

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Филь Павел Петрович

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

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2025

Диссертация подготовлена на кафедре физической географии и ландшафтоведения географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и в отделе государственного реестра почв ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева».

Научные руководители:

Сысуев Владислав Васильевич

профессор, доктор географических наук

Козлов Даниил Николаевич

кандидат географических наук

Официальные оппоненты:

Черных Дмитрий Владимирович – доктор географических наук, доцент, ФГБУН «Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук», лаборатория ландшафтно-водноэкологических исследований и природопользования, главный научный сотрудник

Степанцова Людмила Валентиновна – доктор биологических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», Институт фундаментальных и прикладных агробиотехнологий им. И. В. Мичурина, кафедра агрохимии, почвоведения и агроэкологии, профессор

Горбунов Анатолий Станиславович – кандидат географических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский Государственный Университет», факультет географии, геоэкологии и туризма, кафедра физической географии и оптимизации ландшафта, доцент

Защита диссертации состоится «29» мая 2025 г. В 17 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.9 Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова по адресу: 119991, Россия г. Москва, Ленинские горы, д. 1, Главное здание МГУ, географический факультет, 18-й этаж, ауд. 1807.

E-mail: dissovetmsu016.9@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М. В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте АИС «Диссовет»: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3420>

Автореферат разослан «__» апреля 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
Кандидат географических наук



М. А. Смирнова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и изученность темы. 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 экотонov 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 к изучению 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 позволило сформировать четыре основных подхода: эмпирический (Johnson и др., 2010, Hayashi, 2016), статистический (Woo др., 1993, Shok и др., 2015), сочетание теоретического и эмпирического (Evenson и др, 2016, Tahmabessi и др, 2017, Yurova 2021) и теоретическое моделирование (Tangen и Finocchiaro 2018).

Для решения задачи описания взаимосвязи морфологической структуры ландшафтов Окско-Донской низменности с режимами их гидрологического функционирования предложен подход, основанный на комбинировании классических подходов цифровой почвенной картографии, гидрологического мониторинга (наземного и почвенного) и моделей тепловлагодобереноса в почве и атмосфере, базирующийся на работах (Pitman, 1991, Selles и др., 1997, Володин, Лыкосов, 1998, A Güntner 2010.).

Цель работы – оценить влияние западных урочищ на формирование 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 западных урочищ в структуру водного баланса недренируемого типа местности Окско-Донской низменности в годы с различным режимом тепловлагодобеспеченности.
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 западных урочищ.

Методология исследования. В работе используется сочетание понятийной и методологической базы, разработанной в рамках ландшафтно-типологического подхода (Мильков, 1966), методов цифровой почвенной картографии (McBratney и др., 2003), структурно-

функционального подхода к идентификации организации ландшафта (Беручашвилли 1997; Козловский, 2003; Мамай, 2004; Линник 2008; Сысуев, 2019; Nayashi, 2016), диагностической идентификации функционирования почв агроландшафтов (Зайдельман, 2001) и подходов к гидрологическому моделированию лесостепных ландшафтов (Pitman, 1991, Selles и др., 1997, Володин, Лыкосов 1998).

Объекты 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, полевые и лабораторные инструментальные измерения физических параметров почв, данные разработанной автором автоматизированной системы мониторинга влажности почвы и уровня грунтовых вод, численное физико-математическое моделирование гидрологического функционирования почв. Обработка и вычисления проводилась с использованием программных сред QGIS, ArcGIS, Agisoft Metashape, SAGA GIS, Python, R и Fortran.

Регион исследования, Окско-Донская низменность, охватывает большую часть Тамбовской, а также части Липецкой и Воронежской областей (рис. 1). Абсолютные высоты варьируют от 150 до 180 м. Междуречья перекрыты лессовидными суглинками мощностью 2–25 м, под которыми залегает морена (до 70 м). Рельеф в основном плоский, слабо расчленённый (эрозионные формы — до 6 % по площади). Поверхностный сток замедлен из-за выположенных водоразделов и западин, весной заполняющихся талой водой. Почвенный покров мозаичный. На междуречьях преобладают луговато-чернозёмные почвы, на дренированных участках — выщелоченные и типичные чернозёмы тяжелосуглинистого или легкоглинистого состава.



Рисунок 1. Топографические особенности и расположение Окско-Донской низменности

Водный режим почв Окско-Донской низменности определяется изменчивым климатом лесостепного экотона. Январские температуры варьируют от $-11,5^{\circ}\text{C}$ до -9°C , июльские — от $+19^{\circ}\text{C}$ до $+22^{\circ}\text{C}$. Снежный покров формируется в декабре и сохраняется в среднем 130 дней. Переход температуры через $+5^{\circ}\text{C}$ происходит в середине апреля, через $+15^{\circ}\text{C}$ — в конце мая. Климатические условия Окско-Донской низменности в 1936–2024 гг. характеризуются выраженным варьированием. По данным метеостанции г. Тамбов, на графике среднегодовых осадков (рис. 2) отчётливо проявляется 12,6-летний цикл, в пределах которого сумма осадков колеблется от 400 до 600 мм. В сочетании с поверхностным перераспределением влаги и изменяющимися границами водосборов западин количество поступающей влаги может различаться в 2–4 раза в рамках одних и тех же геоморфологических условий. Пик 88-летнего климатического цикла пришёлся на 1975–1990 гг. — период активных генетических исследований, когда было сформировано представление о широком распространении переувлажнённых почв агроландшафтов региона.

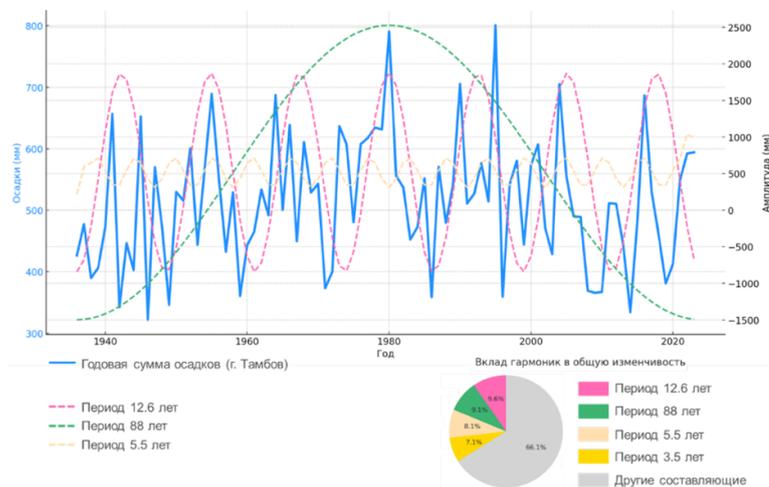


Рисунок 2. Динамика среднегодового количества осадков и частотные составляющие динамичности по данным метеостанции г. Тамбов

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 среднемноголетними 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 западных урочищ в перехвате и переводе поверхностного стока во внутripочвенный 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. Западные урочища в составе недренируемого типа местности лесостепи обеспечивают до 150 миллиметров дополнительного внутripочвенного стока, питающего грунтовые воды и зависящего от запасов воды в снеге, режима снеготаяния и гидрофизических условий инфильтрации влаги в почву.

