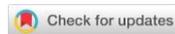


УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2025-122-127-173



Ссылки для цитирования:

Шилов П.М., Анциферова О.А. Диагностика гидрологических особенностей почв Самбийской равнины на основе аэрофотосъемки и индуктивного электромагнитного профилирования // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 122. С. 127-173.
DOI: 10.19047/0136-1694-2025-122-127-173

Cite this article as:

Shilov P.M., Antsiferova O.A., Diagnostics of hydrological properties of soils of the Sambian plains based on aerial photography and electromagnetic induction, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 122, pp. 127-173, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-122-127-173

Благодарность:

Авторы хотя бы выразить благодарность руководству Агрохолдинга “ДолговАгро” за предоставленную возможность проведения полевых исследований на производственном пахотном поле. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-29-05277 мк “Цифровой структурно-функциональной анализ ландшафта в системе адаптивно-ландшафтного земледелия”.

Acknowledgments:

The authors would like to express their gratitude to the management of Agroholding “DolgovAgro” for the opportunity to conduct field research on the production arable field. The work was supported by RFBR grant 19-29-05277 мк “Digital structural and functional analysis of landscape in the system of adaptive-landscape farming”.

Диагностика гидрологических особенностей почв Самбийской равнины на основе аэрофотосъемки и индуктивного электромагнитного профилирования

© 2025 г. П. М. Шилов^{1*}, О. А. Анциферова^{2**}

¹ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,

*<https://orcid.org/0000-0003-4113-6396>, e-mail: shilov_pm@esoil.ru.

²ФГОУ ВО “Калининградский государственный
технический университет”, Россия,

236022, Калининград, Советский проспект, 1,

**<https://orcid.org/0000-0001-5389-72437243>, e-mail: anciferova@inbox.ru.

Поступила в редакцию 24.05.2024, после доработки 16.07.2024,
принята к публикации 18.02.2025

Резюме: Статья посвящена изучению влияния пространственной неоднородности литолого-геоморфологических условий на гидрологические характеристики почв Самбийской равнины при помощи методов аэрофотосъемки и индукционного электромагнитного профилирования. В 2020–2022 гг. на тестовом участке “Перелески” проведены съемка рельефа с использованием БАС, выполнена диагностика пестроты почвообразующих пород и полевые измерения гранулометрического состава, влажности и степени оглеения в опорных почвенных разрезах ($n = 4$), описание морфологии почвенных горизонтов и степени оглеения дополнительных точек описания ($n = 18$). На основе метода индукционного электромагнитного профилирования аппаратурой EM38-МК2 установлена достоверная связь между содержанием илистой фракции и электропроводностью в почвенном профиле ($R^2 = 0.88$). Многомерное шкалирование позволило ранжировать все почвенные описания на тестовом участке по степени оглеения, обеспечив количественную оценку глубины и длительности застойного переувлажнения почв. Морфометрические характеристики рельефа и величина электропроводности в слоях 0–0.375 м, 0–0.75 м и 0–1.5 м были сопоставлены с расчетным показателем интенсивности оглеения почв. При помощи регрессионного анализа получена зависимость, которая описывает 81% изменчивости оглеения почв в зависимости от двух факторов: электропроводности в слое 0–1.5 м и топографического индекса превышений в окрестности 10 м. В результате почвы были упорядочены по совокупности характеристик в ряду с возрастающей интенсивностью оглеения профиля: буроземы сильноглееватые – дерново-подзолистые глеевые – дерново-глеевые, связанном с различием их среднемноголетнего водного режима. Выявленная пестрота микро- и мезорельефа, высокая вариабельность состава почвообразующих пород привела к чередованию указанных почв в виде почвенных микро мозаик, которые указывают на внутриполевую пестроту агроэкологических условий участка.

Ключевые слова: водный режим почв; гидроморфизм; геофизическое профилирование; цифровое почвенное картографирование.

Diagnosics of hydrological properties of soils of the Sambian plains based on aerial photography and electromagnetic induction

© 2025 P. M. Shilov^{1*}, O. A. Antsiferova^{2**}

¹*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0003-4113-6396>, e-mail: shilov_pm@esoil.ru.*

²*Kaliningrad State Technical University,
1 Sovetsky Prospekt, Kaliningrad 236022, Russian Federation,
^{**}<https://orcid.org/0000-0001-5389-72437243>, e-mail: antsiferova@inbox.ru.*

