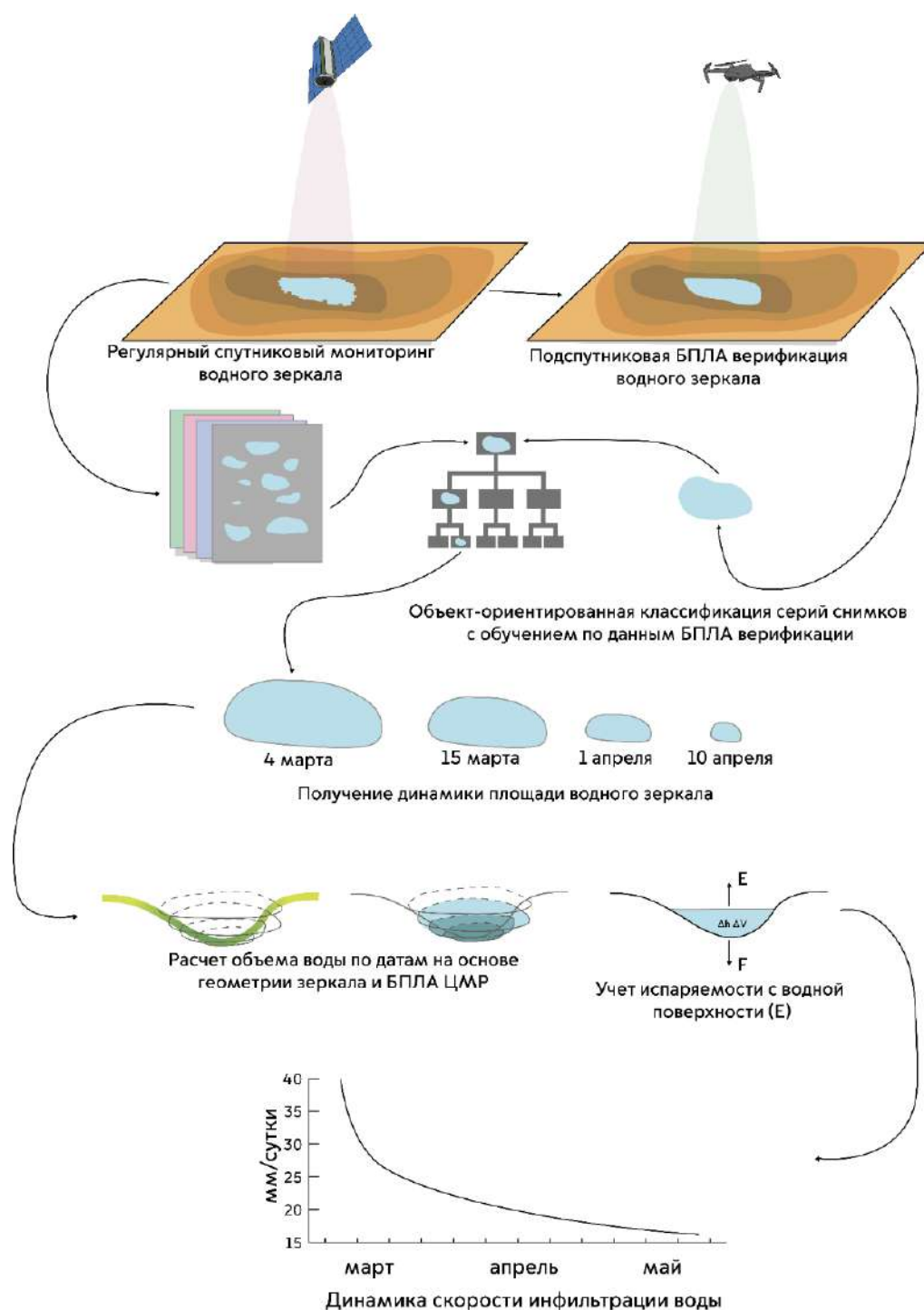


Рисунок 27. Схема дистанционного мониторинга динамики уровня воды в западинах

3.3 Постановка краевой задачи и определения граничных условий модели структурно-функциональной организации и межсезонной динамики водного режима почв на ключевом участке детального масштаба

3.3.1 Модель движения влаги на локальном масштабе

Для моделирования водного режима на детальном участке использовался подход, основанный на уравнении Ричардса, которое описывает движение воды в почве с учетом ее насыщенности. Это уравнение сочетает закон Дарси для описания потока воды и уравнение непрерывности для баланса массы, дополненное эмпирическими зависимостями Ван Генухтена.

Динамика водного потока в почвенной среде напрямую зависит от степени насыщенности порового пространства. В условиях полного насыщения водоносных пор фильтрационные процессы подчиняются классическому закону Дарси, где скорость потока определяется градиентом напора и коэффициентом фильтрации. Однако в большинстве случаев почвы пребывают в частично насыщенном состоянии, при котором применение традиционной формы уравнения Дарси становится некорректным.

В таких условиях используется его модифицированная версия, учитывающая специфику капиллярных и сорбционных взаимодействий. Вместо градиента гидравлического напора в уравнение вводятся градиенты капиллярно-сорбционного и гравитационного потенциалов влаги. Также коэффициент фильтрации заменяется на влагопроводность, рассматриваемую как нелинейная функция от степени насыщения почвы.

В результате подстановки влагопроводности и дифференциальной влагоёмкости в уравнение переноса влаги по пористой среде формулируется обобщённое дифференциальное уравнение движения влаги, которое в литературе известно как уравнение Ричардса. Оно представляет собой основную модель описания нестационарных влагопереносных процессов в неравномерно насыщенных почвах и широко используется в численном моделировании водного режима в почвенно-грунтовых системах.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (11)$$

где - K - коэффициент фильтрации в ненасыщенной зоне, ψ - высота всасывающего давления, z — высота над плоскостью сравнения, θ — объемная влажность, и t - время.

В ненасыщенной среде дополнительно учитывается капиллярное давление, характеризующее связь воды с почвенной матрицей. Зависимость влажности от давления выражается через кривую основной гидрофизической характеристики почвы (ОГХ) (Ван Генухтен, 1980; Сысуев, 2020) (рис. 28). Для учета латеральной миграции влаги и фазовых переходов воды уравнение Ричардса было реализовано в программном коде Fortran опираясь на работы [Володин, Лыкосов, 1998]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial xyz} \right) + L_i F_i - L_v F_v \quad (12)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial xyz} \left(\lambda_w \frac{\partial W}{\partial xyz} \right) + \frac{\partial}{\partial xyz} (\rho V) - F_i - F_v - R_1 - R_2$$

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_m}{\partial t} = \lambda_{sn} \frac{\partial^2 T_m}{\partial xyz^2},$$

где: $\frac{\partial I}{\partial t} = F_i$; ρ - плотность почвы (кг/м³); c - удельная теплоёмкость почвы (Дж/кг·К); T - температура (°C); t - время (с); xyz - координата (м); λ - коэффициент теплопроводности (Вт/м·К); L_i , L_v - удельные теплоты фазовых переходов (Дж/кг): L_i - замерзание/таяние; L_v - испарение/конденсация; W - содержание жидкой воды (кг/кг); V - содержание водяного пара (кг/кг); I - содержание льда (кг/кг); F_i , F_v - скорости фазовых переходов льда и водяного пара (кг/м³·с); R_1, R_2 — потери влаги на испарение и дренаж; ρ - плотность снега (кг/м³); c - теплоёмкость снега (Дж/кг·К); T_t - температура снега (°C); λ_{sn} - коэффициент теплопроводности снега (Вт/м·К).

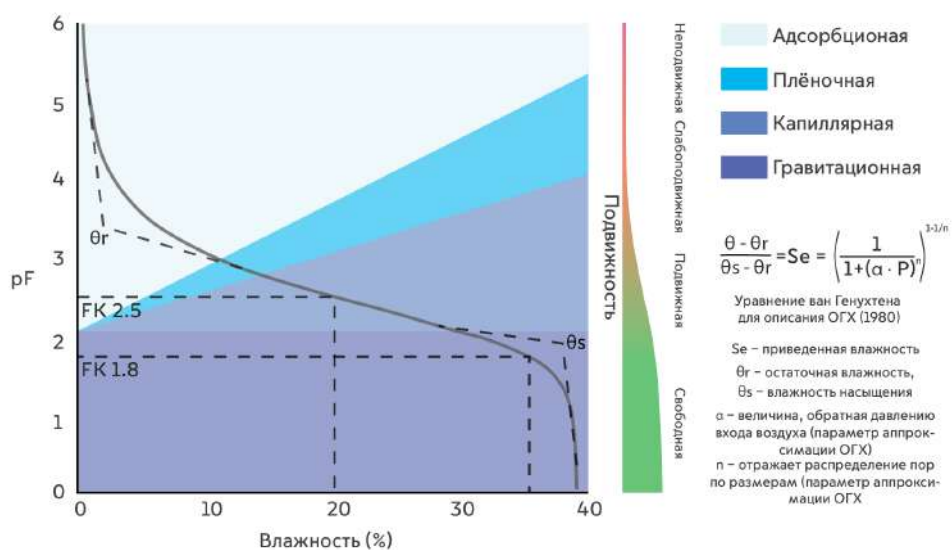


Рисунок 28. ОГХ и параметры ван Генухтена.

3.3.2 Параметризация и верификация модели внутripочвенной фильтрации

Пространственная параметризация коэффициента фильтрации для точек параметризации модели была сделана 2 способами: представленной в предыдущем разделе измерением скорости фильтрации в западинах на основе измерения скорости убывания влаги и непосредственного полевого измерения темпов фильтрации методом заливных площадок (рис. 29).

Для верификации моделей была разработана система автоматизированного мониторинга грунтовых вод и влажности почвы, включающая FDR-сенсоры (Frequency Domain Reflectometry) для измерения влажности и температуры почвы. Принцип работы сенсоров основан на изменении частоты электромагнитного импульса в зависимости от диэлектрических свойств среды, которые определяются содержанием влаги. Система оснащена интернет-логгером с GSM-модемом для передачи данных, что позволяет сохранять измерения в памяти устройства и отправлять их на сервер в режиме реального времени. Помимо автоматизированного мониторинга, динамика влажности почвы также измерялась вручную в ходе шести полевых экспедиций весной 2021 года. Измерения проводились в 16 точках на четырех глубинах, что позволило дополнить данные автоматической системы и уточнить характеристики влагонакопления в почве.

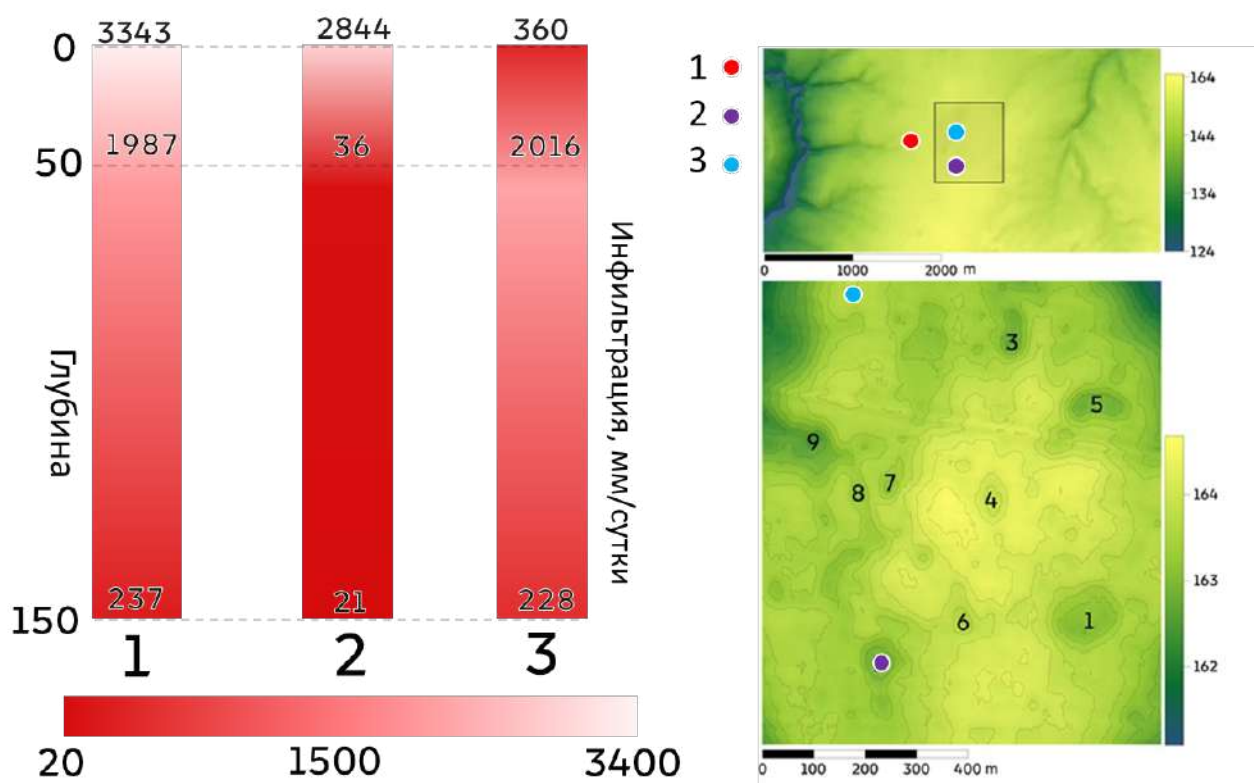


Рисунок 29. Результаты измерения скорости фильтрации воды в точках по глубинам методом заливных площадей.



Рисунок 30. Цифровая воксельная модель почвенного монолита (разрешение 0.002 мм)

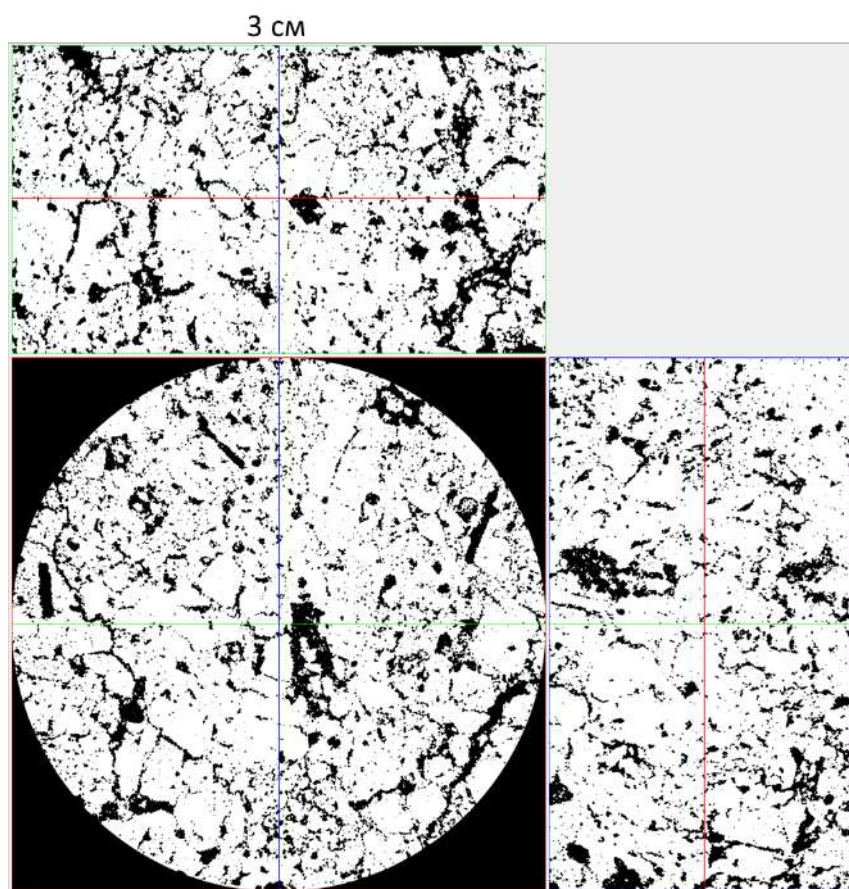


Рисунок 31. Бинаризованное изображение разверстка почвенного монолита. Белым цветом изображена – твердая фаза, черным - поры.

Гидрофизические характеристики почвы были параметризованы с использованием данных ROSETTA 3 и лабораторных анализов методом седиментации. Для учета верхних граничных условий применялись метеорологические данные Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) за период 1936–2023 гг (рис.30-31).