3. Наличие западных 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, выполнении 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»

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность исследования, научная новизна и практическая значимость, сформулированы цель, задачи и положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы. В главе 1 рассмотрены подходы к изучению структурно-функциональной организации лесостепных ландшафтов и моделированию их гидрологического функционирования. В главе 2 охарактеризованы геолого-геоморфологические условия, климат, почвенный покров и морфологическая структура ландшафтов лесостепи. В главе 3 представлена схема взаимосвязи морфологической структуры ландшафтов с режимами поверхностного и внутрипочвенного стока, описаны методы постановки и параметризации краевых задач, а также средства прямой и косвенной верификации моделей. В главе 4 на основе моделирования в детальном масштабе оценён вклад западин в водный баланс междуречно-недренируемого типа местности. В 5 главе на бассейновом масштабе численно охарактеризовано влияние гидрологического функционирования междуречно-недренируемого типа местности на морфологическую структуру междуречий Окско-Донской

низменности. В 6 главе описана взаимосвязь пространственного распределения геометрии сельскохозяйственных полей с плотностью встречаемости западных урочищ. Заключение содержит основные выводы диссертационной работы.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Первое защищаемое положение (основано на результатах глав 1,3). *Сочетание результатов моделирования водного баланса с диагностическими показателями водного режима почв западин объясняет разнообразие морфологического строения почв возрастающего гидроморфизма лесостепи Окско-Донской низменности.*

Водный режим почв лесостепных ландшафтов Окско-Донской низменности отличается высокой изменчивостью, обусловленной взаимодействием климатических, гидрологических и морфологических факторов. Изучение и моделирование водного режима развивалось параллельно с классификацией почв лесостепи. К ранним работам по гидрофизике чернозёмов относятся труды Г.М. Тумина (1915), А.М. Панковой (1921). Лугово-чернозёмные почвы как самостоятельный тип впервые были выделены Н.Н. Розовым (1939), а осолодевшие почвы западин впервые описал Т.И. Попов (1914). Влияние климатических факторов на функционирование почв рассматривалось в рамках почвенно-климатического районирования Центрального Черноземья (П.Г. Адерихин, 1957). Связь водного режима с рельефом изучалась Е.М. Самойловой, И.В. Якушевской, Соловьёвым и др.

Концепцию структурно-функциональной организации лесостепи разработал Ф.Н. Мильков (1966), выделив типы местности: пойменный, надпойменно-террасовый, приречный, плакорный, междуречный недренированный и др. Впоследствии эти положения были адаптированы к условиям Окско-Донской низменности (Мильков и др., 1976). Несмотря на высокую теоретическую значимость моделей 1970–80-х годов, они оказались недостаточными для прогнозирования отклика ландшафтов на изменения климата. До сих пор слабо изучено функциональное значение почв западинного комплекса в поддержании водного режима, а также влияние климатической изменчивости на функционирование почв. Между тем климатические факторы определяют интенсивность испарения, инфильтрации, накопления и перераспределения влаги, что отражается на физико-химических свойствах почв и их морфогенезе. Инструментом уточнения представлений о генезисе и эволюции почв, а также адаптации агроландшафтов к изменениям климата может являться теоретическое гидрофизическое моделирование водного режима с использованием структурно-функционального анализа, предлагаемого ландшафтоведением.

Исследования такого рода на стыке генетического почвоведения, ландшафтоведения и гидрологии почв с применением физико-математического имитационного моделирования, проводятся в области канадских прерий (Prairie Pothole Region) на севере Великих

равнин, изобилующем западинами различного размера. Базируясь на результатах моделирования поверхностного и внутрипочвенного стока водосборных бассейнов для территорий западин прерий, проведена оценка изменения гидрологического режима при различных климатических сценариях и методах обработки почвы (Elliott 2001, Dumanski 2015, Ehsanzadeh 2015). Ландшафты прерий потхоллов можно считать физико-географическим аналогом лесостепных ландшафтов Окско-Донской низменности, которые, однако, формируются в условиях большего увлажнения. 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. 3).

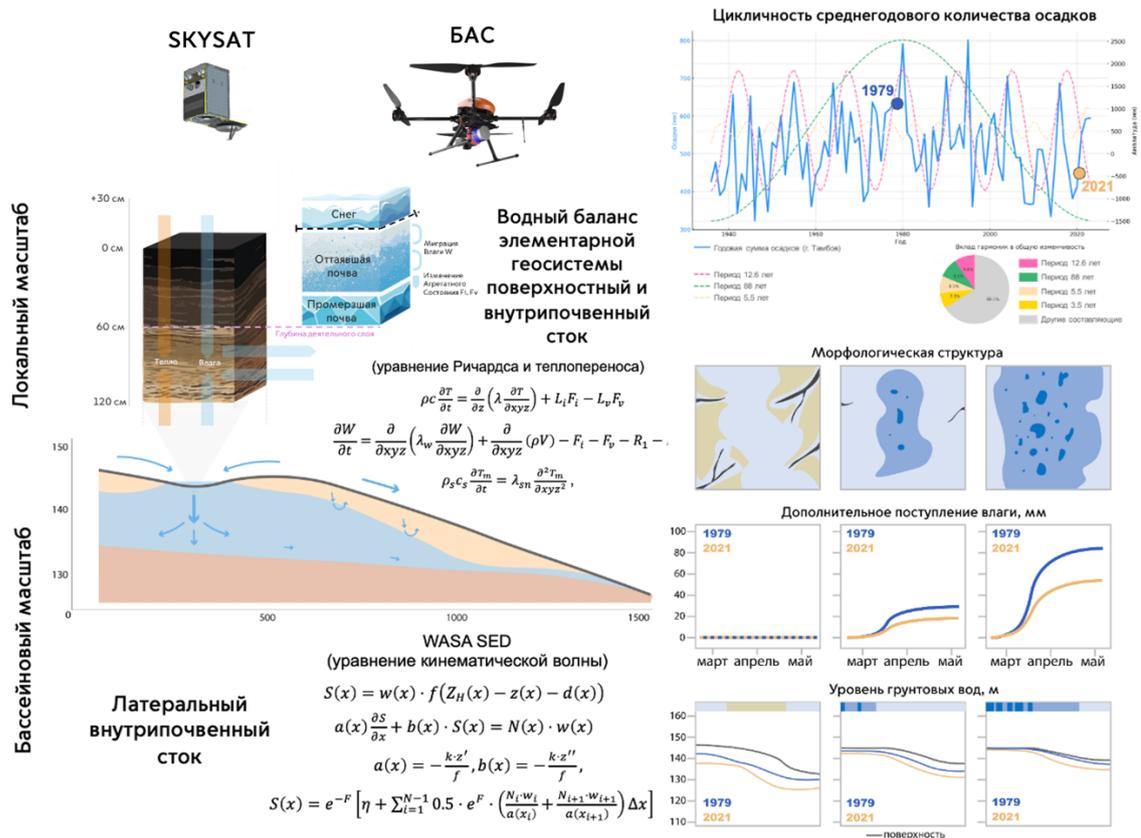


Рисунок 3. Схема описания взаимосвязи морфологической структуры ландшафтов Окско-Донской низменности с режимами их гидрологического функционирования

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 внутрпочвенного 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.