Received 24.05.2024, Revised 16.07.2024, Accepted 18.02.2025

Abstract: The article focuses on studying the influence of the spatial heterogeneity of lithological and geomorphological conditions on the hydrological characteristics of the soils of the Sambian Plain using aerial photography and electromagnetic induction methods. From 2020 to 2022, at the “Pereleski” test site, topographic surveys were conducted using UAV, soil-forming material heterogeneity was diagnosed, and field measurements of particle size distribution, moisture content, and the degree of gleyization were carried out in reference soil profiles ($n = 4$). Additionally, the morphology of soil horizons and the degree of gleyization in additional sampling points ($n = 18$) were described. The method of electromagnetic induction profiling using the EM38-MK2 established a reliable strong correlation between silt content and apparent soil electrical conductivity ($R^2 = 0.88$). Multidimensional scaling enabled the ranking of all soil descriptions at the test site by the degree of gleyization, providing a quantitative assessment of the depth and duration of waterlogging in soil profile. Morphometric characteristics and electrical conductivity in the layers of 0–0.375 m; 0–0.75 m; and 0–1.5 m were compared with the calculated gleyization intensity index of soils. Linear regression analysis revealed a relationship that explains 81% of the variability in soil gleyization based on two factors: electrical conductivity in the 0–1.5 m layer and the topographical positional index within a 10 m radius. Consequently, soils were ranked according to the combined characteristics in a sequence of increasing gleyization intensity: Endogleyic Cambisols – Gleyic Albeluvisols– Haplic Gleysols, linked to the differences in their long-term average water regimes. The identified heterogeneity of micro- and mesorelief and the high variability of the soil-forming materials resulted in the alternation

of these soils in the form of soil micro-mosaics, indicating the intra-field heterogeneity of the agroecological conditions of the test site.

Keywords: soil water regime; hydromorphism; geophysical sensing; digital soil mapping.

ВВЕДЕНИЕ

Диагностика водного режима почв имеет фундаментальное и прикладное значение. Фундаментальная потребность изучения водного режима почв определяется недостаточным пониманием механизмов влияния факторно-генетических условий почвообразования на пространственно-временную динамику влажности. Выявление этих механизмов стимулирует прикладные исследования, направленные на разработку методов эффективного управления водным режимом и создание агротехнологий, адаптированных к различным условиям влагообеспеченности почв (Зайдельман, 2003; Кирейчева, 2023; Bughici et al, 2022). В методическом плане оба направления исследований водного режима основаны на почвенно-гидрологическом мониторинге (Роде, 1969). Традиционный почвенно-гидрологический мониторинг представляет собой регулярные наблюдения послойного содержания влаги в почвах на стационарных площадках, охватывающие сезоны и годы с различными условиями влагообеспеченности. Сбор данных организуется в нескольких характерных элементах агроландшафта для объяснения взаимосвязи между условиями формирования почв и их водным режимом согласно модели почвообразования: “фактор-процесс-свойство” (Герасимов, 1973, 1975). Синтез многолетних наблюдений позволил получить знания о водном режиме естественных и обработанных почв в Нечерноземье (Васильев, 1950; Зайдельман, 1975, 1985, 2009; Романова и др., 1994, 2015; Субботин, Дыгало, 1986; Анциферова и др., 2022), Черноземной зоне (Зайдельман, Степанцова, 2008, 2013, 2019), Западной Сибири (Болотов, 2017).

Эти и другие подобные обобщения сопряжены с переходом от масштабного уровня точечного мониторинга к ландшафтному уровню как наиболее приоритетному для принятия решений у сельхозтоваропроизводителей. Анализ долгосрочных изменений влажности почв на уровне ландшафтов и более крупных природ-

ных образований реализован благодаря комбинированию более трудоемких прямых методов обследования (полевых и лабораторных) с косвенными методами оценки увлажнения – дистанционным и малоглубинным зондированием (Babaeian et al., 2019; Lausch et al., 2013; Robinson et al., 2008). Аэрокосмическая съемка позволяет получать данные о влажности поверхностных горизонтов почвы на основе анализа изображений в видимом, инфракрасном и радарном диапазонах (Зейлигер и др., 2020; Corwin, Scudiero, 2019). Широкое применение получила мелкомасштабная оценка влажности почв на основе радиолокационных измерений Sentinel-1 SAR (Das et al., 2019) и активно-пассивной съемки в микроволновом диапазоне миссией Soil Moisture Active Passive (SMAP) (Abbaszadeh et al., 2021; Vergopolan et al., 2021). Наблюдения в оптическом и тепловом диапазонах позволяют рассчитывать спектральные индексы, чтобы в признаковом пространстве упорядочить и классифицировать пиксели космического снимка по степени увлажнения почвы (Sadeghi et al., 2017). Основные ограничения спутниковой съемки влажности почвы заключаются в оценке состояния поверхностного слоя (0–5 см) и необходимости сопоставления спектральных характеристик с реальными измерениями объемного содержания влаги (Tavakol et al., 2021). Несмотря на различия в спектральном, пространственном и временном разрешениях действующих спутниковых систем, таких как SMAP, Sentinel-1, Sentinel-2, Landsat, они позволяют охватить многообразие условий увлажнения почв и компенсировать недостаток данных, собираемых исследователями в поле. Технологическим вызовом для спутникового зондирования остается задача измерения влажности в глубине почвенного профиля (Ye et al., 2020).

В ответ на этот запрос в почвоведении возникло направление по применению методов подповерхностного зондирования для косвенной диагностики почвенных свойств – “*proximal soil sensing*” (Rossel et al., 2011). Среди многочисленных почвенных свойств внимание уделено влажности как агрономически ценному параметру, поскольку он напрямую влияет на рост и развитие сельскохозяйственных культур. Неоднородность распределения влаги в поровом пространстве почв тесно связана с варьированием

электрофизических параметров – удельного электрического сопротивления ($УЭС$), магнитной восприимчивости и диэлектрической проницаемости (Поздняков и др., 1996; Поздняков, Елисеев, 2012; Bore et al., 2018; Friedman, 2005).