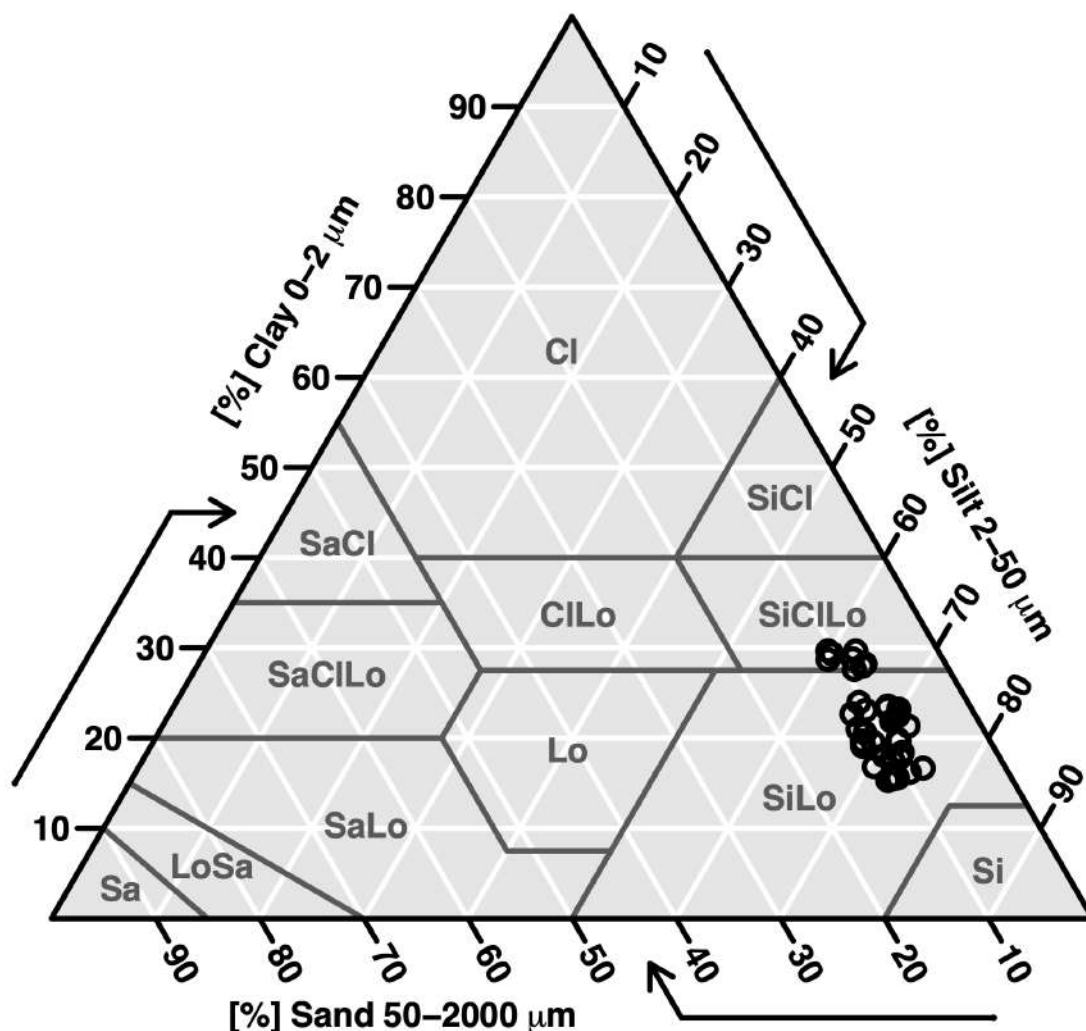


Рисунок 32. Гранулометрический состав образцов используемых в параметризации модели

Расчет количества поступающей на верхнюю границу воды и глубина водоупорной поверхности были получены так же по результат мониторинга динамики уровня воды в западинах. Для параметризации погодных условий использовались материалы Европейского Центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF, ERA%). Реализация модели выполнена в среде программирования Python и Fortran.

Таблица 1. Параметры и начальные условия Лугово-черноземной почвы

layer	Clay	Silt	Organic carbon	Starting theta or	Starting temp	AE V	BCA M	Bulk density	Match K	W0	Wm
1	67.5 4	26.7 8	6.06	0.1	0.5	- 16.8	4.57	1.38	23	0.18	0.07
2	67.5 4	26.7 8	5.95	0.12	2.5	- 16.8	4.57	1.34	27	0.18	0.07
3	67.5 4	26.7 8	5.9	0.15	2.4	- 16.8	4.57	1.44	18	0.18	0.07
4	67.5 4	26.7 8	5.8	0.15	2.3	- 16.8	4.57	1.44	18	0.18	0.07
5	67.5 4	27.5 4	5.1	0.15	2.2	- 16.8	4.57	1.44	22	0.18	0.07
6	67.5 4	27.5 4	4.65	0.2	2.1	- 16.8	4.57	1.54	14	0.18	0.07
7	67.5 4	27.5 4	3.24	0.2	2	- 16.8	4.57	1.54	14	0.18	0.07
8	67.5 4	29.0 9	1	0.2	2.1	- 16.8	4.57	1.54	22	0.18	0.07
9	67.5 4	29.0 9	0.5	0.2	5.2	- 16.8	4.57	1.54	22	0.08	0.03
10	67.5 4	29.0 9	0.32	0.2	6.3	- 16.8	4.57	1.54	22	0.08	0.03
11	67.5 4	30.6 9	0.16	0.25	6.4	- 16.8	4.57	1.54	34	0.08	0.03
12	67.5 4	30.6 9	0.16	0.25	6.5	- 16.8	4.57	1.54	34	0.08	0.03
13	67.5 4	31.7 3	0.012	0.25	6.6	- 16.8	4.57	1.54	38	0.08	0.03
14	67.5 4	31.7 3	0.012	0.25	6.8	- 16.8	4.57	1.54	38	0.08	0.03
15	67.5 4	31.7 3	0.012	0.25	6.9	- 16.8	4.57	1.54	38	0.08	0.03
16	67.5 4	31.7 3	0.012	0.25	6	- 16.8	4.57	1.54	38	0.08	0.03
17	67.5 4	31.7 3	0.012	0.25	6.1	- 16.8	4.57	1.54	38	0.08	0.03
18	67.5 4	31.7 3	0.012	0.3	6.2	- 16.8	4.57	1.64	26	0.08	0.03
19	67.5 4	31.7 3	0.012	0.3	6.3	- 16.8	4.57	1.64	26	0.08	0.03
20	67.5 4	31.7 3	0.12	0.3	6.4	- 16.8	4.57	1.64	26	0.08	0.03
Particle density	2.65	2.65	1.2								

3.4 Постановка краевой задачи и определения граничных условий модели структурно-функциональной организации и межсезонной динамики водного режима почв на ключевом участке бассейнового масштаба

3.4.1. Уравнение кинематической волны

Один из переменяемых подходов к моделированию изменчивости уровня грунтовых вод в масштабе водосборных бассейнов основан на разделении ландшафтов на топопоследовательности (катены) (Güntner, 2002; Güntner and Bronstert, 2004). Для территорий с наклонными водонепроницаемыми породами (как морена), где в пространстве изменяются нижние граничные условия, в мире применяется кинематический волновой подход. Использование уравнения кинематической волны позволяет упростить трехмерные вычисления, сведя их к 2,5-мерной форме, в таком случае ключевым параметром становится продолжительность склона катены.

Для идентификации особенностей водного режима почв, в частности моделирования равновесного уровня грунтовых (УГВ) вод ключевого участка в рамках бассейнового масштаба была использована модель кинематической волны с преимуществом для аналитического и полуаналитического решения, представленная в работе Fan and Bras (1998) и расширенная Troch et al. (2002), в сочетании с косвенной параметризацией, учитывающей классификационные особенности почв согласно Классификация почв СССР 1977 года.

Уравнение кинематической волны в рамках ключевого участка использовалось для описания движения и внутрипочвенного потока в масштабе бассейна. Оно выводится на основе упрощения уравнений Сен-Венана, исключая инерционные и турбулентные компоненты, для упрощения расчетов. Моделирование глубины УГВ, $d(x)$, в исследуемых катенах было основано на решении функции ёмкости влагозапаса в почве $S(x)$, определяемой следующим образом:

$$S(x) = w(x) \cdot f(Z_H(x) - z(x) - d(x)), \quad (13)$$

где: f - дренируемая пористость, x - расстояние, отсчитываемое от вершины склона, $w(x)$ - ширина склона, $z(x)$ — высота морены, $Z_H(x)$ — высота поверхности.

Для стационарного состояния ($\partial S / \partial t = 0$) уравнение записывается следующим образом:

$$a(x) \frac{\partial S}{\partial x} + b(x) \cdot S(x) = N(x) \cdot w(x) \quad (14)$$

$$a(x) = -\frac{k \cdot z'}{f}, b(x) = -\frac{k \cdot z''}{f},$$

где: k — гидравлическая проводимость, z' , z'' — первая и вторая производные глубины морены, $N(x)$ — пополнение грунтовых вод. Полуаналитическое решение системы уравнений имеет вид:

$$S(x) = e^{-F} \left[\eta + \sum_{i=1}^{N-1} 0.5 \cdot e^F \cdot \left(\frac{N_i \cdot w_i}{a(x_i)} + \frac{N_{i+1} \cdot w_{i+1}}{a(x_{i+1})} \right) \Delta x \right] \quad (15)$$

где: $F(x) = (n-1) \ln \left(1 - \frac{x}{L} \right)$, параметры обозначают: L - длину склона катены, η - параметр, определяющий кривизну профиля катены, Δx - шаг дискретизации.

Результатом применения модели является определение влагоемкости слоев почвы вдоль катены, которые при известной пористости пересчитываются в уровень грунтовых вод от тальвега вверх по склону катены. Перед запуском модели необходимо было выполнить классификацию катен по кривизне профиля: вогнутые, где уклон увеличивается с расстоянием; выпуклые, где уклон уменьшается; и плоские, где уклон остается практически постоянным. В дополнение к определению верхних граничных условий, связанных с геометрией поверхности катены (рельефа) в качестве нижних граничных условий, задается геометрия подстилающих пород (нижнее граничное условие водоупор), пористостью почвы и коэффициенты инфильтрации по слоям почвы.

Предложенный подход требовал выполнить дискретизацию ландшафта по 2.5 мерным катенам, что требовало проведения нескольких этапов предварительной обработки данных. Для этого использовался специализированный программный пакет lumpR (Francke et al., 2008; Pilz et al., 2017), которые обеспечивают не только иерархическое разделение водосборов на катены, но и их классификацию. Дискретизация в Lump основана на анализе морфологии склонов и дополнительных факторов, таких как физические свойства почв и почвообразующей породы. Такой комплексный подход позволяет учитывать пространственную неоднородность гидрологических условий, что делает модель особенно эффективной для оценки уровня грунтовых вод. Именно по этой причине данная модель была выбрана для проведения расчетов на ключевом участке.

Катены черноземных почв ландшафтов лесостепной зоны изучается со времен работ Докучаева. Обычно в лесостепи в катенах различной морфологии переувлажнение может встречаться на плоских плохо дренированных междуречьях, пологих склонах и в тальвегах. В рамках почвенных туров обследований и работ Воронежского Государственного Университета на изучаемую территорию были составлены почвенные и ландшафтные карты

1:10000 масштаба соответственно, базируемых на функциональном подходе о связи морфологических признаков почв по с их гидрологическим режимом функционирования. На картах отображается пространственное положение почв или групп почв, диагностированных в соответствии с Классификацией и диагностикой почв СССР (1987). Данная классификационная система, основанная на генетическом подходе с акцентом на почвообразующие факторы и процессы, позволяет определить глубину залегания уровня грунтовых вод и капиллярной каймы в почвенном профиле для конкретного почвенного контура. На основе обширных данных полевых исследований и режимных наблюдений были выделены группы почв в зависимости от глубины уровня грунтовых вод: более 6 м — различные подтипы черноземов, 3–6 м — различные подтипы лугово-черноземов, 1,5–3 м — различные подтипы лугово-черноземных почв и других почв, 0–1,5 м — болотные и другие гидроморфные почвы. Выделение этих типов и подтипов в самостоятельные таксоны основано на систематизации и формализации значительного объема экспертных знаний о территории.

Таким образом, для верификации и калибровки модели были использованы традиционные почвенные карты предоставляют информацию о среднемноголетних параметрах влажности почвы и уровне грунтовых вод, основываясь на редоксиморфных признаках, а также на наличии железомарганцевых конкреций. В классическом функциональном представлении различные почвы Окско-Донской низменности имеют определенные, но частично пересекающиеся диапазоны уровней грунтовых вод (Ахтырцев, 1999), уровень которого растет с увеличением переувлажнения, переходя от не испытывающих застой влаги к сильно переувлажненным почвам.

Предложенный косвенный подход при параметризации сложных, полностью распределенных физико-математических моделей, решаемых на регулярной сетке, создает риски множества решений из-за неполного учета начальных и граничных условий. Однако относительная доля участков замедленно дренируемых типов местности междуречьях может быть использована для корректировки положения уровня грунтовых вод при применении решения одномерного или 1,5-мерного уравнения кинематической волны со свободными или слабо ограниченными пространственно сосредоточенными параметрами (Иванов, 1981).

Для постановки краевой задачи были сформулированы три гипотезы. Первая: степень гидроморфности почвы ландшафтов (обилие гидроморфных морфологических признаков) Окско-Донской низменности представляет собой чувствительный, но не быстро изменяющийся во времени результат взаимодействия грунтовых вод и почв, что позволило использовать этот показатель для оценки диапазона уровней грунтовых вод в рамках определенного типа местности. Во-вторых, данный показатель может быть применен при параметризации стационарного уравнения кинематической волны 1,5D на катене, что

позволит более точно подобрать диапазон изменчивости уровня грунтовых вод. В-третьих, с учетом принципа непрерывности потока и методологии составления ландшафтных и почвенных карт такие данные могут быть экстраполированы на другие катены с аналогичной морфологией, даже в случаях, когда объем доступной информации для параметризации модели недостаточен. Цель работы заключалась в установлении гипотетической взаимосвязи между морфологическими свойствами почв и уровнем грунтовых вод (УГВ) как индикатором гидрологического режима ландшафтов, а также в проверке устойчивости этой взаимосвязи при условии математически выраженного ограничения непрерывности потока на склоне катены, заданного в виде стационарного решения со свободным параметром. Многолетние классические гидрологические наблюдения (от 3 до 10 лет), совмещенные с морфологическим описанием почвенных профилей, позволили выявить сформировать взаимосвязи между морфологическими характеристиками почв и их среднемноголетним гидрологическим режимом (Ахтырцев, 1999; Зайдельман и др., 2008, 2014).

В то же время математические модели, как правило, требуют данных о динамике уровня грунтовых вод в скважинах, а также длительных серий измерений для получения равновесных значений УГВ. В данном исследовании в качестве исходных диапазонов использовались экспертные оценки, основанные на связях морфологических признаков почвы с ее режимом увлажнения. Все эти входные данные применялись при формулировании уравнений неразрывности потока для катен, а затем уточнялись с учетом конкретных водосборов, принимая во внимание двумерную конфигурацию катены, глубину залегания морены и свойства почвы.

Ключевой участок включает два водосбора — Самовецкий ($52,65^\circ$ с. ш., $40,07^\circ$ в. д.) и Избердей ($52,56^\circ$ с. ш., $40,38^\circ$ в. д.), расположенные в центральной части Окско-Донской низменности. Водораздельные пространства сложены мореной мощностью 10–20 м, местами достигающей 70 м. На междуречьях и склонах морена перекрыта лёссовидными суглинками и глинами мощностью от 3 до 30 м (рис. 33-35).

Моренные отложения обладают значительно более высокими водоупорными характеристиками по сравнению с покровными суглинками, лежащими выше, и таким образом они являются водоупоров. В пределах ключевых дренажная сеть развита слабо, поверхностный сток наблюдается преимущественно в период снеготаяния, западины на междуречьях встречаются повсеместно. Большая часть территории исследуемых водосборов занята агроландшафтами. Данные о физических свойствах почв водосборов Самовец и Избердей были получены из почвенной карты Петровского района Тамбовской области (масштаб 1:50000, 1996 г.), а также из материалов описания почвенных профилей и диагностических признаков в 102 точках, представленных Ахтырцевым (1999).

Дополнительно были проведены собственные ландшафтные исследования территории водосборов, включавшие комплексные ландшафтные описания в 39 точках.

Анализ данных показал, что в 75% случаев текущий тип почвы совпадает с тем, который указан на почвенной карте 1996 года. Этот уровень соответствия был признан достаточным для использования карты в целях калибровки модели. На основании почвенной карты, цифровой модели рельефа, данных о почвообразующих породах и информации, полученной из полевых точек описаний, была составлена карта типов местностей, согласно таблице 1, используемая для дальнейшей верификации модели (рисунок 33). В каждой из 141 точек отбора проб мы пробурили скважину до уровня грунтовых вод на момент отбора проб, а в 2019 году в четырех точках вдоль катены в водосборе ручья Самовец были установлены автоматические датчики для измерения уровня грунтовых вод.

Почвы в ландшафтах классифицировались в соответствии с Классификацией и диагностикой почв СССР (1977), при этом использовались представленные в ней морфологические признаки, применяемые для оценки гидроморфности почв агроландшафтов. Согласно классификации 1977 года автоморфные почвы четко отличаются от полугидроморфных и гидроморфных по отсутствию железистых или марганцевых конкреций, а также других признаков застоя влаги. Гидроморфные признаки наиболее выражены в днищах западин и ложбин. Автоморфные почвы можно четко отличить от полугидроморфных и гидроморфных по отсутствию в них железистых или марганцевых конкреций, конкреций и других признаков застоя влаги. Гидроморфные признаки наиболее распространены и выражены в днищах и (реже) склонах понижений, ложбин. В классификации почв СССР (Классификация и диагностика почв СССР, 1977) наличие глеевой или глееватой серой окраски используется как показатель восстановительных условий, без формального деления на застойные и глееватые почвы. Все почвы с такими характеристиками рассматриваются как глееватые. Однако более внимательное изучение (из Zaidelman et al., 2008,) показывает, что специфические черты глеевых почв включают сине-серовато-мраморную матрицу с красноватым оконтуриванием пор в верхних восстановленных горизонтах и полностью восстановленную матрицу в горизонт внизу. Таким образом, можно легко выделить источник переувлажнения (поверхностные или грунтовые воды). Это утверждение подтверждается измерениями УГВ, окислительно-восстановительного потенциала и морфологии почвы в условиях западин междуречно-недренируемого типа местности Окско-Донской низменности. Гораздо более значительное снижение окислительно-восстановительного потенциала наблюдается в глеевых условиях, где водонасыщение почвы происходит в течение длительного времени. Это подтверждается данными, представленными в работе Zaidelman et al. (2008) с небольшой модификацией, а также эмпирическими исследованиями,

опубликованными Ереминой (2015). Определить основной источник влаги в полугидроморфных почвах по их профилю значительно сложнее. В большинстве исследованных полугидроморфных почв горизонты В и С имеют коричневую или желто-бурую окраску с присутствием железо-марганцевых конкреций. Серые тона, свидетельствующие о восстановительных условиях, встречаются редко и, как правило, ограничены кутанами или проявляются в локальном снижении окислительно-восстановительного потенциала.