***Второе защищаемое положение** (основано на результатах главы 4). Западинные урочища в составе недренируемого типа местности лесостепи обеспечивают до 150 миллиметров дополнительного внутрпочвенного стока, питающего грунтовые воды и зависящего от запасов воды в снеге, режима снеготаяния и гидрофизических условий инфильтрации влаги в почву.*

Для выявления влияния западинных урочищ на гидрологическое функционирование почв недренируемого типа местности в пределах детального участка важнейшим этапом является постановка краевой задачи, в частности определение верхних граничных условий модели, связанных с особенностями перераспределения талых вод и формированием эфемерных водоемов в западинных урочищах. Был разработан алгоритм высокочастотного мониторинга уровня зеркала воды в западинах как дополнительного источника воды. В течение весны 2021 года для одного из междуречий проводились наблюдения с использованием трёх типов данных: цифровой модели рельефа (ЦМР) сверхвысокого разрешения (25 см), полученной с БАС DJI Mavic 2 Pro, БАС ортофотопланов высокого разрешения (25 см) и ежесуточных снимков спутников RapidEye и SkySat группировки PlanetLabs (3м) (рис. 3, 4).

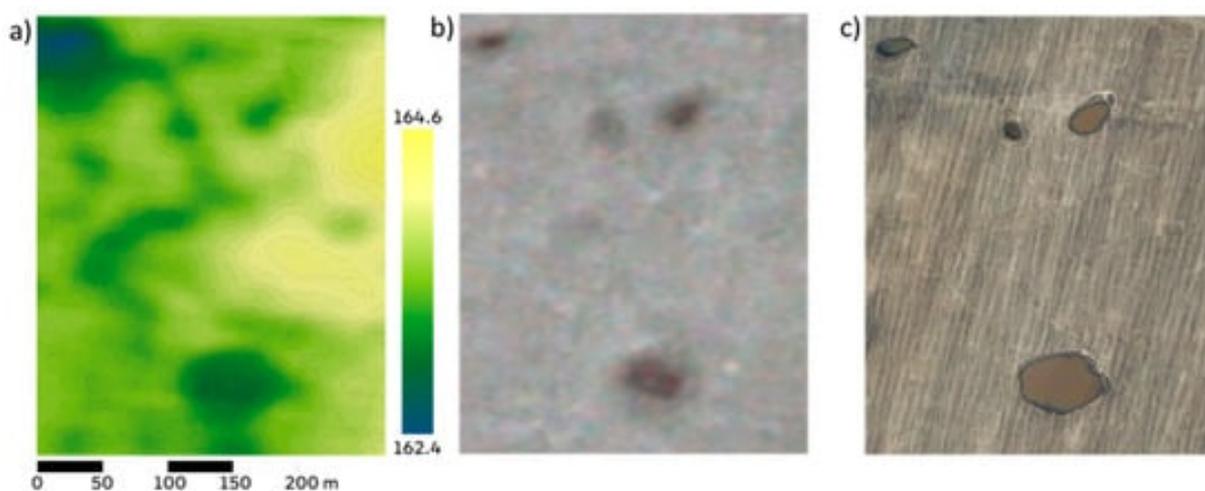


Рисунок 3. Источники пространственных данных. (а) ЦМР высокого разрешения, полученная фотограмметрически, с цветами, обозначающими высоты. (б) Цифровые изображения местности Planet Labs в видимом спектре с разрешением 3 м. (с) Цифровое изображение высокого разрешения, полученное с помощью БАС в видимом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

ЦМР создавалась методом стереофотограмметрии с точностью до 0,03 м. Снимки обрабатывались в Agisoft Metashape, затем очищалось облако точек для удаления объектов, не относящихся к рельефу. Маски растительности в ArcGIS Pro использовались для фильтрации. На основе очищенного облака точек создавалась ЦМР с разрешением 25 см с использованием кригинг-интерполяции. Классификация эфемерных водоёмов выполнялась с помощью объектно-ориентированной классификации в ArcGIS Pro на основе данных снимков БАС и спутников Planet Labs.

Алгоритм классификации включал следующие этапы: 1) ограничение анализируемого слоя кадастровыми границами с буфером 15 м для исключения посторонних объектов; 2) сегментация изображений методом среднего сдвига для объединения пикселей по спектральным характеристикам и классификация с использованием методов случайного леса (RF) и опорных векторов (SVM); 3) уточнение контуров водоёмов по данным ЦМР для исключения смешанных пикселей и расчёт объёмов воды с помощью инструмента Surface Volume в ArcGIS Pro. Для расчёта испарения использовалось уравнение Пенмана с учётом температуры, солнечной радиации, влажности и скорости ветра.

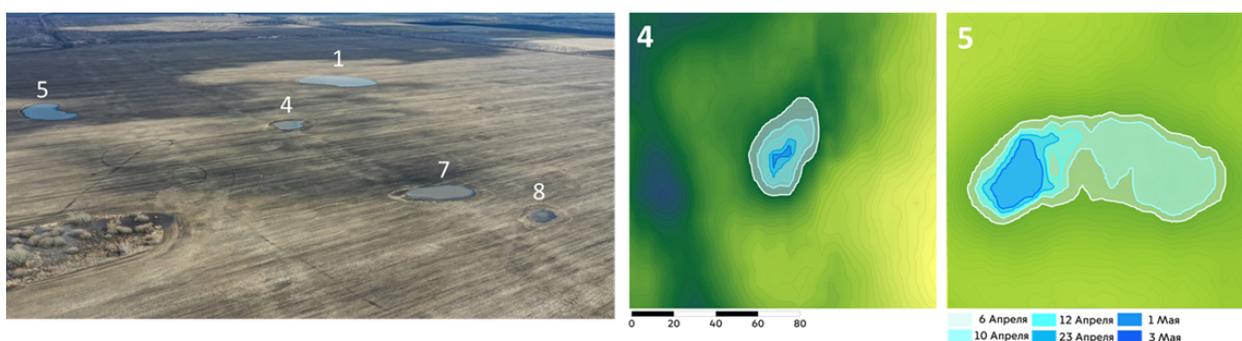


Рисунок 4. Изменчивость уровня воды для некоторых западин (верхние граничные условия)

Предложенный подход определения верхних граничных условий, сочетающий объектно-ориентированную классификацию временных рядов снимков группировки Planet Labs и ортомозаики, полученной с БАС для верификации спутниковых данных, обеспечил высокую точность идентификации площадей водного зеркала в западинах в процессе их инфильтрации (каппа Коэна = 0,99). А высокоточная ЦМР, созданная по материалам съемки БАС, позволила выполнить расчет динамики объема воды в западинах в течение времени (рис. 5).

Для верификации метода постановки верхних граничных условий для сцены, полученной 21 апреля 2021 г., было выполнено сравнение границ водного зеркала с границами, полученными по материалам БАС, было проверено два метода классификации на основе пикселей: случайный лес (RF) и метод опорных векторов (SVM). Границы водоемов были уточнены до медианного значения цифровой модели рельефа на протяжении границ для формирования векторных полигонов.