Эта взаимосвязь определила использование методов и технологий геофизики для диагностики и оценки содержания влаги в почве на разных глубинах. Среди конкретных методов геофизики для диагностики влажности наиболее распространены электротомография (ЕТ), электромагнитное индукционное профилирование (ЕМИ) и георадиолокация (GPR) (Fan et al., 2020).

В крупном и детальном масштабе исследователи часто прибегают к геофизической оценке почвенной влажности (Huang et al., 2017; Shaukat et al., 2022; Scudiero et al., 2024; Zeyliger et al., 2022). В работе (Heil, Schmidhalter, 2017) приведен обзор более 270 исследований, в которых рассмотрены связи между измерениями электропроводности сенсором EM38 и свойствами почв – наличием солей, гранулометрическим составом, содержанием С, N, урожайностью и влажностью почв. Коэффициент детерминации R^2 между электропроводностью и влажностью почвы может варьировать от 0.4 до 0.9, однако характер эмпирической связи будет изменяться в зависимости от пространственно-временного масштаба наблюдений. Этот факт усложняет анализ геофизических данных, которые каждый новый цикл съемки требуют эмпирической калибровки, основанной на наблюдениях и экспериментальных данных о свойствах почв (Visconti, De Paz, 2021).

Характеристика водного режима почв геофизическими методами основана на методе обратной динамической связи (Zhu et al., 2010). Сущность метода обратной динамической связи заключается в регулярном отображении пространственного рисунка электропроводности почв на одном объекте внутри сезонов года (Zhu et al., 2010). Динамический характер паттерна электропроводности соотносится с пространственно-временной изменчивостью свойств почв – содержания влаги, объемной плотности и гранулометрического состава почв (Huang et al., 2018; Martini et al., 2017). Пространственная структура электропроводности достаточно устойчива во времени, что может быть связано с сильным откликом электромагнитного сигнала на гранулометрический со-

став почвы (El-Naggar et al., 2021; Martini et al., 2017; Zare et al., 2020). В некоторых случаях пространственный рисунок электропроводности схож с границами ареалов на почвенной карте (Fletcher, 2022).

Консервативные факторы, такие как гранулометрический и минералогический состав твердой фазы, с одной стороны, обуславливают исходную способность породы проводить ток, а с другой, влияют на интенсивность и направление впитывания влаги, перераспределение внутрипочвенным стоком (Claes et al., 2020; Dietrich et al., 2014). Рельеф поверхности, также являющийся консервативным фактором, влияет на распределение атмосферных осадков и сток в условиях однородности климата, литологического состава пород и биогеоценоза (Ågren et al., 2021; Gillin et al., 2015). Учитывая различные механизмы влияния на перераспределение влаги, важно взвешивать влияние каждого фактора при разработке эмпирических (Liu et al., 2008) или имитационных физико-математических моделей (Xu et al., 2012). Понимание взаимосвязи между электромагнитными свойствами почв, их физическими характеристиками и литолого-геоморфологическими факторами почвообразования имеет ключевое значение для анализа водного режима почв в различных климатических условиях.

Геофизические исследования остаются актуальными для Нечерноземной зоны, в которой процессы увлажнения естественных и осушенных почв определяются геоморфологическими и гидрогеологическими условиями (Зайдельман, 1985). Калининградская область занимает уникальное место среди регионов Нечерноземья благодаря повсеместному оглеению почв вследствие сочетания интенсивного атмосферного увлажнения (среднегодовые значения количества осадков по Калининграду 781 мм) и сложных литолого-геоморфологическим условий моренных и водно-ледниковых равнин с условиями для формирования верховодок (Завалишин, Надеждин, 1961; Географический атлас, 2002). В то же время длительное антропогенное влияние на водный режим почв привело к возникновению огромного массива осушенных земель – 82% от площади всего земельного фонда Калининградской области или 1054.1 тыс. га, среди которых 600 тыс. га приходятся на сельскохозяйственные угодья (Показатели по оцен-

ке и учету мелиоративного состояния..., 2022). Накопленные знания по гидрологическому режиму почв Калининградской области связаны с исследованием гидротехнических аспектов мелиорации избыточно увлажненных почв, и в то же время этот опыт недостаточен для комплексной оценки сельскохозяйственных земель (Анциферова, 2022).

Цель работы заключается в оценке влияния пространственной неоднородности литолого-геоморфологических условий на степень гидроморфизма почв агроландшафта Самбийской равнины с применением бесконтактных методов диагностики – аэрофотосъемки и индукционного электромагнитного профилирования.