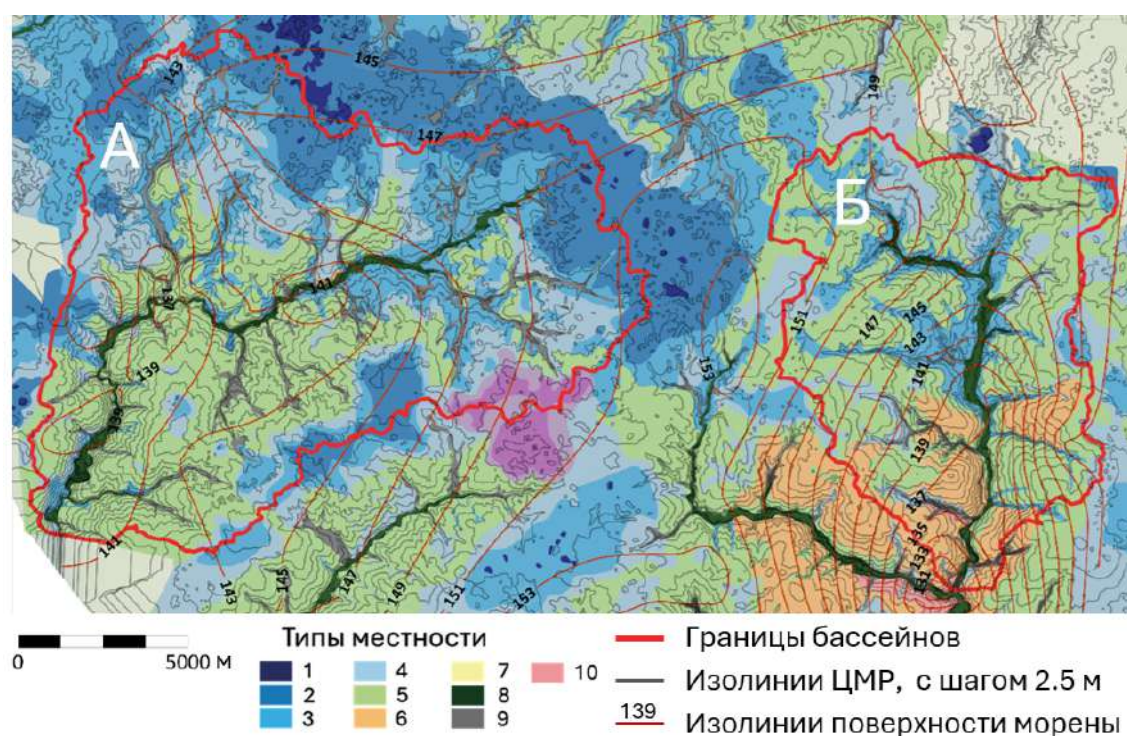


Рисунок 33. Расположение ключевых участков бассейнового масштаба на карте типов местности. Где: 1-4 варианты не дренируемого типа местности (по уменьшению плотности западин), 5 - замедлено-дренируемый, 6 – плакорный, 7 – террасовый, 8 – пойменный, 9 – овражно-балочная сеть, 10 – склоновый. А – бассейн руч. Самовец, Б – бассейн руч. Избердей.

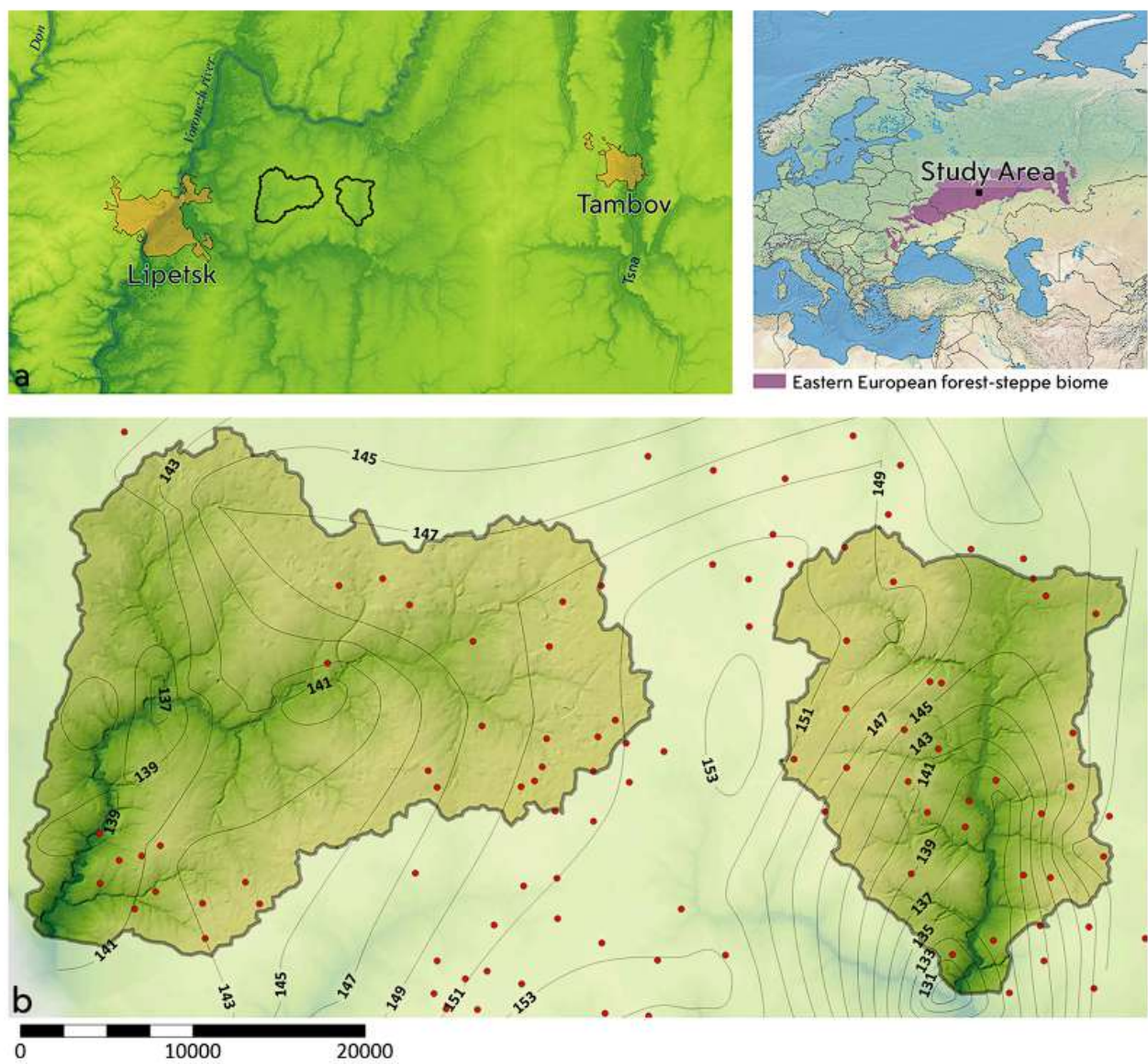


Рисунок 34. Расположение ключевых водосборов.

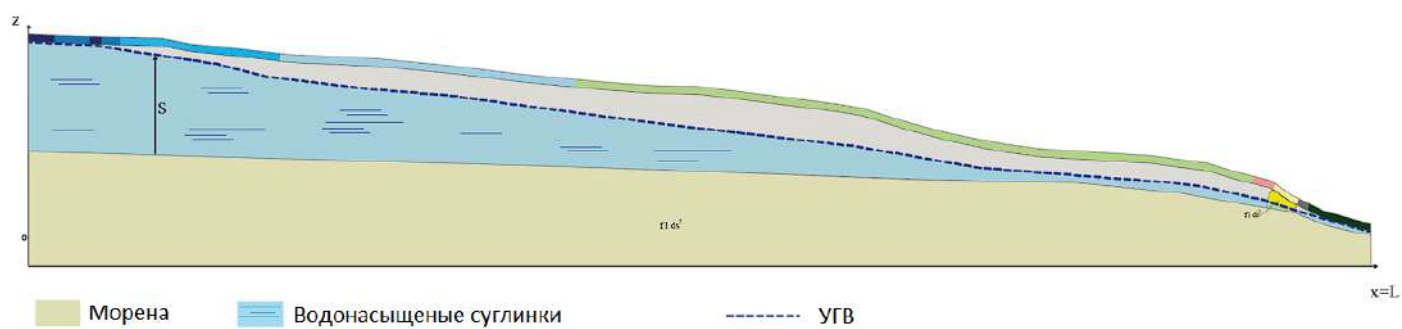


Рисунок 35. Схема типичной катены ключевых участков

Таблица 2. Типы местностей Окско-Донской низменности

Типы местности	Компоненты			
	Рельеф	Породы	Почвы	Грунтовые воды
Плакорный	междуречные равнины (1-2°)	Лессовидные суглинки (2-26 м),	Черноземы выщелоченные и типичные	Глубже 6 м
Полугидроморфный	междуречные равнины с западинами до 10% площади	на песках, суглинках и глинах	Луговато-черноземные и почвы западин	Глубже 6 м, 3-6 в западинах
Слабо-переувлаженный	междуречные равнины с западинами (10-25%)		Лугово-черноземные и почвы западин	3-6 м, 1,5-3 в западинах
Слабо-переувлаженный Солонцеватый			Лугово-черноземные слабосолонцеватые и солонцы черноземно-луговые	3-6 м, 1,5-3 в западинах
Средне-Переувлаженный	междуречные равнины с западинами (25-50%)		Лугово-черноземные с почвами западин	1,5-3 м, 0,5-1,5 м в западинах
Средне-переувлаженный солонцеватый			Лугово-черноземные слабосолонцеватые и солонцы черноземно-луговые	1,5-3 м,

Сильно- Переувлажненный	междуречные равнины с западинами более 50% площади		Черноземно- луговые с почвами западин	0,5 – 1,5 м, 0-1 м в западинах
Заболоченный	Обширные западины	торфа на покровных суглинках и глинах	Комплекс лугово- болотных и болотных почв	0-1 м;
Литогенный	Надпойменные террасы рек	пески или супеси	Серые и темно- серые лесные песчаные	Более 6м
Пойменный	Поймы рек	Аллювиальные слоистые суглинки и супеси	Пойменные луговые и карбонатные почвы	0.5-3 м, затопление при половодье и сильных паводках
Слабоэрозионный	Пологие и покатые склоны оврагов, балок и рек		Слабо- и среднесмытые черноземы	3-6 и более метров
Средне-эрозионный	Покатые склоны оврагов, балок и рек	Покровные суглинки и глины на моренных суглинках, дочетвертичных песках или глинах	Среднесмытые черноземы	3-6 и более метров
Сильно-эрозионный	Покатые и крутые склоны оврагов, балок и рек		Средне- и сильносмытые черноземы	3-6 и более метров

3.4.2 Дискретизация топопоследовательностей (катен) для постановки граничных условий бассейновой модели

Для параметризации уравнений кинематической волны необходимы данные о топологии поверхности катены, глубине залегания водоупорных пород и расположению почв с заданными физическими свойствами для участков типов местности вдоль катен, которые изначально предоставляются в виде растровых карт для использования в программном обеспечении lumpR (Pilz et al., 2017). Это свободно доступный пакет, предназначенный для автоматизации дискретизации вычислительных единиц для полураспределенных гидрологических моделей на основе катенарного подхода. Он основан на многоуровневом (пятиуровневом) подходе, где на первом уровне выделяется водосборный бассейн, на втором уровне — суббассейны, на третьем уровне — площади элементарных склонов внутри катен, которые на четвертом уровне сводятся к плоским репрезентативным склоновым элементам, называемым ландшафтными единицами, а на пятом уровне — к специфическим частям ландшафта, учитывающим особенности рельефа, почв и арстительности (в классическом представлении — фацию).

При гидрологическом моделировании уравнение латерального потока (поверхностного или подповерхностного) записывается для репрезентативных катен (уровень 4), в то время как процессы вертикального потока и инфильтрации регулируются распределенными параметрами, которые потенциально могут быть указаны для каждой фации (уровень 5). Пакет lumpR также можно применять к обобщенным элементарным катенам (ОЭК), созданным на уровне 3, следующим образом. Во-первых, обобщенные элементарные катены (ОЭК) преобразуются в репрезентативные катены 1,5D, где ширина склона (w) становится единственной переменной, учитываемой в поперечном направлении. В то же время все остальные параметры, такие как высота склона (z), глубина залегания коренной породы, тип почвы и другие атрибуты, фиксируются вдоль продольного направления (x) с исходным пространственным разрешением карты (в данном случае $\Delta x = 25$ м). Такой метод позволяет свести сложную трехмерную структуру катены к упрощенной, но информативной модели, пригодной для гидрологического моделирования. Алгоритм, применяемый для преобразования площадных катен в плоскостные представления, разработан на основе подхода Кокрана и Фланагана (2003). Диапазон возможного УГВ (от самого высокого до самого глубокого) для почв в различных типах местности был взят из материалов Ахтырцева (1999) и автоматизированной сети наблюдений за уровнем грунтовых вод.

На следующем этапе репрезентативные катены классифицируются с помощью алгоритма кластеризации K-means. Этот процесс включает последовательные прогоны классификации для каждого атрибута, а окончательный класс определяется пересечением

результатов всех этапов классификации. В качестве атрибутов используются длина катены в горизонтальном и вертикальном направлениях, форма профиля (определяемая по совокупной высоте вдоль катены), ширина склона (w), рассчитываемая как отношение количества ячеек сетки в данной точке профиля к общему числу ячеек, представляющих всю катену, а также характеристики почвы и растительности. При необходимости могут быть добавлены пользовательские количественные атрибуты, как дискретные, так и непрерывные. После классификации для каждого выделенного класса катен рассчитывается обобщенная топопоследовательность - усредненные значения всех атрибутов катен, принадлежащих этому классу. Это позволяет систематизировать топографические и почвенные особенности различных типов катен и использовать эти данные для уточнения параметров гидрологических моделей.

Программный пакет lumpR был выбран, поскольку на момент исследования он являлся наиболее подходящим инструментом для получения репрезентативной топологии катен, используемой в моделировании грунтовых вод, как описано в уравнении. Его ключевыми преимуществами были высокая степень автоматизации процесса и возможность воспроизводимого получения данных. При кластеризации катен учитывались не только их геометрические характеристики, но и последовательность типов местностей, содержащих почвы с различной степенью гидроморфности в верхней, средней и нижней частях склона. Хотя тип почвы во многом связан с морфометрией рельефа, он также содержит дополнительную информацию, позволяющую более точно обобщать репрезентативные катены, что особенно важно при моделировании уровня грунтовых вод.

3.4.3 Настройка параметров бассейновой модели и экстраполяция данных

Для параметризации модели уровня грунтовых вод (УГВ) требуется четыре параметра, соответствующие уравнениям (1–3): N , f , k и n . Дополнительно одной из ключевых переменных является разница между отметкой поверхности (Z_H) и отметкой (z), определяющей глубину залегания подстилающих пород (морены) относительно верхней поверхности покровных суглинков.

Значения z вдоль катен были получены с помощью программного комплекса lumpR, используя растровую карту высот морены. Эта карта была подготовлена следующим образом: выходы морены были идентифицированы на основании данных о четвертичных отложениях, представленных на Государственной геологической карте Российской Федерации (масштаб 1:200000, лист N37-XXXV, 1974). Высоты, соответствующие этим обнажениям, были

извлечены из цифровой модели рельефа (ЦМР), привязаны к точкам отбора и пространственно интерполированы для формирования полноценного растрового слоя.

Предварительный анализ показал, что модель Troch et al. (2002), используемая в данном исследовании, дает более реалистичные результаты для катен, подстилаемых мореной, когда кривизна морены учитывается в расчетах. Эта кривизна описывается соответствующим уравнением.

Параметры модели были приняты на основе ранее опубликованных данных. Пористость $f = 0,4$ была установлена на основании полевых измерений, проведенных в многочисленных точках отбора проб в исследуемом районе (Ахтырцев, 1999; Ахтырцев и др., 1981). Значение $n = 0,6$ определено на основе дополнительных материалов Государственной геологической карты Российской Федерации (масштаб 1:200000, лист N37-XXXV, 1974).

Калиброванным параметром, используемым для корректировки стационарного УГВ в каждой катене, было безразмерное отношение потока питания грунтовых вод к гидравлической проводимости, $\frac{N}{K}$. Для него была применена следующая процедура настройки. Для настройки модели была применена следующая процедура. Во-первых, с регулярным шагом использовался диапазон $\frac{N}{K}$ от абсолютного минимума до абсолютного максимума. Из полученных результатов были выбраны те, которые удовлетворяли минимальному уровню точности 0,7. , найденный в литературе, начиная от абсолютного минимума и заканчивая абсолютным максимумом. Из всех полученных результатов были отобраны те, которые соответствовали минимальному уровню точности 0,7. Далее требуемый уровень точности рекурсивно повышался, пока число возможных кривых УГВ, удовлетворяющих этому критерию, не начало резко сокращаться. Однако контуры почвенной карты и табличные данные УГВ содержат неопределенности, связанные с субъективной предвзятостью экспертов, участвовавших в их составлении, что затрудняет количественную оценку этих погрешностей.

Чтобы проверить возможность экстраполяции скорректированных параметров на склоны катен с аналогичной морфологией, но с меньшим объемом исходных данных, был проведен слепой тест. В его рамках параметры, полученные для катен водосбора Самовец, переносились на катены соответствующих классов в Избердейском водосборе, и наоборот. Из шести выделенных классов (описанных в разделе «Результаты») аналоги в обоих водосборах имели только три. Для каждой катены, относящейся к этим трем классам, скорректированный

диапазон $\frac{N}{k}$, рассчитанный для «ближайшей» катены аналогичного класса в другом водосборе, использовался без изменений, то есть без учета данных об участках типа местности.

Глава 4. Влияние западинных урочищ на функционирование недренируемого типа местности

4.1 Динамика функционирования западинных урочищ

Предложенное сочетание объектно-ориентированной классификации изображений, основанной на временных рядах снимков Planet Labs, и ортомозаики, полученной с БПЛА для верификации спутниковых данных, позволило с высокой точностью идентифицировать площади водного зеркала в западинах на различных этапах их высыхания (каппа Коэна = 0,99). Данный подход обеспечил возможность более детального анализа динамики водоемов в замкнутых понижениях рельефа, что критически важно для оценки процессов инфильтрации, испарения и перераспределения влаги в почвенном профиле. Кроме того, показано, что высокоточные цифровые модели местности, созданные на основе данных БВС, могут быть эффективно использованы для расчетов объемов воды в замкнутых западинах, поскольку позволяют учитывать не только горизонтальные границы водного зеркала, но и вариации высотных отметок по всему водосбору.