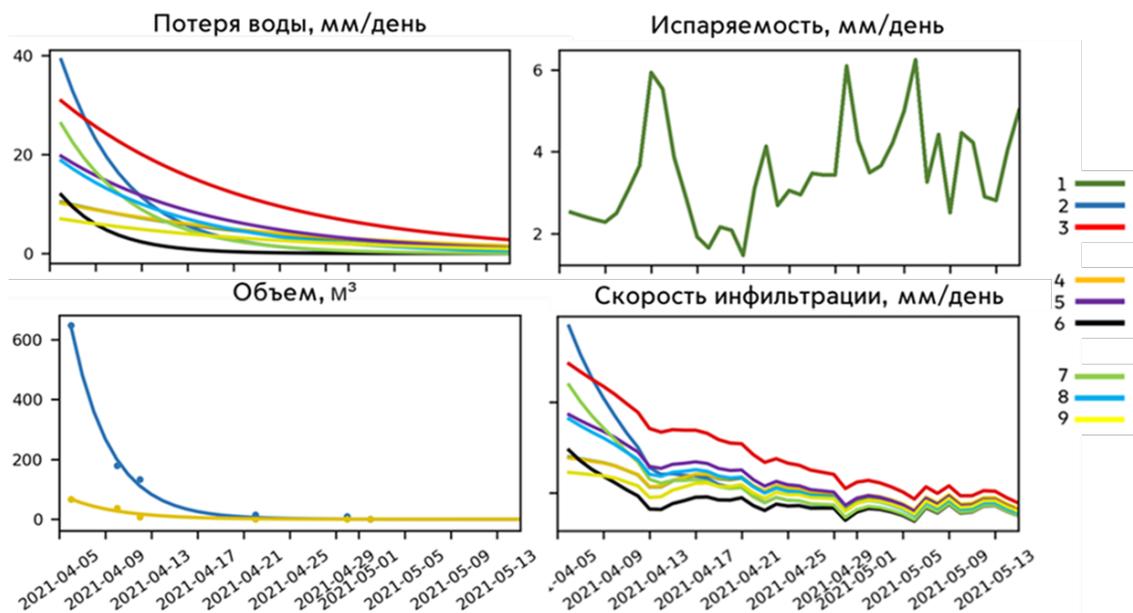


Рисунок 5. Изменчивость поступления воды и скорости инфильтрации в западинах ключевого участка

Для метода опорных векторов характерна минимальная величина ошибок RMSE (2.1%) и MAPE (5.1%). Процесс дренирования воды в западинах подчиняется экспоненциальному уравнению, с более высокой скоростью уменьшения объема воды в начале снеготаяния. Вода фильтруется в почву, что подтверждает гипотезу о западинно-ориентированной инфильтрации. Были выделены две фазы инфильтрации: быстрая и медленная. Установлено, что вода может переливаться из западины в западину, и вероятность перелива зависит от высоты самой низкой точки водосбора. В связи с отсутствием данных группировки спутников Planet Labs до 2017 года была составлена, учитывающая возможности перелива, регрессионная модель, позволяющая связать объем воды в западине с площадью водосбора,

количеством накопленного снега перед снеготаянием и глубиной промерзания почвы по архивным материалам метеонаблюдений в промежуток с 1960-2023 г., $R^2=0.76$

Учитывая особенности вклада западных урочищ в гидрологическое функционирование ключевого участка, через постановку верхних граничных условий для моделирования водного режима в масштабе детального участка был использован подход, базируемый на решении уравнения Ричардса. Уравнение Ричардса является результатом применения закона Дарси (для потока воды) и уравнения непрерывности (для баланса массы), дополненных эмпирическими зависимостями Ван Генухтена.

Уравнения были реализованы в программном коде Fortran, базируемом на «Модели деятельного слоя Земли» [Володин, Лыкосов, 1998] для одномерного потока с включением элементов латеральной миграции и учетом смены фаз агрегатного состояния воды.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial xyz} \right) + L_i F_i - L_v F_v \quad (1)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial xyz} \left(\lambda_w \frac{\partial W}{\partial xyz} \right) + \frac{\partial}{\partial xyz} (\rho V) - F_i - F_v - R_1 - R_2 \quad (2)$$

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_m}{\partial t} = \lambda_{sn} \frac{\partial^2 T_m}{\partial xyz^2}, \quad (3)$$

где: $\frac{\partial I}{\partial t} = F_i$; p - 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; p - плотность снега (кг/м³); c - теплоёмкость снега (Дж/кг-К); T_m - температура снега (°C); A_{sn} - коэффициент теплопроводности снега (Вт/м-К).

Пространственная параметризация коэффициента фильтрации была выполнена двумя методами: измерением скорости убывания влаги в западинах для оценки фильтрации в естественных условиях и полевыми измерениями с методом заливных площадей для более точной оценки. На основе томографической съёмки почвенных монолитов и методов машинного обучения определена объёмная пористость (от 43% в пахотном горизонте до 17% в нижних слоях почвы). Эти данные позволили описать распределение пористости по профилю. Параметризация гидрофизических характеристик была выполнена с использованием данных ROSETTA 3 и лабораторных анализов. Для учёта верхних граничных условий использованы данные Европейского Центра среднесрочных прогнозов погоды ECMWF (1936–2023). Модель была реализована на Fortran, и данные о физических параметрах распространялись по участку с использованием цифровой почвенной картографии. Запасы влаги рассчитывались для каждой ячейки с разрешением 10 см и временным шагом 1 ч за 1936–2023 годы.

Для верификации моделей разработана система автоматизированного мониторинга грунтовых вод и влажности почвы, включающая FDR-сенсоры (Frequency Domain Reflectometry) для измерения влажности и температуры почвы. Сенсоры работают на основе изменения частоты электромагнитного импульса, зависящего от диэлектрических свойств среды, определяемых содержанием влаги. Система оснащена интернет-логгером с GSM-модемом для передачи данных. Данные сохраняются в памяти логгера и отправляются на сервер. Помимо автоматизированного измерения динамика влажности почвы также измерялась в шести полевых экспедициях весной 2021 года на 16 точках и 4 глубинах.

Применяемые методы в пределах детального ключевого участка позволили выявить, что заполняемость западин водой весной не всегда свидетельствует об избытке воды в почве, так как наличие или отсутствие промёрзших почвенных горизонтов способствует кардинально различающемуся гидрологическому функционированию почв междуречно недренируемого типа местности от года к году. В случае отсутствия промёрзшего слоя во время снеготаяния практически отсутствует поверхностный сток, вся инфильтрация талых вод приходится на первую фазу ненасыщенного потока, и вода впитывается в почву. В большинстве этих лет западины не наполняются водой, не учитывая годы с избыточным накоплением снега, когда до завершения снеготаяния верхние горизонты почвы успевают насытиться влагой. С насыщением почвы влагой скорость фильтрации значительно падает, как показано на рисунке 8. Анализ метеорологических данных показал, что западины не переполнялись во время снеготаяния в среднем в 60% случаев с 2005 по 2021 г., Частота перелива была самой низкой для западин 2 и 4 (~ 20%) и самой высокой для западины 9 (90%).

Для моделирования влажности почвы и уровня грунтовых вод необходимо было выполнить интерполяцию значений физических параметров почв, полученных в точках, на площадь всего ключевого участка (рис.6). 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 следующие параметры: относительное положение на склоне и топографический индекс влажности (всего почвенных описаний – 13, из них 3 – с измеренными физическими параметрами, точность модели 69%). Для верификации расчетных значений были использованы материалы мониторинга влажности почвы в 5 точках весной 2021 года с отбором и сушкой образцов, и для 3 точек в течение осени 2021 и весны 2022 года по данным систем автоматизированного мониторинга влажности почвы и уровня грунтовых

вод. Анализ 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 неучитываемым в модели поднятием влаги под фронтом промерзания почвы, и уровнем грунтовых вод (МАРЕ 7.19%) (рис 8). Достаточная точность модельных расчетов позволила в качестве верхних граничных условий использовать данные о погоде и дополнительном поступлении влаги из западин с 1936 по 2023 годы с дискретизацией в 1 час и выполнить расчет запасов влаги за весь исследуемый период.