Были поставлены следующие задачи исследования:

- 1) изучить пространственную неоднородность геоморфологических условий с помощью топографо-геодезической съемки мезорельефа участка холмисто-волнистой моренной равнины площадью 100 га;
- 2) провести почвенно-литологическое обследование тестового участка (площадью 3 га) с применением индуктивного электромагнитного профилирования;
- 3) оценить влияние рельефа и почвообразующих пород на пространственную изменчивость степени избыточного увлажнения почв;
- 4) провести картографическое моделирование степени гидроморфизма почв с учетом выявленных почвенно-топографических и почвенно-литологических связей.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Полевые работы проведены в 2020–2022 гг. на территории Калининградской области. Объектом исследования выступает пахотный участок длительного почвенно-гидрологического мониторинга “Перелески”, расположенный в Зеленоградском районе Калининградской области, в пределах Самбийской холмисто-волнистой моренной равнины (рис. 1). Основные черты рельефа и почвообразующих пород сформировались в период Валдайского оледенения и отличаются пространственной сложностью и неоднородностью. Литолого-геоморфологические условия являются главными факторами дифференциации структуры почвенного по-

кровка. Основной почвенной комбинацией на изученном поле является сочетание-мозаика.

В условиях преобладания промывного периодически водозастойного водного режима фоновыми почвами моренных холмов выступают буроземы различной степени оглеения. В открытых и замкнутых понижениях образовались дерново-глеевые почвы (Анциферова, 2008, 2008а; Единый государственный реестр..., 2014; Завалишин, Надеждин, 1961). Эксперимент проводился в условиях свежевспаханного поля.

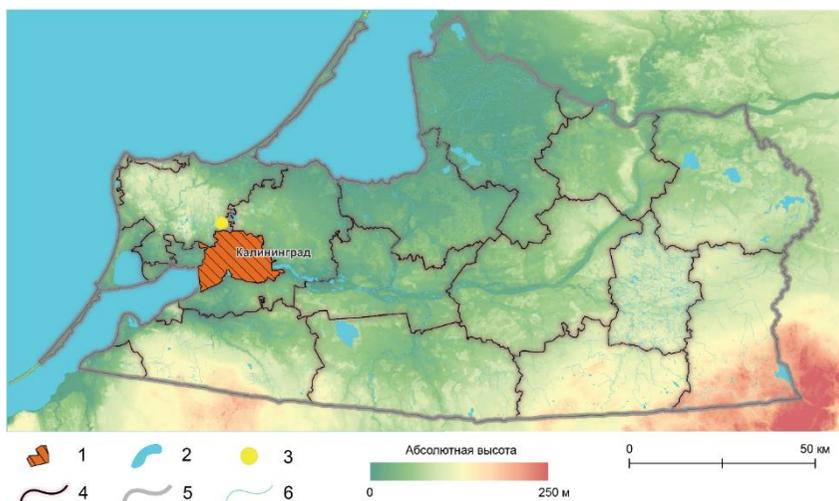


Рис. 1. Физико-географическое положение участка “Перелески”: 1) город Калининград; 2) водные объекты; 3) положение ключевого участка “Перелески”; 4) границы муниципальных районов; 5) границы Калининградской области; 6) водотоки. Цифровая модель рельефа SRTM с разрешением ячейки 90 м, система высот WGS84.

Fig. 1. Physiographic location of the “Pereleski” site: 1) Kaliningrad city; 2) water bodies; 3) location of the key site “Pereleski”; 4) boundaries of municipal districts; 5) boundaries of Kaliningrad region; 6) watercourses. SRTM DEM with 90 m cell resolution, WGS84 coordinate system.

Топографо-геодезическая съемка поля выполнена при помощи беспилотной авиационной системы Mavic Pro 2 и ГНСС Stonex S9III+. В Agisoft Metashape получено плотное облако точек, построены карты глубины и цифровая модель рельефа (ЦМР) с разрешением 11 см. Для расчета морфометрических величин ЦМР приведена к разрешению 5 м. В SAGA GIS рассчитаны морфометрические величины (Congrad et al., 2015), описывающие мезоформы рельефа и их элементы, связанные с аккумуляцией конечной морены на Самбийской равнине.

На тестовом участке площадью 3 га (рис. 3) выполнена диагностика пестроты электропроводности почв методом индукционного электромагнитного профилирования с применением устройства EM38-MK2 (Geonics). Данная аппаратура состоит из двух копланарных рамок – первая рамка генерирует ток с частотой 14.5 кГц, который приводит к возникновению первичного магнитного поля H_1 , вторая рамка регистрирует вторичное (индуцированное) магнитное поле H_2 , вызванное вихревыми электрическими токами в почве. Соотношение H_1 и H_2 имеет линейную связь с электропроводностью (σ , мСм/м) в виде (McNeill, Duncan, 1980):

$$\sigma = \frac{4}{\mu\omega r^2} \left| \frac{H_2}{H_1} \right|,$$

где H_2 – вторичное магнитное поле (А/м), H_1 – первичное магнитное поле (А/м), ω – круговая частота ($2\pi f$) (рад/с), μ – магнитная постоянная (Гн/м), r – расстояние между рамками (м).