Для оценки точности предложенных методов была проведена сравнительная демаркация водного зеркала на примере сцены, зафиксированной 9 апреля 2021 года, когда было получено эталонное изображение с БВС. В ходе исследования были проанализированы два контролируемых метода классификации на основе пикселей - случайный лес (RF) и метод опорных векторов (SVM), результаты которых были представлены в растровом формате. Полученные растровые границы водоемов затем были скорректированы с учетом данных цифровой модели рельефа (ЦМР) до их медианного значения высоты, что позволило преобразовать их в векторные полигоны с унифицированным высотным положением.

Анализ ошибок показал, что среднеквадратическая ошибка (RMSE) и средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) площади и объема водоемов оказались минимальными при использовании векторного представления, тогда как при растровом подходе эти ошибки были существенно выше. Это свидетельствует о том, что переход от растрового к векторному формату данных значительно повышает точность расчетов и снижает неопределенность, связанную с вариациями пиксельной классификации. При этом ошибки SVM и RF при векторном подходе практически не различались (таблица 3), что обусловило выбор RF как наиболее широко применяемого метода в подобных исследованиях из-за его устойчивости к шуму и высокой обобщающей способности.

В отличие от метода, предложенного Wade (2003), новая методика векторизации полигонов, основанная на концепции водного зеркала с постоянной высотой, позволила существенно повысить точность оценки площади и объема водоемов. Данный подход

нивелировал влияние неоднородностей пиксельной классификации и обеспечил воспроизводимость результатов, что делает его перспективным инструментом для детального анализа водного баланса в ландшафтах с замкнутым микрорельефом.

Таблица 3. Среднеквадратическая ошибка (RMSE) и средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) площади и объема с истинным значением, полученным из оценки границ водоемов с помощью БПЛА сверхвысокого разрешения. Методы случайного леса (RF) и метода опорных векторов (SVM) сравниваются для пиксельного (растрового) и медианного ЦМР на основе высоты (векторного) очерчивания изображения, сделанного 9 апреля 2021 года.

	Ошибки оценки площади		Ошибки оценки Объема	
	RMSE, m ²	MAPE, %	RMSE, m ³	MAPE, %
RF вектор	7.8	1.4	2.5	5.9
RF растер	43.2	3.1	16	21.9
SVM вектор	8.7	1.6	2.1	5.1
SVM растер	44.9	3.6	16.3	22.2

Результаты, полученные по описанным методикам, свидетельствуют о том, что процесс дренирования воды в западинах подчиняется экспоненциальному уравнению, вероятно зависящему от различных факторов, таких как гранулометрический состав отложений и площадь фильтрации. Однако в ходе исследования не удалось выявить четкие количественные закономерности между коэффициентами дренирования и рассматриваемыми параметрами, что указывает на сложный и многокомпонентный характер данного процесса.

На начальном этапе после снеготаяния скорость уменьшения объема воды в западинах значительно выше, чем в конце весны (рис. 41, верхний график). При этом объем испаряющейся воды оказывается заметно меньшим по сравнению с объемом инфильтрированной воды (рис. 41, средний и нижний графики), что подтверждает предположение о том, что пополнение запасов грунтовых вод связано с понижениями рельефа. Эти результаты согласуются с ранее сформулированной гипотезой о том, что основной

источник питания неглубоких подземных вод в районе исследования, а также в аналогичных территориях, — это инфильтрация, происходящая в западинах во время снеготаяния (Роде, 1963).

В процессе инфильтрации выделяются две фазы — быстрая и медленная (рис. 41, нижний график). Измерения, проведенные во время быстрой фазы, позволяют оценить интенсивность и объем пополнения ненасыщенной зоны почвы (таблица 3). В медленной фазе суточные изменения скорости инфильтрации становятся менее выраженными, что указывает на стабилизацию процессов влагообмена в почвенной толще. Гидравлическая проводимость насыщенной зоны заметно снижается с глубиной под западиной (Noorduijn, 2018), что объясняется уменьшением частоты пор в нижних горизонтах. Таким образом, отток воды ограничивается самым плотным и наименее пористым слоем. Скорость инфильтрации, зафиксированная во время медленной фазы, может рассматриваться как приближенная оценка гидропроводности, соответствующая максимально возможному оттоку из почвенной толщи (рис. 36)

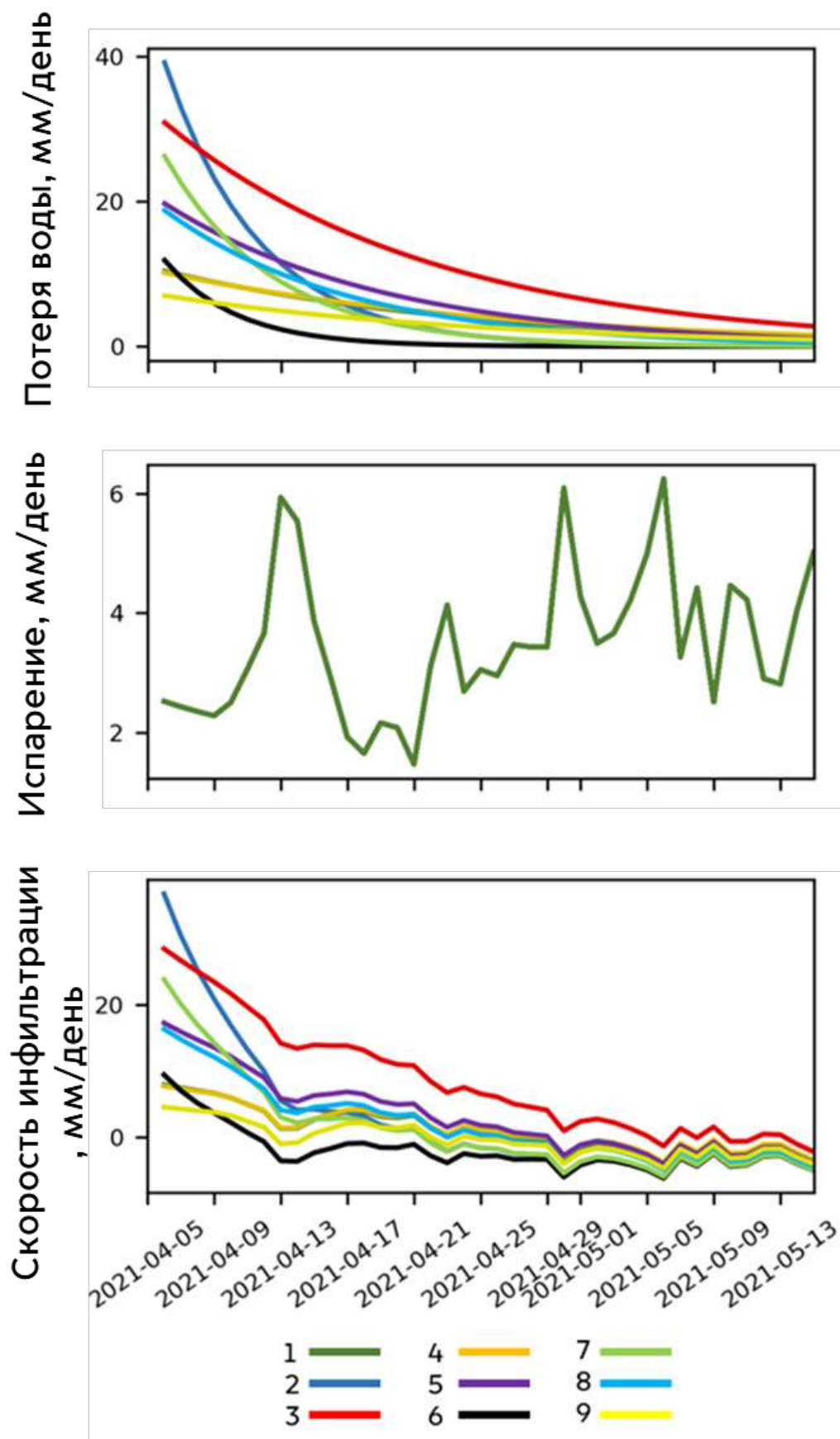


Рисунок 36. Динамика уровня воды и инфильтрации в западинах, нумерация как на рисунке 29

Перелив воды возможен в любой западине, однако вероятность разлива определяется совокупностью факторов, среди которых ключевыми являются высота самой низкой точки водосборного бассейна и отметка точки перелива западины. В 2018 году уровень воды достиг точки перелива практически во всех исследованных западинах (рис. 37), что свидетельствует о значительном поступлении талых вод в данный период.

Таким образом, начальные объемы (коэффициенты a), рассчитанные для девяти изученных западин, могут быть использованы для анализа влияния ландшафтной структуры на процессы аккумуляции и перераспределения влаги, а также для оценки поступления талых вод в западины после таяния снега.

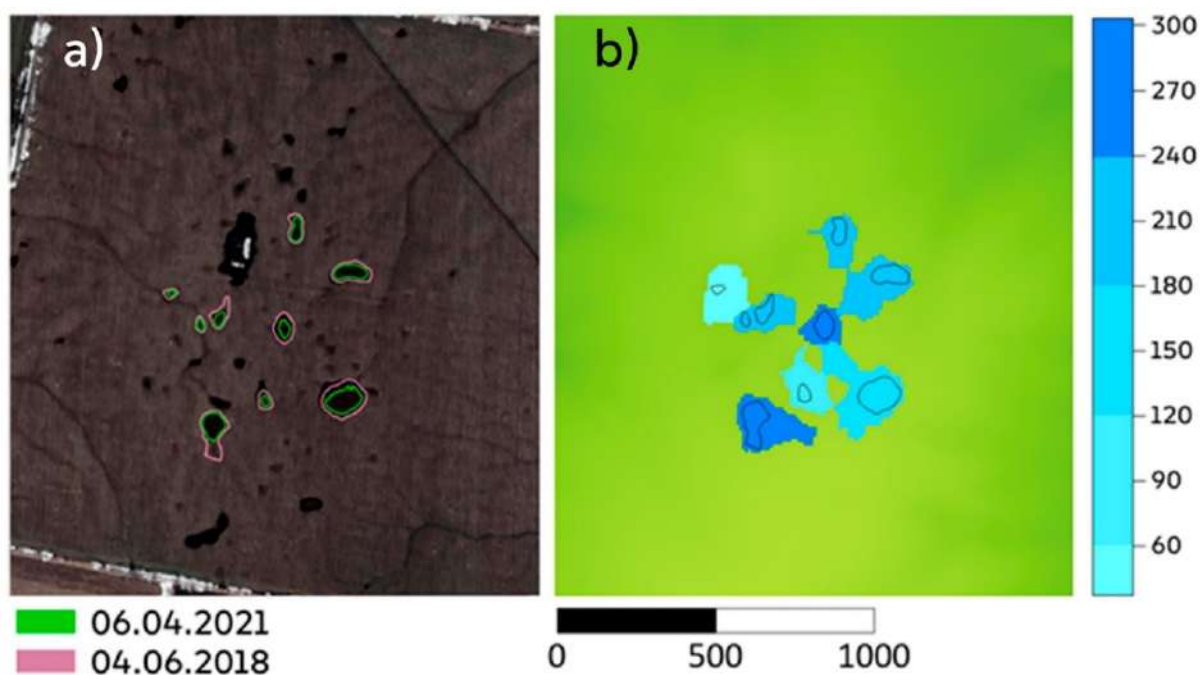


Рис. 37. (а) Границы максимального потенциального заполнения западин (до высоты их перелива), показанные белым цветом на снимке Planet Labs от 4 апреля 2018 г., с цветовой штриховкой и пурпурными контурами, и максимальные границы водоема в 2021 г. от 6 апреля 2021 г. (зеленые контуры). В 2018 г. исследованные замкнутые котловины были переполнены. (б) Оттенки синего цвета, обозначающие слои воды (в миллиметрах), которые должны поступать во впадины из их водосборных площадей, чтобы полностью их заполнить.

Результаты также подтверждают, что гипотеза о количественной линейной зависимости между объемом воды, аккумулируемой в западине, и площадью ее водосборного бассейна справедлива лишь частично. Объем воды, накапливаемой в западине, не определяется строго линейной зависимостью от площади водосбора, поскольку на него также влияет максимальная емкость водоема. Избыточная вода, превышающая этот объем, будет вытекать через точку перелива, не пополняя уровень грунтовых вод.

Выявлены пределы возможного объема и слоя воды, перехватываемой локальными западинами, что ограничивает их способность преобразовывать поверхностный сток в подземный. Максимальная величина слоя воды определяется как площадью водосбора западины, так и высотной отметкой точки перелива (рис. 6, справа).

Количество воды, заполняющее западины во время снеготаяния в лесостепной зоне, отличается значительной изменчивостью. В период с 2005 по 2021 год слой талой воды (водный эквивалент снега, SWE), реконструированный на основе статистически скорректированных данных о высоте и плотности снежного покрова, варьировал от 50 до 300 мм. Полученные данные показали, что распределение слоя талых вод имеет биномиальный характер с двумя пиками — на уровне 50 и 200 мм SWE.

Анализ метеорологических данных показал, что в среднем в 60% случаев с 2005 по 2021 год западины не достигали перелива во время снеготаяния. Это подтверждает вывод о том, что в большинстве случаев западины перехватывают поверхностный сток и способствуют пополнению подземных вод. Частота перелива варьировалась между различными западинами: она была минимальной для прудов 2 и 4 (около 10%) и максимальной для пруда 9 (90%), что указывает на различия в их водосборных характеристиках и способности к накоплению и перераспределению влаги.

На рисунке 7 представлено моделирование поверхностного уровня грунтовых вод для двух сценариев: при постоянной скорости пополнения и при ее пространственном изменении вдоль трансекты. В данном случае параметр $\frac{N}{k}$ был ограничен требованием соответствия смоделированного уровня грунтовых вод диапазону значений УГВ, установленному для каждого типа местности на основе экспертных данных. Соответствие оценивалось в пределах интервалов расстояний по всей топопоследовательности катены.

Аналогичная процедура была применена к каждому интервалу, содержащему различные типы местности. Затем результаты суммировались по всем группам и масштабировались относительно общего количества единичных интервалов в топопоследовательности катены, что позволило выразить точность моделирования в процентах.

Моделирование уровня грунтовых вод продемонстрировало высокую степень соответствия с диапазонами УГВ, установленными по почвенным индикаторам (редоксиморфным признакам) и экспертным знаниям, как в случае постоянного, так и в случае пространственно-переменного пополнения. Однако заданный порог точности в 97% был достигнут только при пространственно-переменной подпитке грунтовых вод на верхней границе. В случае постоянной подпитки требуемый уровень точности оказался значительно ниже — около 80%.

4.2 Динамика влажности почвы на локальном масштабе

На верхние граничные условия принимались расчеты из предыдущего пункта интерполированные на пиксель объемы воды). Из-за большой ресурсоёмкости расчётов результатам расчетов для выбранных точек были получены с 2017 по 2022 год, с шагом 30 метров в пространстве и 8 временных разрезов в сутки во времени и разверткой по глубинам почвенного профиля (1-2-4-8-15-25-35-45-55-65-75-85-95-105-115-125 -135-145-155-200-300-500-1000 сантиметров), что позволило получить содержания воды в почве с учетом вертикальных (Lump) и горизонтальных потоков влаги для любой из дат за период, с разрешением 10 метров (рисунок 45).

Для моделирования влажности почвы и уровня грунтовых вод необходимо было выполнить интерполяцию значений физических параметров почв, полученных в точках, на площадь всего ключевого участка. Для этого использована методология цифровой почвенной картографии по ЦМР территории в программе SAGA GIS были рассчитаны следующие морфометрические параметры: уклон, кривизна, профильная кривизна, плановая кривизна, топографический индекс влажности, топографический позиционный индекс с радиусом 50 м, глубина замкнутых понижений, относительное положение на склоне, LS – фактор. Дискриминантный анализ в среде R показал, что наиболее значимыми для предсказания, оказались параметры: относительное положение на склоне и топографический индекс влажности всего почвенных описаний – 13, из них 3 – с измеренными физическими параметрами, точность модели 69% (рис 37).