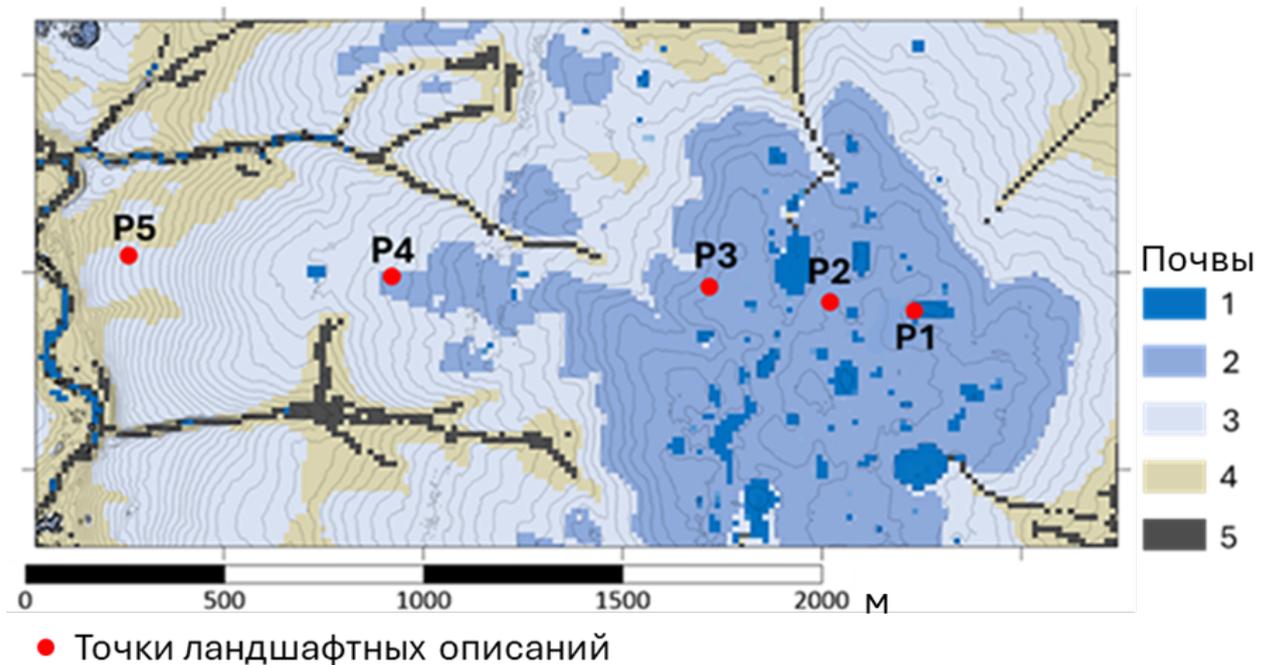


Рисунок 6. Рельеф и цифровая модель почвенного покрова ключевого участка. Красными точками обозначены места проведения ландшафтных описаний (P1–P5). Почвы: 1 - влажнолуговая осолодевшая, 2 - лугово-черноземная, 3 – луговато-черноземная, 4 - комплекс слабосмытых типичных и выщелоченных черноземов, 5 – лугово-черноземные почвы эрозионной сети

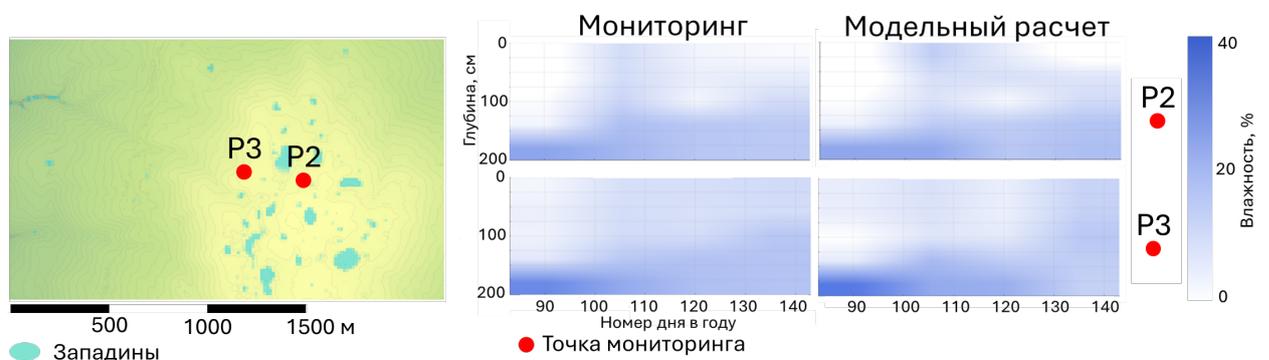


Рисунок 7. Справа: хроноизоплеты запасов влаги, расчётные и фактические значения. Слева: положение точек на цифровой модели рельефа участка
 Далее для трёх точек в пределах междуречья (влажнолуговой осолодевшей почвы в западине, лугово-чернозёмной в межзападинном пространстве и луговато-чернозёмной на

склоне) были сопоставлены морфологические особенности почвенного профиля 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 табл. 1 представлены данные полевого определения обилия и размера железомарганцевых конкреций.

Таблица 1. Обилие и размер железомарганцевых конкреций в почвах ключевого участка

ID	Почва	Горизонт	Верхняя граница	Нижняя граница	Общее содержание	Размер, мм
P1	Влажнолуговая осолодевшая	A ₂ g ^{''}	23	36	Много	0.2-0.5
P1	Влажнолуговая осолодевшая	B ₁ sog ^{'''}	36	56	Много	>0.5
P1	Влажнолуговая осолодевшая	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 1936 по 2023 годы почвы между речно недренируемого и замедленно дренируемого типов местности имели различный гидрологический отклик на сезонные и межгодовые циклы климата лесостепи. Для корнеобитаемого слоя влажно-луговой осолодевшей 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 осолодевшей 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 осолодевшая 10 лет 120 дней, лугово-черноземная 7.5 лет 56 дней, луговато-черноземная 5.4 лет 30 дней. Динамика связи обилия и размера железомарганцевых конкреций с длительностью застойных явлений (рис. 8) объясняет отсутствие условий формирования железомарганцевых конкреций по данным мониторинга в 2021 и 2022 годах. Их наличие в почвенном профиле связано с формированием в другие наиболее увлажненные годы динамичного климата лесостепи.