Аппаратура измеряет усредненную величину σ внутри слоев 0–0.375 м, 0–0.75 м, 0–1.5 м. Тестовый участок был покрыт площадной электромагнитной индукционной съемкой с регулярным шагом 10–20 м между галсами. Измерения интерполированы методом ординарного кригинга в виде трех растров электропроводности почв с разрешением 5 м в слоях 0–0.375 м, 0–0.75 м и 0–1.5 м. Всего использованы четыре режима работы аппаратуры относительно поверхности почвы (табл. 1).

Интерпретация данных электромагнитного зондирования выполнена на основе эксперимента в точках опорных почвенных разрезов ПР110, 486, 532, 534. Предварительно перед началом из-

мерений выполнена установка нуля, для которой прибор поднимается над поверхностью почвы на высоту 1.5 м вдали от линий электропередач и крупных металлических объектов. Сенсор в различных режимах (табл. 1) поднимали над поверхностью почвы с шагом 10 см, таким образом фиксировались средние значения электропроводности послойно 0–10, 0–20, ... 0–100 см.

Таблица 1. Рабочие режимы аппаратуры EM38-MK2
Table 1. Operating modes of EM38-MK2 equipment

Режимы	Ориентация антенны	Расстояние между источником и приемником сигнала, метры	Эффективная глубина профилирования, метры
QV1.0m	Вертикальная	1	1.5
QV0.5m	Вертикальная	0.5	0.75
QH1.0m	Горизонтальная	1	0.75
QH0.5m	Горизонтальная	0.5	0.375

При вертикальной ориентации антенны на высоте 1 м величина электропроводности снижается на 60%, по сравнению с величиной электропроводности на поверхности почвы, при горизонтальной ориентации диполей уменьшение электропроводности составляет 80% (EM38-MK2 Ground Conductivity Meter Operating Manual, 2009). При индуктивном зондировании используются рамки с различным разнесом между источником и приемником. Благодаря разнесу исследователь может регулировать глубину скин-слоя, а значит, регулировать эффективную глубину зондирования. Устройство EM38-MK2 не дает возможности изменять разнос, поэтому различная глубинность в эксперименте обеспечивалась подъемом самого сенсора относительно поверхности поля. Послойные значения электропроводности сопоставлены с индикаторами гранулометрического состава и влажности почв. Эти свойства почв информативно объясняют изменчивость электропроводности в условиях участка. Влияние индикаторов этих свойств представлено в виде графиков частичной регрессии, которые ви-

зуализируют вклад отдельно взятого свойства почвы, исключая влияние других.

Отбор проб на определение запасов влаги выполнен комбинированным буром послойно с шагом 10 см до глубины 100 см. Полевая влажность определена термостатно-весовым методом. Запасы продуктивной влаги рассчитаны по формуле (Вадюнина, Корчагина, 1986):

$$\text{ЗПВ} = (\text{ВП} - \text{ВЗ}) \times h \times \rho_b \times 0.1,$$

где ЗПВ – запас продуктивной влаги, мм водяного слоя; ВП – полевая влажность в %; ВЗ – влажность завядания, %; h – мощность слоя почвы, см; ρ_b – плотность сложения, г/см³; 0.1 – коэффициент для пересчета в мм водяного слоя.

Гранулометрический состав определен пипет-методом по Н.А. Качинскому (подготовка с пиррофосфатом натрия). В SplineTools (приложение в программной среде R) полевые измерения влажности и гранулометрического состава обобщены по слоям 0–20, 0–40, 0–60, 0–80, 0–100 см (O'Brien, Lauren, 2017).

На ключевом участке “Перелески” с 2012 г. проводится почвенно-гидрологический мониторинг режима влажности, верховодки и грунтовых вод с определением количественных характеристик водного режима осушаемого агроландшафта (Анциферова, 2022).

В мае 2022 г. было выполнено полевое описание 18 профилей на основе данных бурения, придерживаясь классификации почв СССР (1977) и шкалы Ф.Р. Зайдельмана (2008). Мощность и степень оглеения почвенных горизонтов представлены в виде числовой величины – интенсивности оглеения почвенного профиля. Для расчета этой величины использован метод многомерного шкалирования, который включает несколько этапов:

- 1) подготовка данных – представление почвенных профилей в виде колонок с глубинами и закодированной степенью оглеения (от 0 до 4);
- 2) разбивка колонок с шагом 1 см по глубине в программной среде R (пакет aqr);
- 3) расчет евклидоваго расстояния между почвенными описаниями. Расчет выполнен по формуле:

$$d_{ij} = \left[\sum_{a=1}^m (x_{ia} - x_{ja})^2 \right]^{\frac{1}{2}},$$

где x – степень оглеения от 0 до 4, i и j – точки описания, m – глубины от 0 до 100 см через 1 см. С точки зрения многомерного шкалирования m также можно считать общим количеством признаков, описывающих систему из 18 почвенных профилей;

4) выполнение процедуры многомерного шкалирования, расчет функции стресса и ранжирование точек по 1 фактору. Многомерное шкалирование итеративно подбирает конфигурацию точек, для которой выполняется соотношение: $f(\delta_{ij}) \approx d_{ij}$, где δ_{ij} – дистанции между точками, воспроизведенные в новом k -пространстве, а $f(\delta_{ij})$ – оптимально преобразованные дистанции с учетом выбранной модели шкалирования; d_{ij} – расстояние между точками в исходном m -пространстве. Алгоритм минимизирует сумму квадратов отклонения между дистанциями, которая именуется “стрессом” (Borg, Groenen, 2005):

$$\varsigma = \sum_{(i,j)} [f(\delta_{ij}) - d_{ij}]^2,$$

где ς – исходная величина стресса (raw stress), δ_{ij} – дистанции между точками в k -пространстве, d_{ij} – дистанции между точками в исходном m -пространстве.