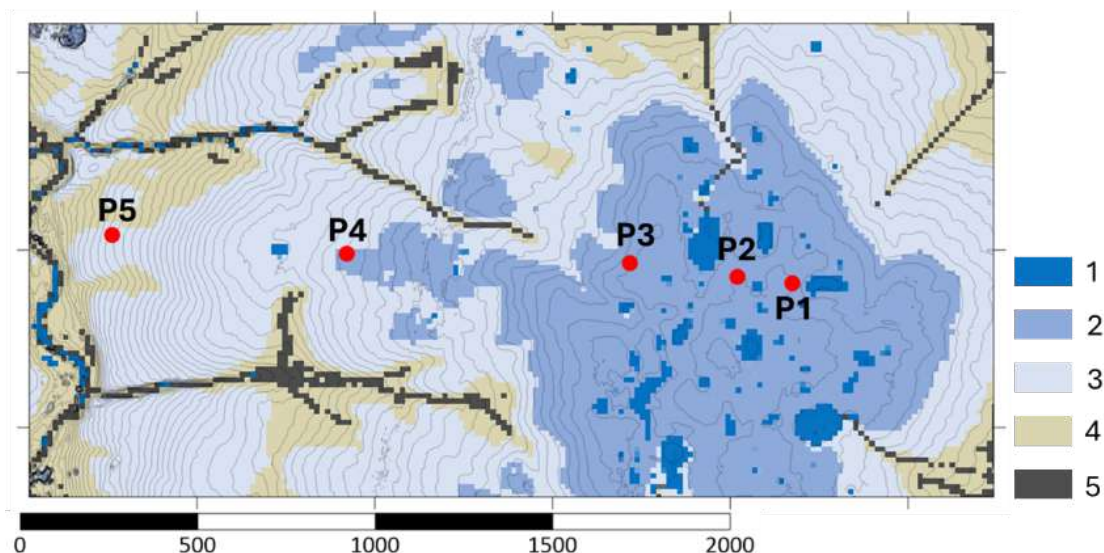


Рисунок 38. Рельеф и цифровая модель почвенного покрова участка, где 1 - влажнолуговая осолодевшая, 2 - лугово-черноземная, 3 – луговато-черноземная, 4- комплекс слабосмытых типичных и выщелоченных черноземов, 5 – лугово-черноземные почвы эрозионной сети

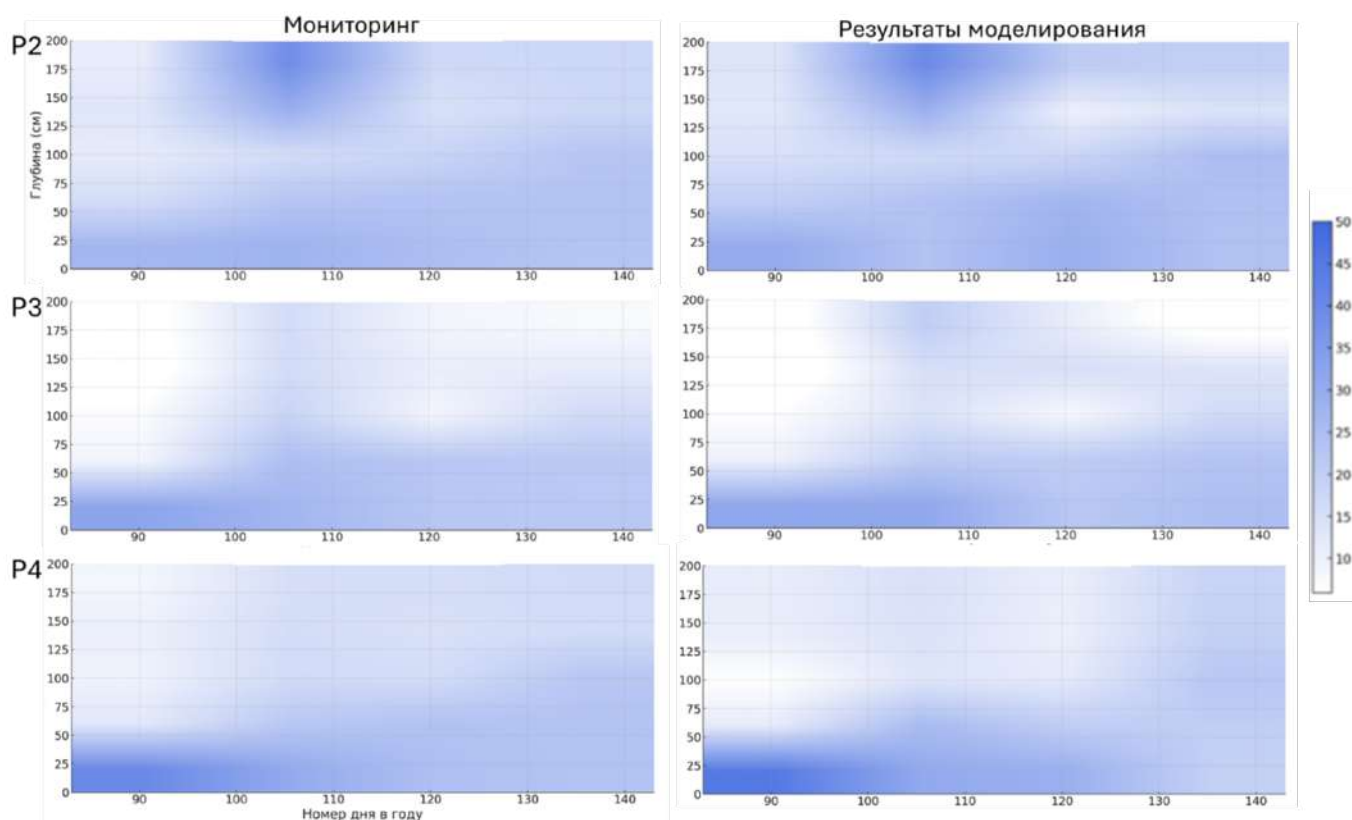


Рисунок 39. Хроноизоплеты запасов влаги, расчётные и фактические значения

Для верификации расчетных значений были использованы материалы мониторинга влажности почвы в 5 точках весной 2021 года (рис.39) методом бурения и сушки образцов, а так же для 3 точек в течении осени 2021 и весны 2022 года по материалам систем автоматизированного мониторинга влажности почвы и уровня грунтовых вод.

Анализ сходимости результатов моделирования и мониторинга влажности почвы показал достаточную сходимость результатов в течение теплого периода (МАРЕ не выше 6.25%), и во время смены фаз воды в период снеготаяния, так как модель учитывала фазовые переходы воды, и меньшие сходимости результатов в зимний период (МАРЕ не выше 19.5%) связанный с неучитываемой в модели поднятие влаги под фронтом промерзания почвы, и уровня грунтовых вод (МАРЕ 7.19%)(рис. 13). Достаточная точность модельных расчетов, позволила в качестве верхних граничных условий использовать данные о погоде и дополнительном поступлении влаги из западин с 1960 по 2023 годы с дискретизацией в 1 час и выполнить расчет запасов влаги за весь исследуемый период.

Далее, для трёх точек в пределах междуречья – влажнолуговой осолоделой почвы в западине, лугово-чернозёмной в межападинном пространстве и луговато-чернозёмной на склоне, морфологические особенности почвенного профиля были сопоставлены с расчётными

показателями водного режима для выявления связи между длительностью анаэробных условий и диагностическими признаками почв. Одним из легко обнаруживаемых подобных диагностических признаков является наличие и размер железомарганцевых конкреций (Зайдельман 1988). В таблице 3 представлены данные полевого определения обилия и размера железо марганцевых конкреций.

Таблица 4. Морфологическое обилие и размер железомарганцевых конкреций в пределах ключевого участка

ID	Почва	Горизонт	Верхняя граница	Нижняя граница	Общее содержание	Размер, мм
P1	Влажнолуговая осолоделая	A ₂ g''	23	36	Много	0.2-0.5
P1	Влажнолуговая осолоделая	B ₁ sog'''	36	56	Много	>0.5
P1	Влажнолуговая осолоделая	G	56	84	Много	>0.5
P2	Лугово-черноземная	B ₁ g'	47	56	Средне	0.2-0.5
P2	Лугово-черноземная	B ₂ g''	56	84	Много	0.2-0.5
P2	Лугово-черноземная	BCg''	84	120	Много	>0.5
P3	Лугово-черноземная	B ₁ g''	60	72	Средне	0.2-0.5
P3	Лугово-черноземная	B ₂ g''	72	86	Средне	0.2-0.5
P3	Лугово-черноземная	BCg''	86	103	Средне	>0.5
P4	Луговато-черноземная	B ₁ g'	64	77	Мало	<0.2
P4	Луговато-черноземная	B ₂ g''	77	94	Мало	<0.2
P4	Луговато-черноземная	Cg''	94	124	Средне	<0.2
P5	Луговато-черноземная	B ₁ g''	78	86	Средне	<0.2
P5	Луговато-черноземная	B ₂ g''	86	100	Мало	<0.2
P5	Луговато-черноземная	Cg''	100	123	Средне	0.2-0.5

Ретроспективный анализ показал, что в период с 1960 по 2023 годы почвы междуречно недренируемого и замедленно дренируемого типов местности имели различный гидрологический отклик на сезонные и межгодовые циклы климата лесостепи. Для корнеобитаемого слоя влажно-луговой осолоделой почвы западин недренируемого типа местности в среднем (515 мм осадков) 8.6 лет из 10 наблюдаются водозастойные явления, средняя продолжительность которых составляет 90.4 суток, для лугово черноземной 6.8 лет и средней продолжительностью 47.7 дней, для луговато-черноземной замедленно дренируемого типа местности 4.2 лет из 10 при средней продолжительности 26 суток. Для засушливых лет (менее 410 мм осадков) во влажнолуговой осолоделой 8 лет из 10, 87 дней, лугово-черноземной: 4.2 лет при продолжительности 36.6 суток, луговато черноземной 1 год из 10 и 6 суток соответственно. Для лет с количеством осадков выше среднего (620 мм и выше): влажно-лугово осолоделая 10 лет 120 дней, лугово-черноземная 7.5 лет 56 дней, луговато черноземная 5.4 лет 30 дней. Динамика связи обилия и размера железо марганцевых конкреций с длительности застойных явлений (рис. 40) объясняет отсутствие условий формирования железомарганцевых конкреций по данным мониторинга в 2021 и 2022 годах

(рис 41). Их наличии в почвенном профиле связано с формированием в другие наиболее увлажненные годы динамичного климата лесостепи.

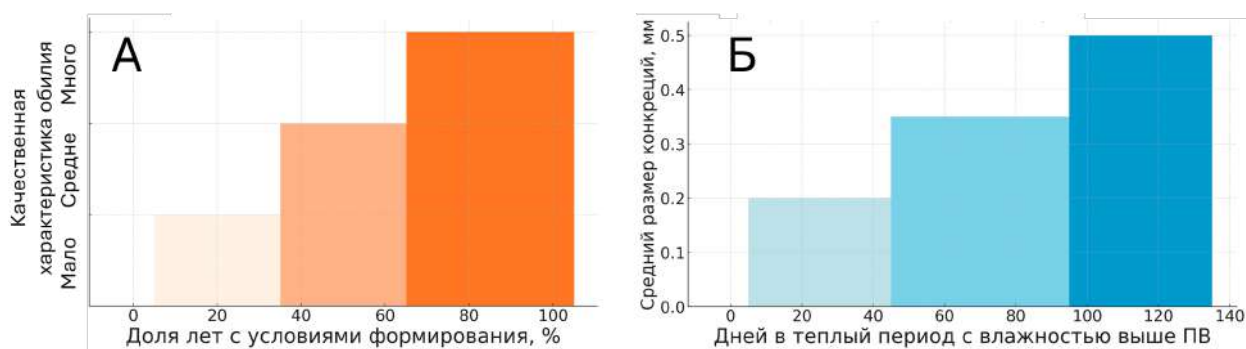


Рисунок 40. Динамика связи обилия и размера железо марганцевых конкреций с длительности застойных явлений по материалам моделирования. А – взаимосвязь обилия конкреций в профиле с частотой повторяемости лет с застойными явлениями. Б - взаимосвязь размера конкреций в почвенном профиле с длительностью застойных явлений

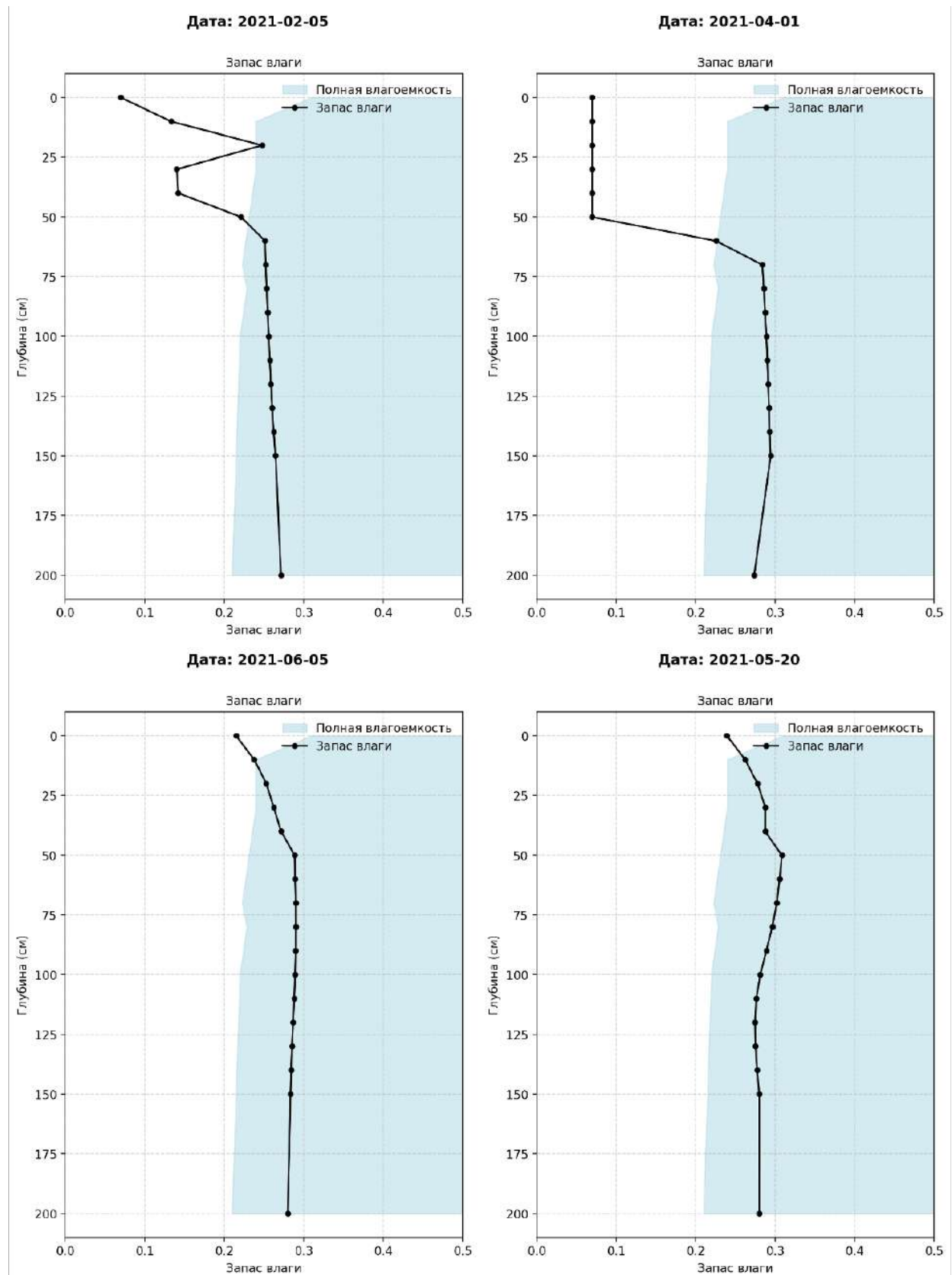


Рисунок 41. Расчетная динамика влажности почвы % (масс) для весны 2021 года в западине № 1

Проведенные расчеты дали возможность определить функциональные характеристики западных урочищ междуречно – недренируемого типа местности (рис. 42)



Рисунок 42. Расчетный баланс слоя воды в системе западного урочища, значения в см.

Верификация модели для проверки расчетов были выполнены два независимых исследования:

Шесть полевых экспедиций весной 2021 года, для измерения динамики влажности почвы по 4 глубинам 16 точках.

С осени 2021 года на ключевом участке функционирует разработанная и прототипированная автором интернет-система мониторинга за влажностью почвы на 2 глубинах, основанная на емкостном типе датчиков влажности почвы, шаг измерения влажности – 8 раз в сутки, отправка данных на сервер раз в сутки (рисунок 43).



Рисунок 43. Установка систем автоматизированного мониторинга за влажностью почвы и уровня грунтовых вод

Как показано на рисунке 48, результаты моделирования продемонстрировали высокую степень соответствия фактическим данным. Различия между расчетными и измеренными значениями могут быть обусловлены рядом факторов, среди которых наиболее значимыми являются различие в масштабе, так как отбор проб осуществляется в точечных измерениях, тогда как модельные данные представлены на уровне пикселя, ограниченность информации о погодных условиях для конкретных дат, поскольку используется реанализ, а также неоднородность инфильтрационных свойств почвы на микроуровне. Дополнительное влияние на расхождения между модельными и фактическими значениями могут оказывать возможность формирования преимущественных потоков в почвенном профиле, наличие пор различной направленности, влияющих на водопроницаемость, степень открытости или закрытости участка, гистерезис основной гидрофизической характеристики почвы (ОГХ), а также ограниченное количество измерений, используемых для верификации модели. Несмотря на указанные факторы, степень корреляции между расчетными и фактическими значениями остается высокой: $R^2(15 \text{ см})=0.9812$, $R^2(25 \text{ см})=0.9845$, $R^2(75 \text{ см})=0.8496$, $R^2(105 \text{ см})=0.8586$, что свидетельствует о надежности модели при различных глубинах, хотя на больших глубинах точность прогноза несколько снижается.

Верификация расчетов весна 2022 года. Использование автоматизированной системы мониторинга позволило уточнить кривую верификации, однако одновременно усложняет сам вопрос верификации, в виде представленных на рисунке 49 разнонаправленных вершин динамики влажности почвы, хоть и результаты расчетов хорошего качества, однако можно только предположить с чем могут быть связаны проявившая асимметрии в ходе измерений влажности почвы (в среднем ± 0.03 г/г), может быть связано с влиянием динамики температуры на электропроводность почвы, или влиянием вмешательства при установке системы мониторинга на инфильтрационные свойства почвы. Однако несмотря на неясную природу различий, они не значительны и расчет можно считать успешным.

Глава 5. Влияние западинных урочищ на гидрологическое функционирование междуречий Окско-Донской низменности

5.1 Динамика уровня грунтовых вод

Дискретизация цифровой модели ландшафта с использованием пакета lumpR была выполнена для водосборов Самовецкого и Избердейского ручьев. Для разграничения суббасейнов использовался порядок водотоков Хортон, установленный равным 3. В результате длина катен варьировала от 2500 до 4500 м, что позволило разделить водосборы на 18 и 29 элементарных 1,5-мерных катен соответственно. В алгоритме классификации катен было выделено три класса по форме профиля склона, учитывающие основные типы кривизны, и два класса по типу почв. Таким образом, было определено шесть классов катен (рисунок 44). В пределах водосбора Избердейского ручья встречались катены 1, 2 и 3 классов, тогда как в водосборе Самовецкого ручья присутствовали все шесть классов.

Типичные катены Избердейского и Самовецкого водосборов (катены 4 и 5, рисунок 44) относятся к полугидроморфным и слабопереувлажненным типам местности. В пределах водосбора Самовецкого ручья также встречаются среднепереувлажненные и недренируемые участки, тогда как в Избердейском водосборе распространены плакорные и пойменные территории.

Катена 1 является примером наиболее дренированных участков Избердейского водосбора, что подтверждается преобладанием плакорного типа местности. В направлении от начальной к средней части катены наблюдается постепенный переход от плакорного к полугидроморфному типу местности, что связано с увеличением доли лугово-черноземных почв, залегающих в комплексе с типичными и выщелоченными черноземами. Формирование лугово-черноземных почв обусловлено выположенными, замедленно дренируемыми участками на профиле катены.