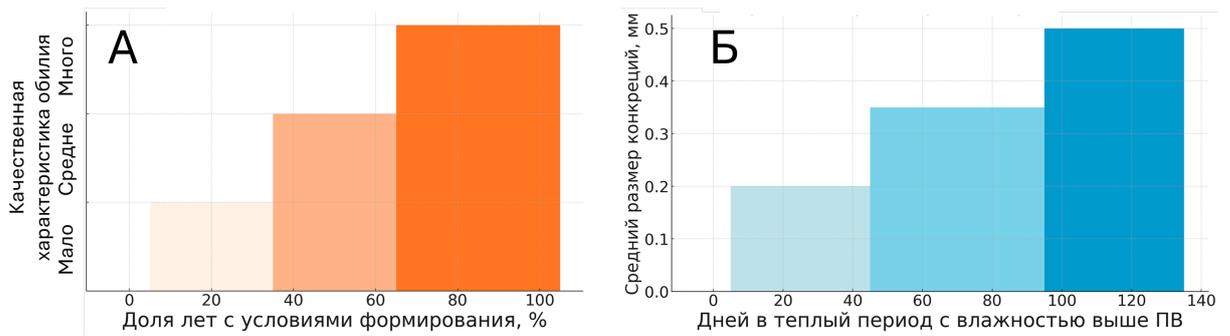


Рисунок 8. Динамика связи обилия и размера железомарганцевых конкреций с длительностью застойных явлений по материалам моделирования. А – взаимосвязь обилия конкреций в профиле с частотой повторяемости лет с застойными явлениями. Б - взаимосвязь размера конкреций в почвенном профиле с длительностью застойных явлений

Третье защищаемое положение (основано на результатах главы 5). *Наличие западных 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.*

Для анализа особенностей вклада западных урочищ, расположенных в пределах недренируемого типа местности на водный режим всего междуречья, предложен алгоритм моделирования равновесного уровня грунтовых (УГВ) вод для ключевых участков в рамках бассейнового масштаба. Использовалась модель кинематической волны с преимуществом аналитического и полуаналитического решения, представленного в работе Fan and Bras (1998) и расширенная модель 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 поверхностного 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 топосеквенциях было основано на решении функции ёмкости влагозапаса в почве $S(x)$, определяемой следующим образом:

$$S(x) = w(x) \cdot f(Z_H(x) - z(x) - d(x)), \quad (4)$$

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

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

$$a(x) \frac{\partial S}{\partial x} + b(x) \cdot S(x) = N(x) \cdot w(x) \quad (5)$$

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

где: k — гидравлическая проводимость, z' , z'' — первая и вторая производные глубины

морены, $N(x)$ — пополнение грунтовых вод. Полуаналитическое решение системы уравнений имеет вид:

$$S(x) = e^{-F} \left[\eta + \sum_{i=1}^{N-1} 0.5 \cdot e^F \cdot \left(\frac{N_i \cdot w_i}{a(x_i)} + \frac{N_{i+1} \cdot w_{i+1}}{a(x_{i+1})} \right) \Delta x \right] \quad (6)$$

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

Параметризация модели выполнялась для двух водосборов (Самовецкий и Избердей). Было использовано описание 141 точки почвенных профилей и буровых скважин до уровня грунтовых вод или морены, выполненных автором в полевых условиях и собранных по материалам крупномасштабных колхозных почвенных карт (рис.9).

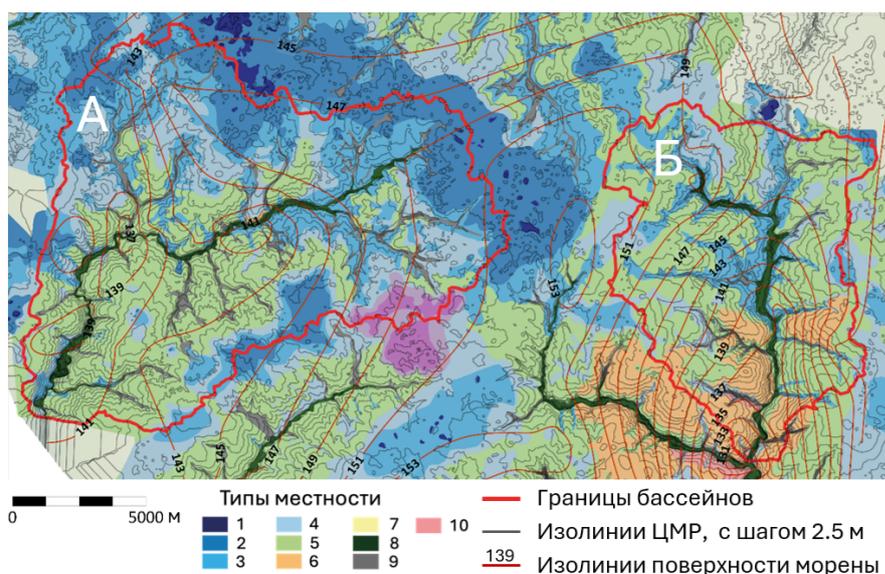


Рисунок 9. Расположение ключевых участков бассейнового масштаба на карте типов местности. Где: 1-4 варианты недренируемого типа местности (по уменьшению плотности западин), 5 - замедлено-дренируемый, 6 – плакорный, 7 – террасовый, 8 – пойменный, 9 – овражно-балочная сеть, 10 – склоновый. А – бассейн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

Для решения уравнений (1) - (3) необходимо свернуть 3-мерное факторное пространство в 1.5-мерное. Для этого нужно дискретизировать входные ЦМР сначала в двумерные топопоследовательности (двумерные катены). Топопоследовательность - аналог понятия почвенно-геохимической катены (Касимов, 2000), но в ограниченном смысле формализации поверхности рельефа для модельных расчетов поверхностного стока вдоль линий тока. Был использован программный пакет lumpR в среде R, который позволил иерархически разделить бассейны на катены и классифицировать их по морфологии склонов, используя многоуровневую схему: от бассейнов (уровень 1) и суббассейнов (уровень 2) до элементарных склонов (уровень 3), репрезентативных катен (уровень 4) и участков, отражающих почвенную неоднородность внутри групп земель (уровень 5). Дискретизация ЦМР была выполнена для водосборов Самовец и Избердей. Порядок водотоков Хортон для разграничения суббассейнов установлен равным 3. При этом длина катен варьировала от 2500 до 4500 м, что позволило разделить Избердей на 18, а Самовец — на 29 элементарных 1,5-мерных

катен. В классификационном алгоритме выделено три класса профильной кривизны склона и два типа почв, всего шесть классов катен (рис. 10). На водосборе Избердей встречаются топопоследовательности 1–3 классов, на Самовце — все шесть. Типичные катены обоих водосборов характеризуются полугидроморфными и слабо переувлажнёнными участками; в Самовце также отмечены средне переувлажнённые и недренируемые, в Избердее — плакорные и пойменные. Катена 1 на Избердее — наиболее дренированная, с преобладанием плакорных участков. К середине катены она переходит в полугидроморфную зону из-за увеличения доли луговато-чернозёмных почв. Катены 2 и 3 менее дренируемы вследствие большей выположенности: катена 2 включает слабо переувлажнённые и пойменные участки, в катене 3 — преобладает полугидроморфная зона. Затем для каждой из полученных катен был выполнен расчет уровня грунтовых вод.