Если многомерное шкалирование выполнено верно, то δ_{ij} между точками в воспроизведенном пространстве возрастает с увеличением исходных расстояний d_{ij} , что отражает зависимость в виде диаграммы Шепарда.

Чтобы верно выполнить многомерное шкалирование почв по интенсивности оглеения, необходимо определить оптимальное соотношение k -признаков и функции стресса. Размерность k соответствует точке пересечения линии, связывающей исходные данные с рассчитанной по этим данным моделью случайного процесса методом Монте-Карло. Размерность k соответствует числу факторов, которые определяют варьирование интенсивности оглеения выборочной совокупности почв тестового участка (Пузаченко и

др., 2006; McCune, Grace, 2002).

Измерения электропроводности и морфометрических величин рельефа были связаны с морфологической диагностикой оглеения в почвенных профилях, чтобы проанализировать влияние факторов почвообразования на варьирование степени оглеения тестового участка. В ходе исследования разработана модель для предсказания степени оглеения почвы на тестовом участке в зависимости от сочетания условий почвообразования. Математическую основу модели составляет метод пошаговой множественной регрессии (Triantafilis et al., 2009), позволяющий построить функцию линейной взаимосвязи между независимыми переменными – морфометрическими величинами, показателями электропроводности почвообразующих пород, и зависимой переменной – комплексной величиной оглеения почвенного профиля:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon,$$

где Y – зависимая переменная, $X_1 \dots X_n$ – независимые переменные (предикторы), β_0 – коэффициент пересечения с осью Y (константа-интерсепт), $\beta_1 \dots \beta_n$, ε – ошибка модели, отражающая разницу между наблюдаемыми и предсказанными значениями Y .

Оценка разработанной модели проведена при помощи коэффициента детерминации (R^2), скорректированного коэффициента детерминации (adjusted R^2) и среднеквадратической ошибки между рассчитанным и прогнозным значения комплексной величины оглеения в почвенных профилях.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Топографо-геодезическая съемка рельефа ключевого участка “Перелески”

Сводные результаты топографо-геодезического обследования участка “Перелески” и морфометрического анализа его рельефа представлены на рисунке 2.

В рельефе поля преобладают сочетания широких слабовогнутых понижений и вытянутых моренных холмов (рис. 2б). Вершины холмов имеют относительные превышения от 2 до 2.5 м над межхолмовыми понижениями (рис. 2в). Тестовая площадка с

опорными разрезами 534-522-486-ПР110 расположена на вершине одного из асимметричных моренных холмов со склонами северо-западной и юго-восточной экспозиции. Склон юго-восточной экспозиции этого холма отличается значительной величиной крутизны (до 5°) (рис. 2г).

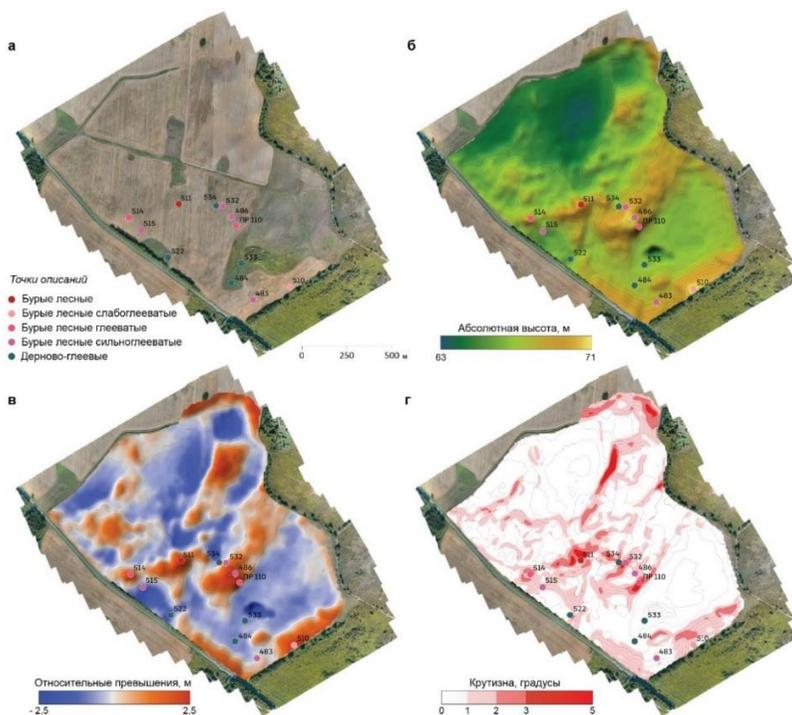


Рис. 2. Цифровая модель рельефа участка “Перелески”: **а)** ортофотоплан (разрешение 11 см); **б)** цифровая модель рельефа с разрешением ячейки 10 м; **в)** топографический индекс превышений в окрестности 200 м; **г)** крутизна склонов. Ортофотоплан и рельеф поля получены в результате съемки с БПЛА Mavic 2 Pro и GNSS Stonex S9III+. Система высот WGS84.