Катены 2 и 3 характеризуются меньшей дренированностью из-за их большей выположенности. В обоих случаях преобладают полугидроморфные типы местности. В катене 2 встречаются также слабопереувлажненные и пойменные участки, тогда как в катене 3 преобладает полугидроморфный тип местности.

Для водосбора Самовецкого ручья в целом характерен более замедленный дренажный режим, что обусловлено преобладанием плоского междуречного рельефа.

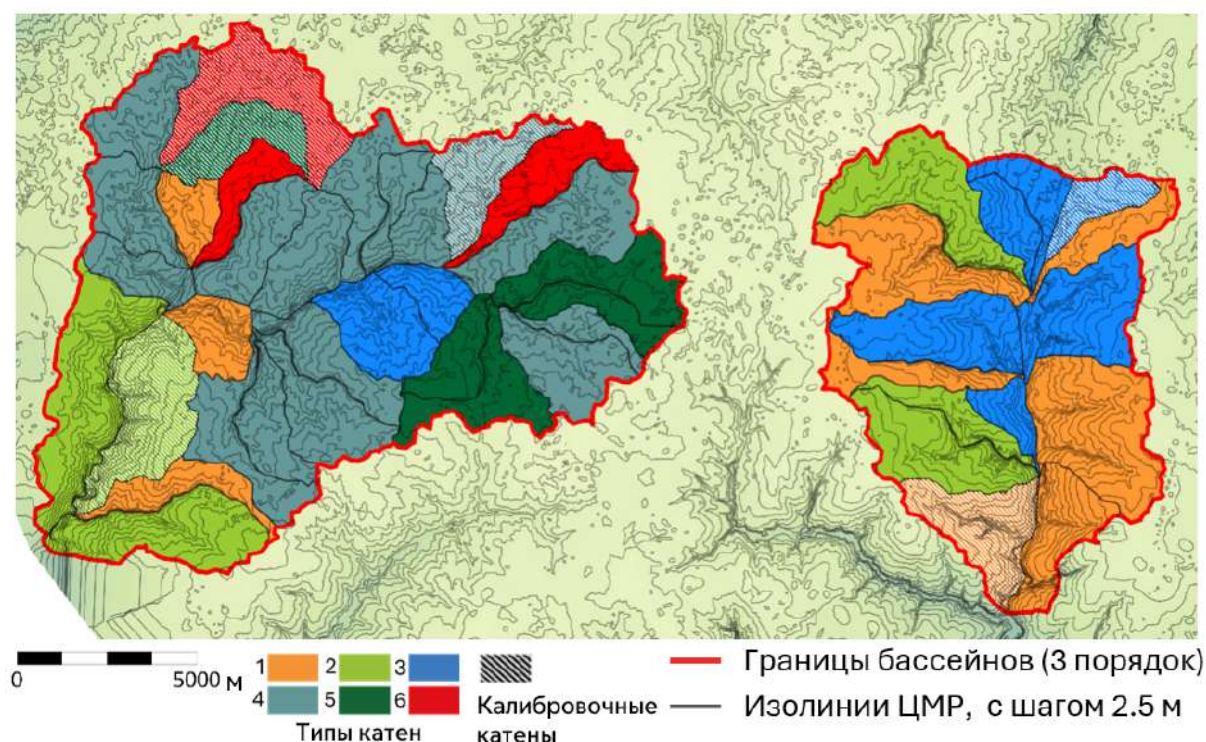


Рисунок 44. Результат автоматической дискретизации пространства алгоритмом LUMP для формализации модельных расчетов. Типы формализованных топопоследовательностей (катен) водосборов 2 порядка: 1- хорошо дренируемые, 2- умеренно дренируемые, 3 – слабодренируемые, 4 – плоские переувлажненные, 5 – плоские сильно-переувлажненные, 6 – плоские западинные.

Моделирование уровня грунтовых вод с использованием уравнения (3) было проведено для всех шести основных типов катен. Первоначально требуемый порог точности в модели был установлен на уровне 95%, однако достичь его удалось лишь для двух из шести катен. Для двух других удовлетворительным оказался несколько более низкий уровень точности (90–93%). Оставшиеся две катены были смоделированы с порогами 80% и 75% соответственно.

Наибольшее влияние на моделируемый уровень грунтовых вод оказали рельеф и глубина водоупорного слоя. Как предполагалось ранее, катены с относительно более сглаженным рельефом в среднем демонстрировали более высокий уровень грунтовых вод, тогда как катены с большей профильной крутизной имели более глубокий уровень грунтовых вод. При этом длина катены практически не оказывала влияния на уровень грунтовых вод. (рис. 45-46)

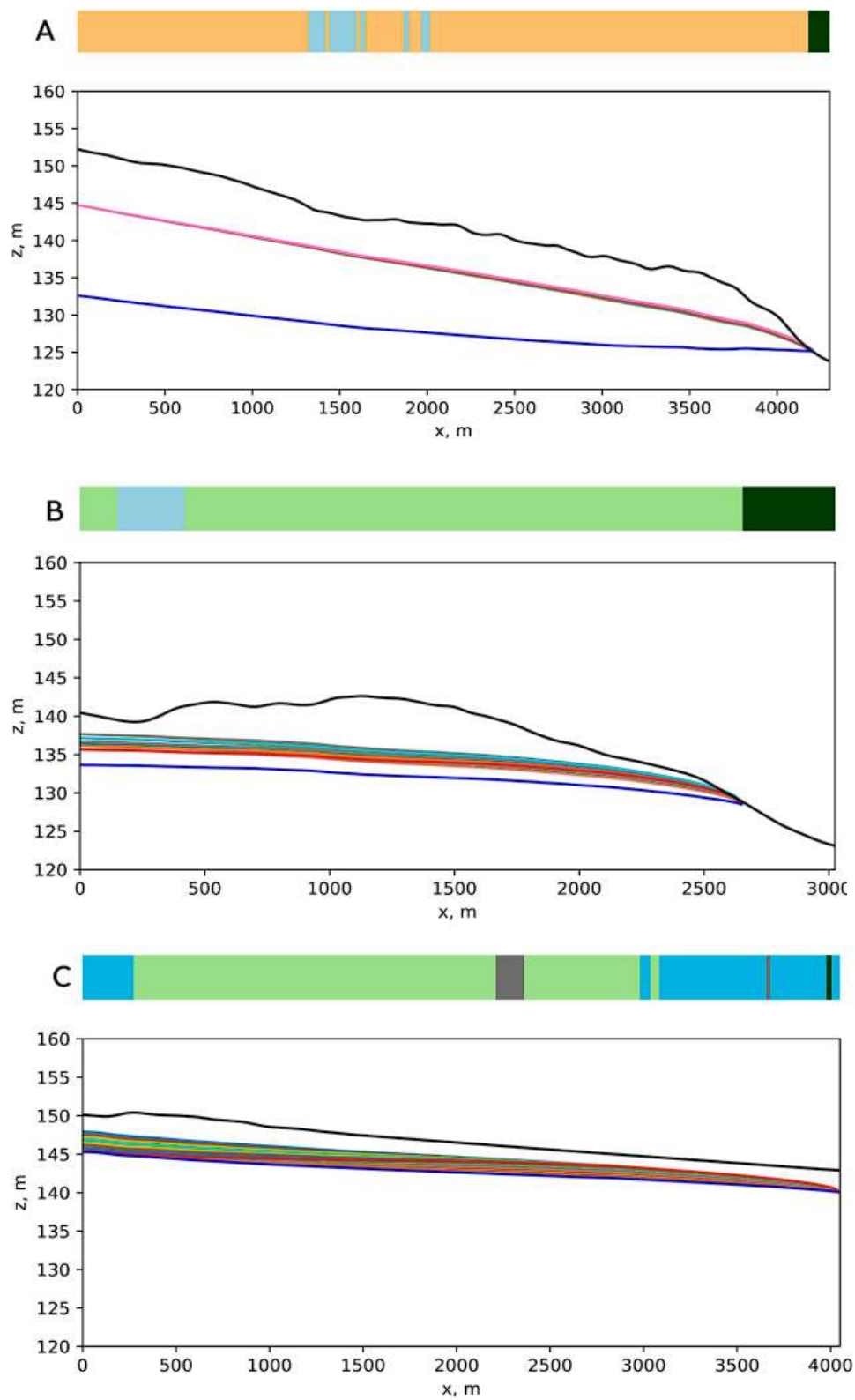


Рисунок 45. Профили разброса рассчитанного УГВ, для типичных катен 1–3

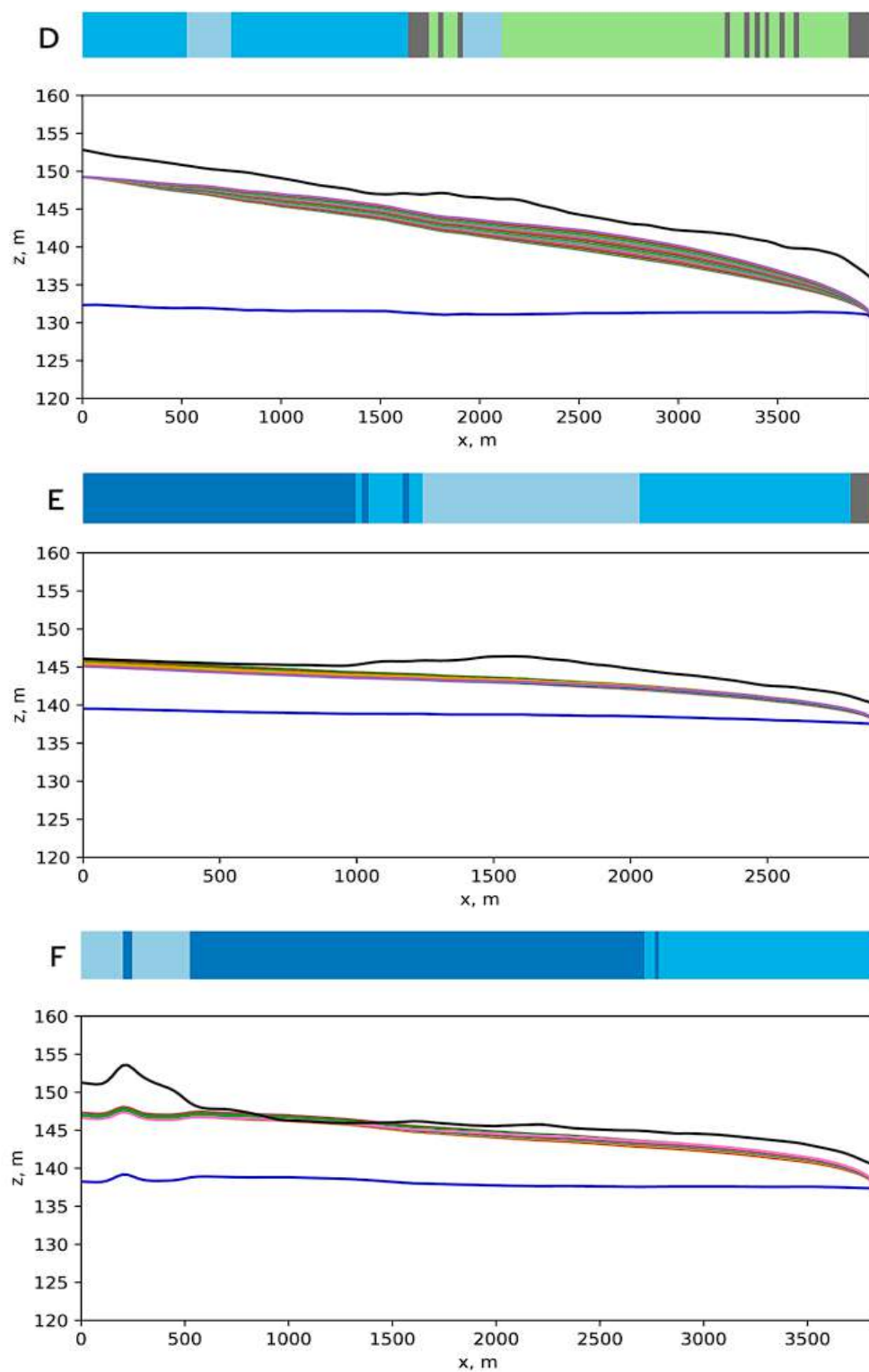


Рисунок 46. Профили разброса рассчитанного УГВ, для типичных катен 4–6

Для верификации расчетов значения уровня грунтовых вод, полученные для типичных катен, были перенесены в их катены-аналоги. Далее для каждой катены была проведена оценка точности моделирования УГВ относительно характерных для них типов местностей.

Соответствие между смоделированным уровнем грунтовых вод и диапазонами УГВ, предварительно определенными по группам почв, оказалось лишь немного хуже по сравнению с результатами, полученными при использовании локально скорректированных параметров (таблица 2, последний столбец в скобках). В целом моделирование продемонстрировало достаточно высокую точность. Однако предполагается, что основными источниками погрешности стали отсутствие дифференцированных данных о вариациях коэффициента инфильтрации между катенами, а также ограниченное количество полевых измерений. Из-за трудоемкости проведения таких измерений данные о коэффициенте инфильтрации были получены всего в двух точках в пределах водосбора, что могло повлиять на точность расчетов.

Что дополнительно подтверждается результатами мониторинга уровня грунтовых вод (рисунок 47).

Таблица 5. Кросс-валидация вариабельности УГВ в разных катенах, для разных типов местности

Тип местности	Тип катены						
	1	2	3	4	5	6	Во всех катенах
1	6.3–6.5						6.3–6.5
2		4.4–4.6	3.0–3.0	3.9–4.0			3.0–4.6
3	5.0–5.5	3.5–5.0		3.0–3.2	1.8–2.0	1.5–1.9	1.5–5.5
4			2.9–3.1	2.8–3.1	1.7–1.9	1.6–1.7	1.5–3.1
5					1.7–1.9	1.2–1.4	0.8–1.5
6							
7							
8	3.5–6.0		1.7–3.3				1.7–6.0
9			2.9–3.0	2.8–4.0	1.0–2.5		1.0–4.0

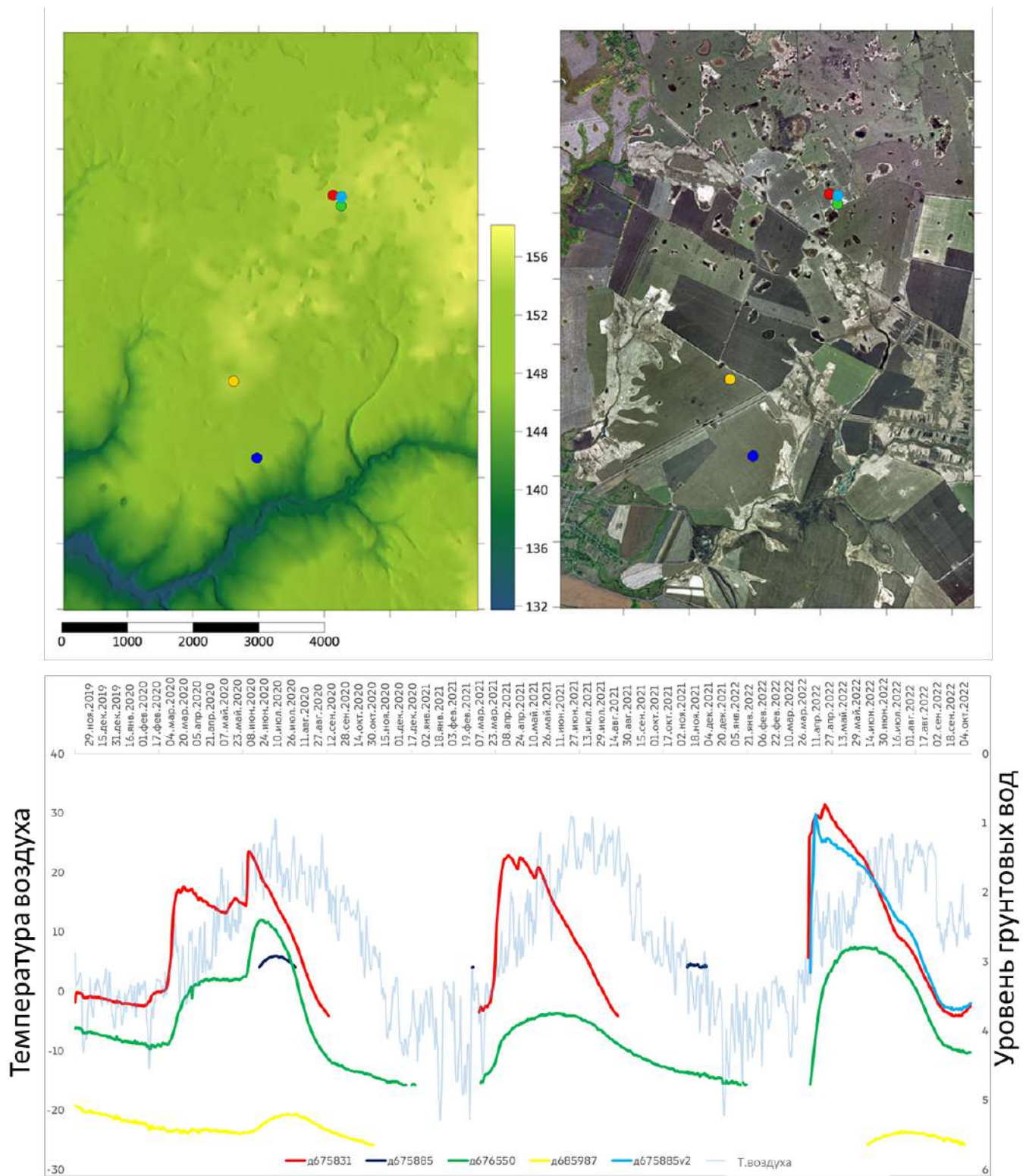


Рисунок 47. Динамика уровня грунтовых вод, мониторинг (катена 6)

5.2 Динамика уровня грунтовых вод по расчётам бассейновой модели с учетом информации о инфильтрации воды из западин по данным БВС

Моделирование уровня грунтовых вод с использованием данных о локальной инфильтрации из западин позволило уточнить пространственно-временную структуру водного режима в условиях плоских недренируемых междуречий. Расчёты продемонстрировали, что поступление влаги из замкнутых понижений оказывает значительное влияние на глубину залегания уровня грунтовых вод (УГВ), обеспечивая его подъём до 1,5–2 метров по сравнению со сценарием с равномерным пополнением по всей площади водосбора (рис. 48).