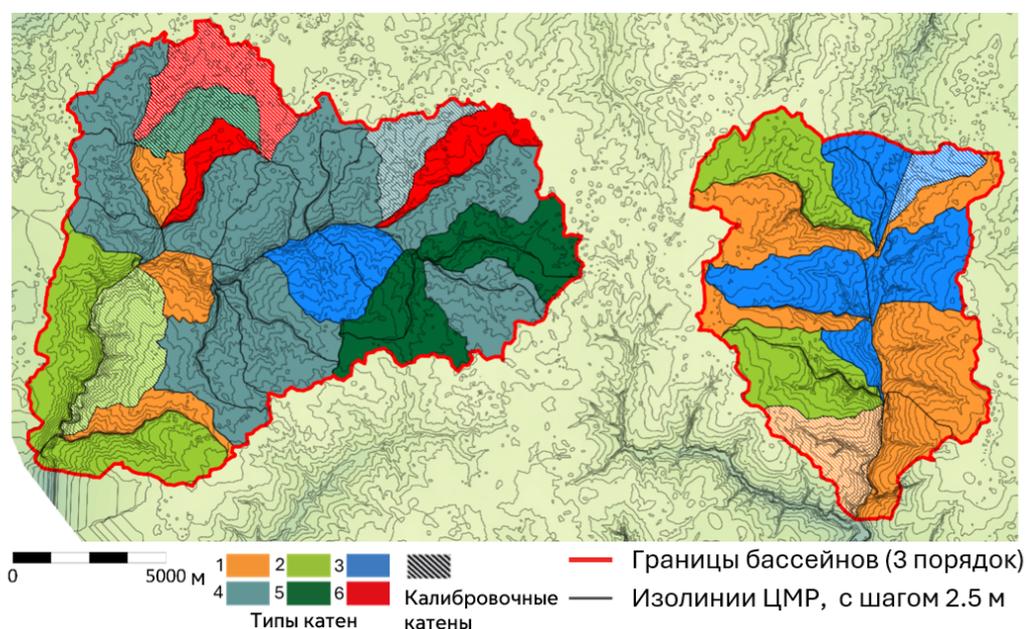


Рисунок 10. Результат автоматической дискретизации пространства алгоритмом LUMP для формализации модельных расчетов. Типы формализованных топопоследовательностей (катен) водосборов 2 порядка: 1- хорошо дренируемые, 2- умеренно дренируемые, 3 – слабодренируемые, 4 – плоские переувлажненные, 5 – плоские сильно-переувлажненные, 6 – плоские западинные.

Гидрологическое моделирование выполнялось на уровне репрезентативных топопоследовательностей (уровень 4), где уравнения потока применялись для описания поверхностного и подповерхностного стока. Вертикальные процессы, включая инфильтрацию, задавались распределёнными параметрами, соответствующими почвам представленных групп земель (уровень 5). Сведение площадных топопоследовательностей к одномерным (1,5D) проведено на основе алгоритма Кокрана и Фланагана (2003).

Для параметризации модели уровня грунтовых вод (УГВ) использовались четыре ключевых параметра: N (поток пополнения грунтовых вод), f (порозность), k (гидравлическая проводимость) и n (кривизна профиля). Кроме того, важной переменной являлась

разница отметок поверхности (Z_H) и морены (z), которые для каждой точки профиля рассчитывались с использованием программного комплекса lumpR.

Для калибровки модели использовалось безразмерное отношение N/k , которое подбиралось по приведенному ниже алгоритму. Сначала определялся диапазон возможных значений N/k - от минимального до максимального. Затем проводился отбор значений, обеспечивающих минимально допустимую точность (0,7). После этого точность увеличивалась поэтапно, с экспертной корректировкой, пока количество удовлетворительных решений не снижалось до приемлемого уровня. Диапазон установившегося УГВ для почв уточнялся на основании многолетних исследований и полевых описаний, при этом учитывались неопределённости, связанные с субъективной оценкой почвенных карт и данных. Для проверки возможности экстраполяции параметров на топопоследовательности с аналогичной морфологией в условиях ограниченной информации был проведён слепой тест. Параметры, скорректированные для топопоследовательностей Самовецкого водосбора, переносились на Избердейский водосбор и наоборот. Моделирование УГВ проводилось для шести типов топопоследовательностей (рис. 11). Для двух типов точность составила 95%, для двух других — 90–93%, а для оставшихся — 80% и 75%. Основные факторы, влияющие на УГВ — рельеф и глубина водоупора (морены). На более выположенных плоских топопоследовательностях уровень грунтовых вод выше, а на участках с дифференцированным рельефом водоносные горизонты находятся глубже. Длина топопоследовательности не оказывала влияния на УГВ. Результаты расчетов подтверждаются данными автоматизированного мониторинга УГВ (табл. 2).

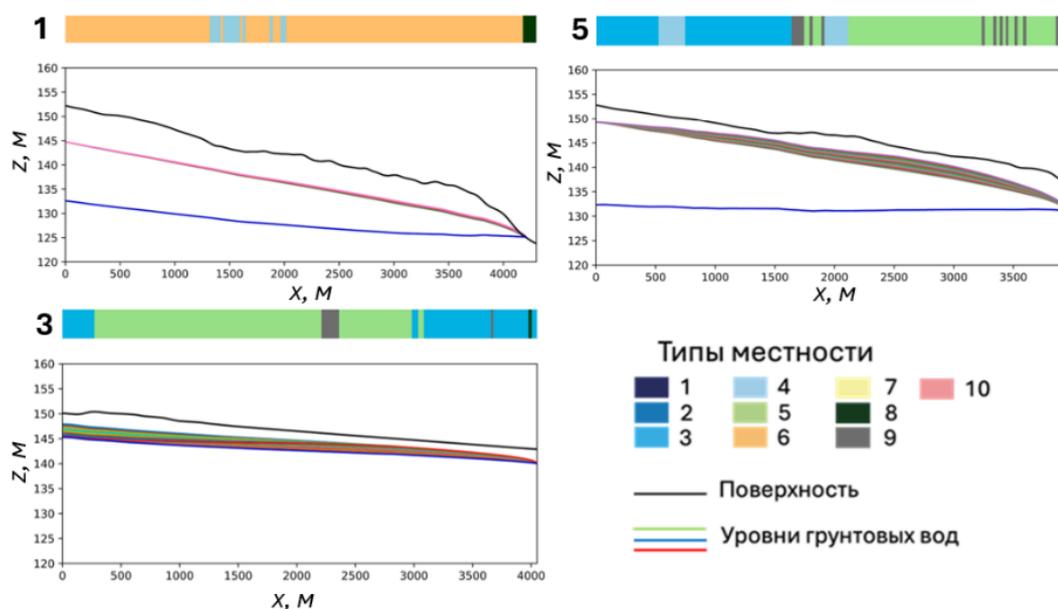


Рисунок 11. Расчетные профили уровня грунтовых вод для катен № 1,3,5. Где: 1-4 варианты недренлируемого типа местности (по уменьшению плотности западин), 5 - замедлено-дренируемый, 6 – плакорный, 7 – террасовый, 8 – пойменный, 9 – овражно-балочная сеть, 10 – склоновый. А – бассейн руч. Самовец, Б – бассейн руч. Избердей.