Fig. 2. Digital elevation model of the “Pereleski” plot: **a)** orthophoto (11 cm resolution); **b)** digital elevation model with 10 m cell resolution; **c)** topographical position index 200 m; **d)** slope. The orthophoto and topography maps were obtained from Mavic 2 Pro UAV and Stonex S9III+ GNSS. WGS84 coordinate system.

2. Вариабельность электропроводности почв на тестовом участке по данным индукционного профилирования аппаратурой ЕМ38-МК2

На рисунке 3 представлены результаты интерполяции данных индукционного профилирования тестового участка. Обратим внимание, что шкалы электропроводности на картах ЗБ–ЗГ не унифицированы, чтобы продемонстрировать внутривольную пестроту электрофизических свойств почвообразующих пород.

В каждом случае заметны два типа аномалий – с относительно высокой (красный цвет) и низкой (фиолетово-темно-синий цвет) электропроводностью почв. В северо-западной части участка почвы имеют высокую электропроводность в приповерхностных и глубинных горизонтах – 4–5 мСм/м в слое 0–0.375 м и 20–30 мСм/м в слое 0–0.75 и 0–1.5 м. В южной части участка, на склоне юго-восточной экспозиции, расположен ареал с низкой электропроводностью – менее 10 мСм/м при глубине зондирования 0.75 м и 1.5 м. Появление отрицательных значений этой величины в слое 0–0.375 м может быть объяснено двумя причинами: 1) супесчаным составом поверхностных горизонтов с высоким электрическим сопротивлением; 2) глубокой и крайне неоднородной вспашкой почвы в апреле–мае 2022 г. с глубиной борозд 20–40 см. Техническое руководство прибора предполагает установку нуля относительно некоторого слабо нарушенного эталона, интенсивное внешнее воздействие посторонних металлических предметов или линий электрификации приводит к смещению измерений относительно нуля.

Опыт выполненного детального картографирования с использованием ЕМ38-МК2 указывает на то, что локальные неоднородности площадью до 5–6 м² и мощностью до 0.5 м находятся за пределами чувствительности сенсора. Этот масштаб достаточен для выявления элементарных почвенных ареалов на обследуемом участке холма. Электропроводность почв на картах имеет сложный мозаичный паттерн с отсутствием регулярных и четких форм. Эти наблюдения указывают на пестрое строение почвообразующих пород, которыми сложен холм в пределах тестовой площадки. Вертикальная и пространственная литологическая неоднородность – типичное явление в условиях моренных равнин Калинин-

градской области.

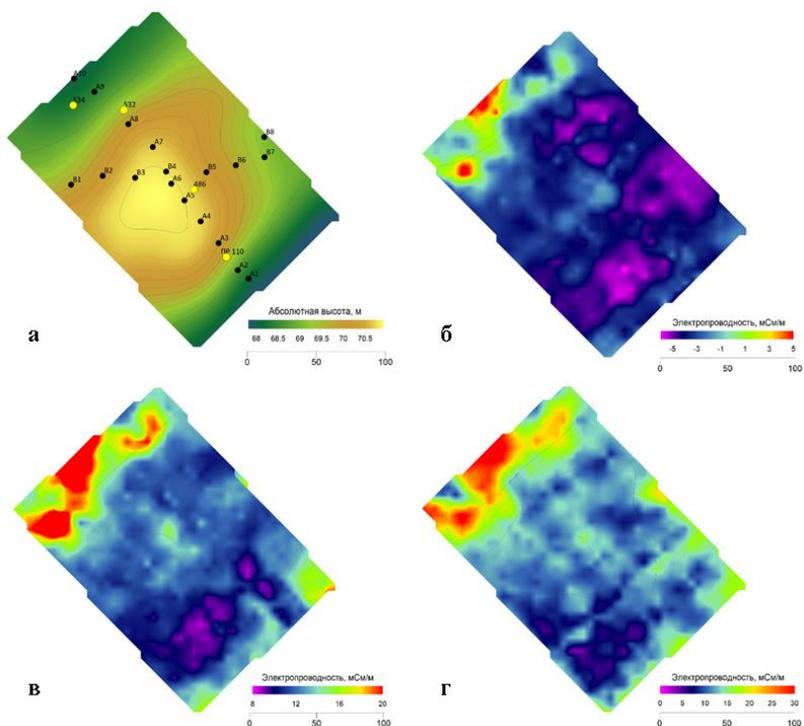


Рис. 3. Электропроводность почв на тестовом участке: **А** – фрагмент цифровой модели с разрешением 2 м, горизонтали через 20 см, черным цветом обозначены площадки, описанные в апреле–мае 2022 г., желтым цветом обозначены площадки почвенно-гидрологического мониторинга; **Б** – электропроводность почв в слое 0–0.375 м; **В** – электропроводность почв в слое 0–0.75 м; **Г** – электропроводность почв в слое 0–1.5 м. Система высот WGS84.