Пространственно-детализированная инфильтрация оценивалась по топографическим профилям, пересекающим ключевой участок, и выражалась в виде слоя воды (мм), поступающего в почву по данным дистанционного и наземного мониторинга. Для каждой точки были заданы измеренные экспериментально гидрофизические свойства почв, что обеспечило адекватную оценку потока воды в зону насыщения. Такой подход позволил перейти от качественной индикации гидроморфизма к количественному описанию водного режима почвенных катен.

В условиях экстремальных климатических лет западины выполняли функцию временных резервуаров: весной они были полностью заполнены талой водой, что обеспечивало длительное поддержание высокого уровня грунтовых вод даже в засушливые летние месяцы. При этом величина инфильтрационного пополнения из западин достигала 100–150 мм, что эквивалентно четверти годового атмосферного увлажнения.

Таким образом, модельные результаты убедительно показывают, что западинные урочища выполняют критическую роль в поддержании подпитки водоносного горизонта в условиях лесостепной Окско-Донской низменности. Учёт их функционирования позволяет значительно повысить точность пространственного моделирования гидрологического режима и уточнить представления о структуре водного баланса ландшафта. Таким образом, предложенный метод оценки инфильтрации, учитывающий поступление воды из западин, позволяет значительно повысить точность расчета профиля уровня грунтовых вод по сравнению с моделями, использующими постоянную скорость пополнения.

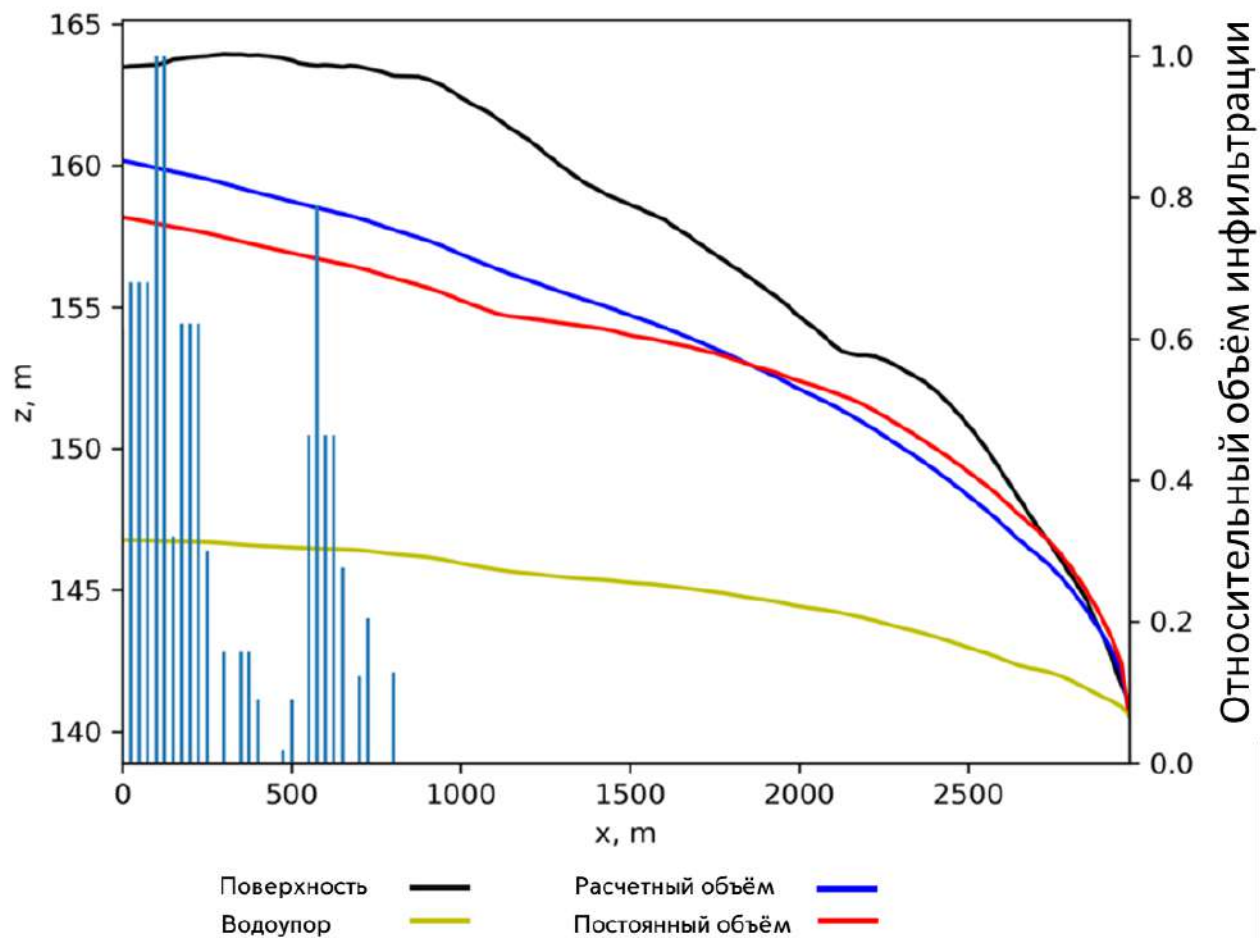


Рис. 48. Поперечное сечение катены с глубиной залегания грунтовых вод (WTD, синяя и красная линии), скорректированной в соответствии с типом местности. Желтые и черные линии указывают положение коренной породы и профиля ЦМР соответственно. Синие и красные линии соответственно указывают WTD, полученную с инфильтрацией вдоль трансект, оцененной по положениям впадин и удельной скорости инфильтрации (как показано синими столбиками и правой осью y) и постоянной инфильтрацией вдоль трансекты.

Глава 6. Влияние структуры и функционирования ландшафтов Окско-Донской низменности на структуру землепользования

Для выполнения поставленной задачи была подготовлена цифровая модель Петровского района Тамбовской области, расположенного в пределах Окско-Донской низменности, и векторный слой границ пашни в пределах этого же района. В библиотеке RSAGA в среде R с используя инструмент «Closed depressions» и ЦМР рельефа района с разрешением 10 м/пиксель была построена карта закрытый понижений. Однако алгоритм отнес к закрытым понижениям не только западины на междуречьях, но реки и пруды. Для уточнения цифровой модели закрытых понижений, используя RSAGA в среде R, была выполнен расчет модели дистанции до водотоков и используя пороговое значение 0.5 нам удалось избавиться от проявления в модели иных закрытых понижений кроме западин. Затем используя библиотеку ArcPy в среде Python с использованием инструмента «Create-fishnet» построена регулярная сетка с разрешением 100 м, И для полученной регулярной сетки было рассчитано доленое участие пикселей, которые относятся к закрытым понижениям, таким образом была получена карта долевого участия западин (рисунок 49).

Для каждого поля векторной карты границ пашни, был рассчитана мера квадратности полигона:

$$q = \frac{p^2}{s}, \quad (16)$$

где q – мера квадратности полигона, p – периметр полигона, s – площадь полигона, в результате карта отражающая геометрию полей, чем больше поле и чем квадрат его периметра ближе к его площади, тем данное поле более удобное для организации прохода техники. А изрезанность линии поля в Окско-Донской низменности связана с повсеместным проявлением западин на междуречьях.

Затем цифровая модель плотности западин была наложена на цифровую модель меры квадратности поля, в результате чего было получение доленое распределение, типов геометрии полей в зависимости от плотности западин представлено на (рисунке 49). Из полученного результата хорошо видна приуроченность разных типов геометрии полей к различным ландшафтным условиям. Наиболее крупные и геометрически удобные поля приурочены к хорошо дренируемым участкам (зеленый), а красным цветом обозначены наиболее не правильные поля, изрезанные западинными урочищами. Таким образом ландшафтная структура и ее функционирования непосредственно влияет на организацию хозяйственной деятельности территории, что проявляется в эффективности использования

удобрений, затрат на горюче-смазочные материалы и лимитирует возможность применения подходов точного земледелия.

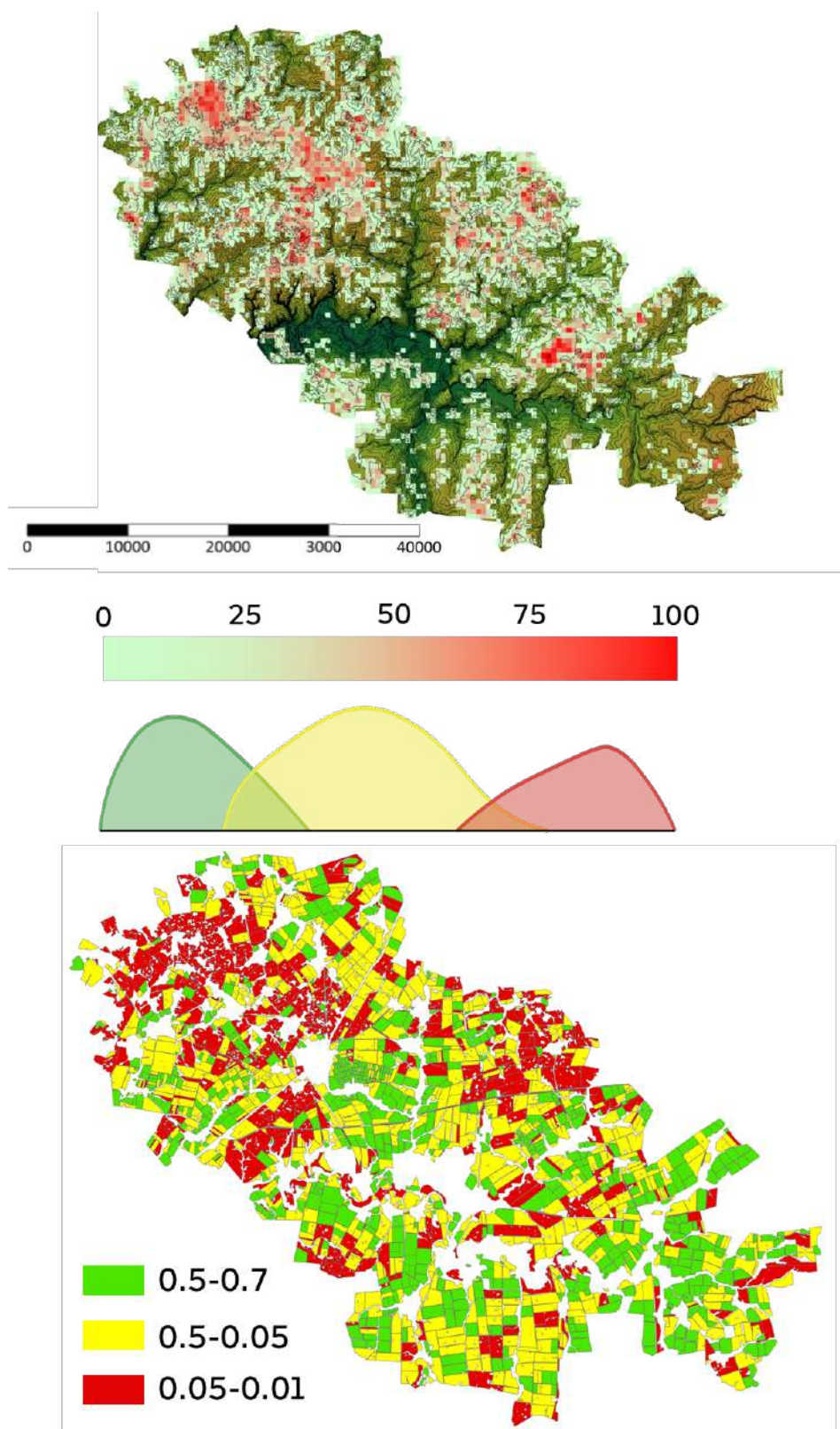


Рисунок 49. Долевое участие западин (%) в ландшафте – верхняя часть, нижняя часть рисунка - цифровая модель правильности геометрии возделываемых полей, средняя часть –

диаграмма распределение типов геометрии полей в пространстве плотности западин, граничные условия – естественный интервал

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать следующие **выводы**:

1. Западинные урочища в составе междуречий Окско-Донской низменности формируют дополнительный объем внутрипочвенного стока и определяют широкое распространение почв черноземного ряда с промывным, застойно-промывным и водозастойным водными режимами.

2. Закономерности формирования внутрипочвенного стока и его влияние на структуру и гидрологическое функционирование низменных ландшафтов лесостепи определяются путем сопоставления морфологического разнообразия почв возрастающего гидроморфизма с параметрами и результатами численного моделирования их водного режима за период метеорологических наблюдений (1936-2023 гг.) с учетом оценки объема инфильтрационного стока в днищах западинных урочищ с использованием цифровых моделей их рельефа и дистанционной диагностикой заполненности западин талой влагой.

3. Объем внутрипочвенного стока в водном балансе элементов западинного комплекса зависит от морфологии их водосбора, режима снеготаяния и гидрофизических условий инфильтрации влаги в почву.

4. В годы без устойчивого промерзания почвы (2007, 2008, 2010-2016, 2021-2023) поверхностный склоновый сток отсутствует, талые воды переходят в ненасыщенный внутрипочвенный сток, равномерно увлажняя верхние горизонты почвы по всему междуречью. В годы с промерзанием талые воды либо выводятся за пределы междуречий дренажной сетью овражно-балочного комплекса, либо задерживаются дренажной сетью западинного комплекса и формируют насыщенный внутрипочвенный сток, питающий грунтовые воды.

5. В годы с запасом воды в снеге более 300 мм (1938-1950, 1954-1957, 1964-1968, 1973-1989, 1991-1995, 2006, 2017) днища западин концентрируют до 50% талого стока недренируемых междуречий с инфильтрацией до 150 мм влаги в грунтовые воды, что сопровождается повышением их уровня на 3 м и сезонным застоём влаги в профиле почвы до четырех месяцев.

6. Средняя частота и продолжительность водозастойных явлений в профиле почв определяют особенности их генезиса и разнообразие морфологического строения. В ряду почв

возрастающего гидроморфизма средняя повторяемость и продолжительность застойных явлений составляет 50% лет и 35 суток для лугово-черноземных, 75% лет и 60 суток для черноземно-луговых и 90% лет и 130 суток для влажно-луговых почв.

7. За годы метеорологических наблюдений интенсивное питание грунтовых вод в западинном комплексе междуречий отмечается в 1965-2000 гг. Последние десятилетия отмечены снижением объема инфильтрационного стока, понижением уровня почвенно-грунтовых вод, частоты и продолжительности водозастойных явлений в профиле почв.

8. Перехват поверхностного стока западинами недренируемых междуречий приводит к подъему уровня грунтовых вод и формированию водозастойных явлений в более дренируемых участках в условиях дефицита атмосферного увлажнения. Учёт дополнительного питания грунтовых вод через западины улучшил расчёт их стационарного уровня для междуречий Окско-Донской низменности, показав его повышение на 2 м, что подтверждается мониторингом и согласуется с морфологическими параметрами почв.

9. На участках с высокой плотностью западинных урочищ (более 80%) возделываемые поля приобретают значительно более сложную и изрезанную форму. В то же время на более дренируемых участках, где плотность западинных урочищ составляет менее 20%, поля имеют геометрию, максимально приближенную к квадратной. Поля со сложной геометрией, окруженные западинными урочищами, характеризуются повышенной внутрислоевой неоднородностью и межсезонной изменчивостью неблагоприятных водозастойных явлений.

Литература

1. Адерихин П.Г. Лесникова А.Е. Почвенный покров Моршанского района Тамбовской области и его зависимость от природных факторов // Некоторые проблемы биологии и почвоведения. – Изд-во ВГУ, 1967.
2. Анциферова О.А. Динамика растительности и свойств почв на молодых залежах Тамбовской равнины и Замландского полуострова. – Калининград, 2005.
3. Атлас Тамбовской области. – М.: Роскартография, 1999.
4. Ахтырцев А. Б. К характеристике почв западин северной части Тамбовской равнины. – Науч. зап. Воронежск. отд. Геогр. О-ва СССР, 1974б. – С.30–39.
5. Ахтырцев А. Б. О склоновой микрозональности почв в западинах Мичуринского района Тамбовской области//География и плодородие почв. – Воронеж. – 1973. – С.216–220.
6. Ахтырцев А. Б. Почвенный покров западин Панинского плоскоместья Тамбовской равнины. – В кн.: География, районирование и мелиорация почв РСФСР. Воронеж, 1974а. – С.93–110.
7. Ахтырцев А. Б. Структура почвенного покрова северной части Окско-Донской равнины//Научные основы рационального использования почв. Саранск. – 1981. – С.5–15.
8. Ахтырцев А.Б. Гидроморфные почвы и переувлажненные земли лесостепи и степи Русской равнины: Дис. На соиск. Уч. Степ. д. б. н., Воронеж, 1999. 383 с.
9. Ахтырцев А.Б., Адерихин П.Г., Ахтырцев Б.П. Лугово-черноземные почвы центральных областей Русской равнины: Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 1981. 174 с.
10. Ахтырцев А.Б., Ахтырцев Б.П., Почвы. – В кн.: Окско-Донское плоскоместье. – Воронеж, 1976. – 176 с.
11. Ахтырцев Б.П. Почвенные комплексы Окско-Донской низменности//Известия Воронежского отдела географического общества СССР. – вып.4. – 1962. – С.161-167.
12. Ахтырцев Б.П., Адерихин П.Г., Кадер Г.М. Осолоделые почвы Окско-Донской равнины и их эволюция. – Воронеж, Изд-во Воронежского ун-та, 1975. – 183 с.
13. Ахтырцев Б.П., Ахтырцев А.Б. Почвенный покров Среднерусского Черноземья. – Воронеж, Изд-во ВГУ. – 1993. – 216 с.
14. Берг Л. С. Классификация форм рельефа // Природа. – 1929. № 6.
15. Беручашвили Н.Л. Четыре измерения ландшафта М: Мысль, 1986. — 182 с.
16. Брудастов А.Д. Осушение минеральных и болотных земель. – М.: Сельхозгиз, 1955.