Таблица 2. Среднегодовое значение уровня грунтовых вод различных типов местностей

Участок типа местности	Диапазон УГВ, м	
	Модель	Мониторинг
Междуречно недренируемый	0.8-3.0	0.5-5
Замедленно дренируемый	1.5-3.0	2.0-6.0
Плакорный	3.0-6.0	3.0-7.0
Склоновый	5.0-10.0	>5

Однако расчеты показывают значительную хронологическую изменчивость количественных значений этого процесса, связанного с особенностями динамичности климата лесостепи. Данные о дополнительном поступлении воды через западины были использованы для уточнения параметризации модели уровня грунтовых вод для топопоследовательности № 5 (рис. 12)

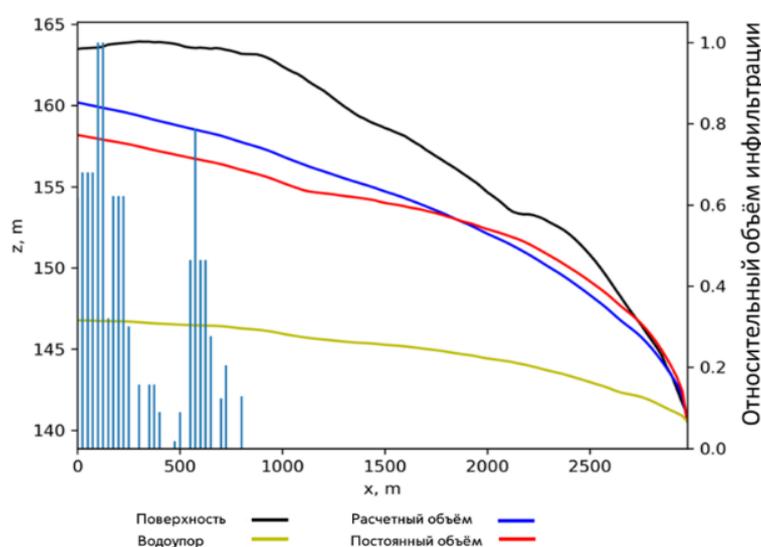


Рисунок 12. Сечение катены № 5 с глубиной залегания грунтовых вод: синяя линия - расчетный УГВ с учетом дополнительного поступления влаги из западин, красная – без учета.

Моделирование УГВ с постоянной и пространственно-изменяющейся скоростью пополнения вод вдоль топопоследовательности с учетом и без учета дополнительного поступления воды подтвердило представление о западинах как об источнике подпитывания грунтовых вод в условиях замедленно-дренируемых типов местности Окско-Донской низменности.

Четвертое защищаемое положение (основано на результатах главы 6). *Пространственно-временная дифференциация водных режимов почв агроландшафтов определяет геометрическое разнообразие производственных участков. Степень изрезанности, изменчивость и неоднородность гидрологических условий усложняет формирование севооборотов, пространственное размещение культур, выбор технологических мероприятий.*

Создана цифровая модель землепользования Петровского района с векторным слоем границ пашни (рис 13А). С помощью инструмента «Closed Depressions» в RSAGA и ЦМР с разрешением 10 м/пиксель была построена карта замкнутых понижений. Ошибочные

объекты (реки, пруды) были исключены расчётом дистанции до водотоков и пороговым значением. Далее, с использованием ArcPy и инструмента «Create Fishnet» построена регулярная сетка с разрешением 100 м, и для каждого элемента сетки вычислено долевое участие пикселей, относящихся к западинам, что позволило создать карту их распределения:

$$q = \frac{p^2}{S}, \quad (7)$$

где q — мера квадратности, p — периметр, S — площадь. Чем ближе квадрат периметра к площади, тем удобнее поле для сельхозтехники. Неровность границ полей в Окско-Донской низменности обусловлена распространением западин на междуречьях. Совмещение модели плотности западин и меры квадратности полей позволило получить карту типов геометрии полей в зависимости от плотности западин. (рис. 13, Б). Наиболее крупные и удобные поля расположены на хорошо дренируемых участках (зелёный цвет), а наиболее изрезанные поля (красный) приурочены к западинным урочищам. Таким образом, ландшафтная структура существенно влияет на организацию хозяйственной деятельности, определяя эффективность агротехнологий и возможность применения методов точного земледелия.

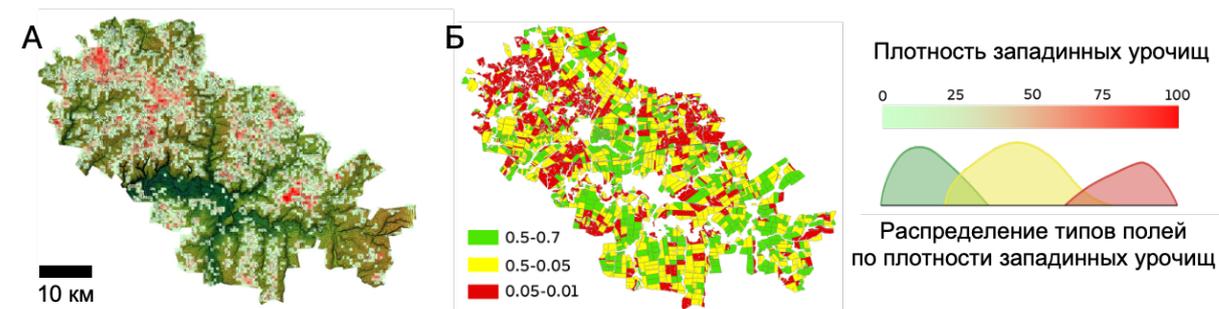


Рисунок 13. Долевое участие западинных урочищ (%) в ландшафте (А). Цифровая модель правильности геометрии возделываемых полей (Б). Справа – диаграмма распределение типов геометрии полей в пространстве плотности западин.

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 западного 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 западного 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 западном 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 западных урочищ (более 80%) возделываемые поля приобретают значительно более сложную и изрезанную форму. В то же время на более дренируемых участках, где плотность западных урочищ составляет менее 20%, поля имеют геометрию, максимально приближенную к квадратной. Поля со сложной геометрией, окруженные западными урочищами, так же характеризуются неоднородностью условий.

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, индексируемых в базах данных Scopus, Web of Science, RSCI:

1. Yurova A.Y., Smirnova M.A., Lozbenev N.I., **Fil P.P.**, Kozlov D.N. Using soil hydro-morphy degree for adjusting steady-state water table simulations along catenas in semiarid Russia // CATENA. – 2021. – Vol. 199. – P.105109. (JCI = 1,47; 0.292 п.л.; вклад автора 22%).

2. **Fil P.P.**, Yurova A.Y., Dobrokhotov A., Kozlov D.N. Estimation of infiltration volumes and rates in seasonally water-filled topographic depressions based on remote-sensing time series // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – P.7403. (JCI = 0,87; 1.483 п.л.; вклад автора 77%).

3. 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. (Импакт-фактор РИНЦ 3,017; 1,605 п.л.; вклад автора 36%).

Smirnova M.A., Bardashov D.R., **Fil P.P.**, Lozbenev N.I., Dobrokhotov A.V. Seasonal and multi-year dynamics of soil moisture in Gleyic Chernozems (the Oka–Don Lowland) // Eurasian Soil Science. – 2024. – Vol. 57. – P. 1601–1615. (JCI = 0,3; 1.605 п.л.; вклад автора 36%).

Иные публикации автора по теме диссертации

1. Столбовой В.С., Гребенников А.М., Оглезнев А.К., Иванов А.Л., Ильин Л.И., Колесникова Л.Г., Петросян Р.Д., Шилов П.М., **Филь П.П.**, Корчагин А.А. Реестр индикаторов качества почв сельскохозяйственных угодий Российской Федерации. Версия 1.0 // Монография. – М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2021. – 260 с. – ISBN 978-5-6046374-0. (Нет импакт-фактора; 16.25 п.л.; вклад автора 10%).

2. Бардашов Д.Р., Смирнова М.А., Лозбенев Н.И., **Филь П.П.** Многолетняя динамика и индикаторы гидроморфизма полугидроморфных почв западных комплексов Тамбовской лесостепи // Почвы и окружающая среда. – 2023. – С. 442–445. (Нет импакт-фактора; 0.3 п.л.; вклад автора 15%).