17. Бугаевский В.К. О структуре почвенного покрова луговых почв лесостепи//Биологические науки. – №2. 1972а. – С. 124-128.
18. Герасимов И.П. Опыт генетической диагностики почв СССР на основе элементарных почвенных процессов // Почвоведение, 1975. № 5
19. Добровольский Г.В., Урусевская И.С. География почв. 2-е изд. – М.: Изд-во «КолосС», 2004.
20. Дубровин О.И., Инякина Е.Е., Кольцова Г.В., и др. География и экология Тамбовской области. – Тамбов: Изд-во ИПКРО, 2001.
21. Дьяконов К. Н., Сысуев В. В. Развитие новых направлений в дисциплинах геофизики ландшафтов //Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2021. – №. 6. – С. 148-158.
22. Зайдельман Ф.Р. Процесс глееобразования и его роль в формировании почв. – М.: Издательство МГУ, 1998.
23. Зайдельман Ф.Р., Никифорова А.С., Степанцова Л.В. Химические свойства автоморфных и гидроморфных почв севера лесостепи//Вестн. Моск. ун-та. – Сер.17. – 2006. – N1.10–16.
24. Зайдельман Ф.Р., Никифорова А.С., Степанцова Л.В. Эколого-гидрологические особенности выщелоченного чернозема и лугово-черноземных почв севера Тамбовской равнины//Почвоведение. – 2002. № 9. – С. 1102-1114.
25. 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. М.,2013. – 350 с., цв. илл.
26. Зайдельман Ф.Р., Тюльпанов В.И., Ангелов Е.Н., Давыдов А.И. Почвы мочарных ландшафтов - формирование, агроэкология и мелиорация. – М.: Издательство МГУ, 1998. - 160 с.
27. Исаченко А. Г., Шляпников А. А. Ландшафты — М.: Мысль, 1989. — 504 с.
28. Кирюшин В.И. Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия. М, 2005
29. Ковда В.А. Биосфера, почвы и их использование. /Материалы X международного конгресса почвоведов. – М., 1974. – С. 49-58.
30. Ковда В.А. Почвенный покров, его улучшение, использование и охрана. – М.: Наука. 1981.
31. Ковда В.А., Самойлова Е.М. О возможности нового понимания истории почв Русской равнины//Почвоведение. – 1966. – №9.

32. Козлов Д. Н., Лозбенев Н. И., Левченко Е. А. Структурно-функциональная организация водно-миграционных и эрозионно-аккумулятивных комплексов лесостепи Среднерусской возвышенности // Ландшафтоведение: теория, методы, ландшафтно-экологическое обеспечение природопользования и устойчивого развития [Электронный ресурс]: материалы XII Международной ландшафтной конференции, Тюмень-Тобольск, 22-25 августа 2017 г. — Т. 1. — Тюменского государственного университета Тюмень, 2017. — С. 71–76.
33. Козлов Д.Н., Сорокина Н.П. Традиции и инновации в крупномасштабной почвенной картографии // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. М.: 2012
34. Козловский Ф.И. Теория и методы изучения почвенного покрова. М.: ГЕОС, 2003 – 534 с.
35. 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.
36. Мильков Ф. Н. Типы местности и ландшафтные районы Центральных черноземных областей // Изв. ВГО. — 1954. — Т. 86. Вып. 4. — С. 336—346.
37. Мильков Ф. Н. Типы местности и ландшафтные районы Центральных черноземных областей // Изв. ВГО. — 1954. — Т. 86. Вып. 4. — С. 336—346.
38. Мильков Ф.Н. Поценье. Воронеж: Издательство Воронежского университета, 1981. — 172 с.
39. Мильков Ф.Н. Поценье. Воронеж: Издательство Воронежского университета, 1981. — 172 с.
40. Мильков Ф.Н. Природные зоны СССР - М.: Мысль, 1977. – 296 с.
41. Мильков, Ф.Н. Окско-Донское плоскогорье. Воронеж : Изд-во ВГУ, 1976
42. Полупан Н.И., Нестеренко А.Ф., Яровенко Е.В. О мочарах и мочаристых почвах//Почвоведение. – 1983. № 12. С. 5-16.
43. Попов Т.И Происхождение и развитие осинового куста в пределах Воронежской губернии // Тр. Докучаевского почвенного комитета, – вып. 2, СПб, 1914.
44. Почвы Жердевского района Тамбовской области и рекомендации по их использованию. Пояснительная записка к почвенной карте Жердевского района М-ба 1:50000, составила Михалева Н.В. под руководством Н.И.Завершинского, – 1990.
45. Почвы колхозов и совхозов Токаревского района Тамбовской области Тамбов. – 1990.
46. Природа Тамбовской области. – Тамбов: Изд-во «Тамбовская правда», 1955. – С. 86
47. Природно-сельскохозяйственное районирование земельного фонда СССР, 1984

48. Публичная кадастровая кадастровая карта России. Доступно в Интернете: <https://pkk.rosreestr.ru> (Дата обращения 10 сентября 2021).
49. Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях: Учебн. пособие для студ. вузов. – М.: Издательский центр "Академия", 2004 - 416 с.
50. Пузаченко Ю.Г. Организация ландшафта // Горизонты ландшафтоведения. Вопр. географии. Вып. 138. М.: Кодекс, 2014. С. 35–64.
51. Ретеюм А.Ю. Физико-географическое районирование и выделение геосистем // Вопросы географии, сб. 98, М.: Наука, 1975
52. Роде А.А. Генезис почв и современные процессы почвообразования. – М.: Наука, 1984. – 255 с.
53. Роде А.А. Избранные труды: в 4 т. – М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. –Т. 1: Теоретические проблемы почвоведения и вопросы генезиса почв. – 243 с.
54. Роде А.А. Почвенная влага. – Л.: Изд-во АН СССР, 1952.
55. Роде А.А., Ковда В.А. Почвы бассейна р. Дона. – В кн.: Почвы СССР. – т.3. – М., 1939.
56. Розанов Б.Г. Морфология почв. – М.: Изд. МГУ, 1983.
57. Розов Н.Н. Почвы центральной лесостепной области. – В кн.: Почвы СССР. – т.3. – М., 1939.
58. Самойлова Е.М. Якушевская И.В. Характеристика комплекса луговых почв колочной лесостепи//Почвоведение, 1970. – №3.
59. Смирнова М.А., Бардашов Д.Р., Филь П.П., Лозбенев Н.И., Доброхотов А.В. Сезонная и многолетняя динамика влажности лугово-черноземных почв (Окско-Донская низменность) // Почвоведение. – 2024. – № 10. – С. 1343–1360.
60. Солнцев В. Н. О некоторых фундаментальных свойствах геосистемной структуры // Методы комплексных исследований геосистем. — Иркутск, 1974. — С. 26–36.
61. Солнцев В. Н. Системная организация ландшафтов (проблемы методологии и теории). — М.: Мысль, 1981. — 239 с.
62. Солнцев В. Н. Структурное ландшафтоведение: основы концепции // Структура, функционирование, эволюция природных и антропогенных ландшафтов. — М., СПб, 1997. — С. 11–14.
63. Сорокина Н.П., Складенко С.В. К методике агроэкологической оценки почвенного покрова // Бюл Почвенного института им. В.В. Докучаева. Генезис и классификация СПП и их использование при решении прикладных задач. – М., 1988.
64. Сочава В.Б. Теоретическая и прикладная география / В.Б. Сочава. — Новосибирск: Наука, 2005. — 288 с.

65. Сочава В.Б. Учение о геосистемах / В.Б.Сочава. - — Новосибирск: Наука, 1976. — 40 с.
66. Степанцова Л.В., Красин В.Н., Красина Т.В. Некоторые особенности почв замкнутых западин севера Тамбовской области и возможность их фитомелиорации// Русский чернозем: юбилейный сборник научных работ. – Воронеж: ФГОУ ВПО ВГАУ, 2007 – С. 221-226
67. Сысуев В.В. Введение в физико-математическую теорию геосистем. М.: «ЛЕНАНД»/URSS, 2020. 600 с.
68. Сысуев В.В. Геофизическая парадигма ландшафтоведения: постулаты и концепции // Изв. Русского географического общества. 2019. Вып. 4. С. 63–81. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-6071151460-82>.
69. Сысуев В.В. Морфометрический анализ геофизической дифференциации ландшафтов // Известия РАН, сер. Геогр, № 4, 2003, с. 36-50.
70. Тамбовская лесостепь: природа и общество: монография / науч. ред. Н.И. Дудник, отв. ред. Е.Е. Инякина, С.В. Панков; М-во обр. и науки РФ [и др.]. Тамбов : Издательский дом ТГУ имени Г.Р. Державина, 2013. 320 с.
71. Тамбовская лесостепь: природа и общество: монография / науч. ред. Н.И. Дудник, отв. ред. Е.Е. Инякина, С.В. Панков; М-во обр. и науки РФ [и др.]. Тамбов : Издательский дом ТГУ имени Г.Р. Державина, 2013. 320 с.
72. Тарасов Ф.В. Карта типов местности и ландшафтных районов Окско-Донской низменности. «Науч. Докл. Высшей школы», серия геолого-географич., – № 1, 1959.
73. Троцкий А.И. Почвенно-грунтовые воды Окско-Донской низменности и глубина их залегания//Почвоведение. – 1970. №3. – С.51-58
74. Трубников А.В. Влияние микропонижений на продуктивность почв юга Тамбовской равнины // Земледелие. – № 3, 2008. – С. 12-13.
75. Физико-географическое районирование центральных черноземных областей. Под ред. Ф.Н. Милькова, Воронеж. Изд-во Воронеж. ун-та, 1961 г. – 261 с.
76. Фридланд В.М. Структура почвенного покрова. М.: Мысль, 1972. – 410 с.
77. Хорошев А. В. Современные направления структурного ландшафтоведения // Известия Российской академии наук. Серия географическая. — 2016. — № 3. — С. 7–15.
78. Хорошев А.В. Полимасштабная организация географического ландшафта. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. – 416 с.

79. Alcock J. Wetland and Grassland Retention and Restoration as an Effective Carbon Management Strategy in Alberta The Business Case. 2017
80. Allen, R.G. FAO Irrigation and Drainage. Irrig. Drain. 1998, 300, 300.
81. ArcGIS Pro Polygon Volume (3D Analyst). Available online: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/polygon-volume.htm> (Дата обращения 10 сентября 2021).
82. ArcGis Pro The Image Classification Wizard. Available online: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/image-analyst/the-image-classification-wizard.htm> (Дата обращения 10 сентября 2021).
83. Armstrong, R.N.; Pomeroy, J.W.; Martz, L.W. Evaluation of three evaporation estimation methods in a Canadian prairie landscape. Hydrol. Process. Int. J. 2008, 22, 2801–2815.
84. Belgiu, M.; Drăgu, L. Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 2016, 114, 24–31.
85. Breiman, L. Random forest. Mach. Learn. 2001, 45, 5–32.
86. Classification and diagnostics of soils of the USSR. M: Klos, 1977. - 221 p.
87. Comaniciu, D.; Meer, P. Mean shift: A robust approach toward feature space analysis. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 2002, 24, 603–619.
88. Dumanski, S., Pomeroy, J.W., Westbrook, C.J. 2015. Hydrological regime changes in a Canadian prairie basin. Hydrological Processes, HYP-14-0856, DOI: 10.1002/hyp.10567.
89. Ehsanzadeh, E., van der Kamp, G. and Spence, C. 2015. On the changes in long term streamflow regimes in the Prairies. Hydrological Sciences Journal, doi: 10.1080/02626667.2014.967249.
90. Elliott, J. A., Cessna, A. J., & Hilliard, C. R. (2001). Influence of tillage system on water quality and quantity in prairie pothole wetlands. Canadian Water Resources Journal, 26(2), 165–181. <https://doi.org/10.4296/cwrj2602165>.
91. Evaplib Python Library. Available online: http://python.hydrology-amsterdam.nl/moduledoc/_modules/evaplib.html (Дата обращения 10 сентября 2021).
92. Fan, Y., Bras, R.L., 1998. Analytical solutions to hillslope subsurface storm flow and saturation overland flow. Water Resour. Res. 34, 921–927. <https://doi.org/10.1029/97WR03516>.
93. Fil P. P. et al. Estimation of Infiltration Volumes and Rates in Seasonally Water-Filled Topographic Depressions Based on Remote-Sensing Time Series //Sensors. – 2021. – T. 21. – №. 21. – C. 7403.

94. Francke, T., Güntner, A., Mamede, G., Müller, E.N., Bronstert, A., 2008. Automated catena based discretization of landscapes for the derivation of hydrological modelling units. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 22, 111–132. <https://doi.org/10.1080/13658810701300873>.
95. Fukunaga, K.; Hostetler, L.D. The estimation of the gradient of a density function, with applications in pattern recognition. *IEEE Trans. Inf. Theory* 1975, 21, 32–40.
96. Gadal, S.; Zakharov, M.; Kamicaityte, J.; Danilov, Y. Alas landscape modeling by remote sensing image analysis and geographic ontology: Study case of central yakutia (Russia). In *Proceedings of the GISTAM 2020—6th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management*, Prague, Czechia, 7–9 May 2020; pp. 112–118.
97. Güntner, A., 2002. Large-scale hydrological modelling in the semi-arid North-East of Brazil. *PIK Rep.* 1–119.
98. Güntner, A., Bronstert, A., 2004. Representation of landscape variability and lateral redistribution processes for large-scale hydrological modelling in semi-arid areas. *J. Hydrol.* 297, 136–161. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.04.008>.
99. Hayashi, M., van der Kamp, G., Rosenberry, D.O., 2016. Hydrology of prairie wetlands: 668 understanding the integrated surface-water and groundwater processes. *Wetlands* 36, 237–669 254. <https://doi.org/10.1007/s13157-016-0797-9>
100. IUSS Working Group WRB, 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps.
101. Li, M.; Zang, S.; Zhang, B.; Li, S.; Wu, C. A review of remote sensing image classification techniques: The role of Spatio-contextual information. *Eur. J. Remote Sens.* 2014, 47, 389–411.
102. Mekonnen, M.A., Wheeler, H.S., Ireson, A.M., Spence, C., Davison, B., Pietroniro, A., 2014. Towards an improved land surface scheme for prairie landscapes. *J. Hydrol.* 511, 105–116. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.020>
103. Meyboom, P., 1966. Unsteady groundwater flow near a willow ring in hummocky moraine. *J. Hydrol.* 4. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(66\)90066-7](https://doi.org/10.1016/0022-1694(66)90066-7)
104. Noorduijn, S.L., Hayashi, M., Mohammed, G.A., Mohammed, A.A., 2018. A coupled soil water balance model for simulating depression-focused groundwater recharge. *Vadose Zo. J.* 17, 170176. <https://doi.org/10.2136/vzj2017.10.0176>
105. Noorduijn, S.L.; Hayashi, M.; Mohammed, G.A.; Mohammed, A.A. A coupled soil water balance model for simulating depression-focused groundwater recharge. *Vadose Zo. J.* 2018, 17, 170176.

106. Ovechkin S.V., Isaev V.A. Periodically waterlogged soils of the Central Chernozem Region // Genesis, anthropogenic evolution and rational use of soils: Nauch. tr. Soil Institute named after V.V. Dokuchaev. M. 1989. S. 8 - 25.
107. Penman, H.L. Evaporation: An introductory survey. Netherlands J. Agric. Sci. 1956, 4, 9–29.
108. Penman, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. R. Soc. Lond. A. Math. Phys. Sci. 1948, 193, 120–145.
109. Pilz, T., Francke, T., Bronstert, A., 2017. lumpR: An R package facilitating landscape discretisation for hillslope-based hydrological models. Geosci. Model Dev. Discuss. 1–34. <https://doi.org/10.5194/gmd-2017-17>
110. Soloviev I.N. Dynamics of the humidity regime of virgin chernozem in the period 1946-1984. //Soil science. 1989. No. 1. S. 134-139.
111. Spence, C., Wolfe, J.D., Whitfield, C.J., Baulch, H.M., Basu, N.B., Bedard-Haughn, A.K., 694 Belcher, K.W., Clark, R.G., Ferguson, G.A., Hayashi, M., Liber, K., McDonnell, J.J., Morrissey, C.A., Pomeroy, J.W., Reed, M.G., Strickert, G., 2019. Prairie water: a global water futures project to enhance the resilience of prairie communities through sustainable water management. Can. Water Resour. J. 44, 115–126. 698 <https://doi.org/10.1080/07011784.2018.1527256>
112. Troch, P., Van Loon, E., Hilberts, A., 2002. Analytical solutions to a hillslope-storage kinematic wave equation for subsurface flow. Adv. Water Resour. 25, 637–649. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(02\)00017-9](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00017-9)
113. Van Genuchten M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils //Soil science society of America journal. – 1980. – T. 44. – №. 5. – C. 892-898.
114. Vapnik, V.N. The Nature of Statistical Learning; Springer: New York, NY, USA, 1995.
115. Vodyanitsky Yu.N. A new indicator of soil hydromorphism according to the state of iron, Dokl. RAAS. 2007. No. 4. S. 33-35.
116. Wade, T.G.; Wickham, J.D.; Nash, M.S.; Neale, A.C.; Riitters, K.H.; Jones, K.B. A Comparison of Vector and Raster GIS Methods for Calculating Landscape Metrics Used in Environmental Assessments. Photogramm. Eng. Remote Sensing 2003, 69, 1399–1405.
117. Wade, T.G.; Wickham, J.D.; Nash, M.S.; Neale, A.C.; Riitters, K.H.; Jones, K.B. A Comparison of Vector and Raster GIS Methods for Calculating Landscape Metrics Used in Environmental Assessments. Photogramm. Eng. Remote Sensing 2003, 69, 1399–1405.

118. Walter, H., Breckle, S., 1989. Temperate and Polar Zonobiomes of Northern Eurasia, Ecological. Systems of the Geobiosphere.
119. Waz, A.; Creed, I.F. Automated Techniques to Identify Lost and Restorable Wetlands in the Prairie Pothole Region. *Wetlands* 2017, 37, 1079–1091.
120. Yurova, A.Y.; Smirnova, M.A.; Lozbennev, 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, 199, 105109.