Fig. 3. Electrical conductivity of soils at the test site: **A** – fragment of the digital elevation model with 2 m resolution, isolines through 20 cm, black colour indicates observations described in April–May 2022, yellow colour indicates soil-hydrological monitoring sites; **B** – soil conductivity in the layer 0–0.375 m; **V** – soil conductivity in the layer 0–0.75 m; **G** – soil conductivity in the layer 0–1.5 m. WGS84 coordinate system.

3. Результаты эксперимента по интерпретации электромагнитного индукционного зондирования почв тестового участка

Фактическая пестрота почвообразующих пород в пределах участка “Перелески” обуславливает пространственную вариабельность свойств почв и водно-воздушного режима, в первую очередь – гранулометрического состава и запасов влаги в пахотном (0–20 см) и метровом (0–100 см) слоях как критически важных параметров роста и развития сельскохозяйственных культур. Определение запасов влаги проведены в третьей декаде мая 2022 г. в условиях влажности почв близкой или превышающей наименьшую влагоемкость на фоне чистого пара.

В таблице 2 сведены результаты измерений на площадках, обобщенные по слоям 0–20, 0–40, 0–60, 0–80, 0–100 см. На тестовом участке прослеживается высокая изменчивость содержания физической глины в метровой толще почв – от 9.2 до 55.0% (от рыхлых песков до глин) при фоновом преобладании валунных супесей и легких опесчаненных суглинков. По данным полевого обследования, почвообразующие породы тестового участка представлены моренными и водно-ледниковыми супесями и легкими суглинками с прослойками глин. В межхолмовых понижениях сформировались карбонатные отложения сложного генезиса – озерно-ледниковые глины, моренные суглинки и супеси с участием делювия.

Показатели ОЗВ и ЗПВ в метровом слое наиболее отличаются между площадками ПР110 и 534–179.9 мм и 138.4 мм против 414.7 мм и 219 мм. В почвах 486 и 532 их значения близки и отличаются между площадками менее чем на 10 мм. При этом наибольшая объемная плотность отмечена в почвах 486 и 532, а почвы ПР110 и 534 менее уплотнены в метровом слое.

В результате эксперимента не выявлено отклика электропроводности почв на изменения запасов общей и продуктивной влаги. Диапазон изменения общих запасов влаги в метровом слое составил от 41.4 до 414.7 мм ОЗВ, для запасов продуктивной влаги – от 28.4 до 219.0 мм у ЗПВ (рис. 4). Сенсор демонстрирует достоверный отклик на изменение содержания ила при переходе от супесчано-легкосуглинистых отложений на вершине и склонах

холма к тяжелосуглинистым и глинистым породам в межхолмовом понижении ($R^2 = 0.88$). С ростом содержания тонкодисперсной фракции растет электропроводность почв.

Таблица 2. Обобщенные данные измерений запасов влаги и гранулометрического состава в мае 2022 года на тестовом участке (“Перелески”)

Table 2. Summarized data of soil moisture content and particle size distribution in May 2022 at the test site (“Pereleski”)

Номер площадки	Глубина, см	ОЗВ*, мм	ЗПВ*, мм	Физическая глина, %	Ил, %	Плотность (ρ), г/см ³	σ, мСм/м
ПР110	0–20	42.7	32.3	12.4	4.1	1.15	3
ПР110	0–40	83.9	65	12	4.1	1.4	4
ПР110	0–60	121.6	94.4	11.7	4	1.505	3
ПР110	0–80	148.7	113.8	10.6	3.4	1.525	4
ПР110	0–100	179.9	138.4	9.2	2.7	1.54	4
486	0–20	41.4	28.4	18.9	7.4	1.15	5
486	0–40	84.8	58.2	19	8.1	1.47	6
486	0–60	139.3	97.4	19.3	8.8	1.645	6
486	0–80	198.1	140	19.6	9.3	1.65	7
486	0–100	259.4	184.3	20	9.8	1.67	7
532	0–20	45.8	35.2	19.7	5.6	1.15	5
532	0–40	91.8	67.8	19.8	6.1	1.385	6
532	0–60	145.6	107.3	20.6	6.6	1.625	6
532	0–80	204.4	150.1	21.8	7.8	1.665	8
532	0–100	265.5	192.2	22.7	9.3	1.65	7
534	0–20	61.8	38	38.9	17.9	1.175	10
534	0–40	137	85.4	51.2	27	1.415	13
534	0–60	215	118.4	59.5	33.5	1.445	12
534	0–80	306.9	160.6	58.8	32	1.445	14
534	0–100	414.7	219	55	28.7	1.58	18

Примечание. ОЗВ* – общие запасы влаги, ЗПВ* – запасы продуктивной влаги, σ – электропроводность.

Note. ОЗВ* – total moisture reserves, ЗПВ* – productive moisture reserves, σ – electrical conductivity.

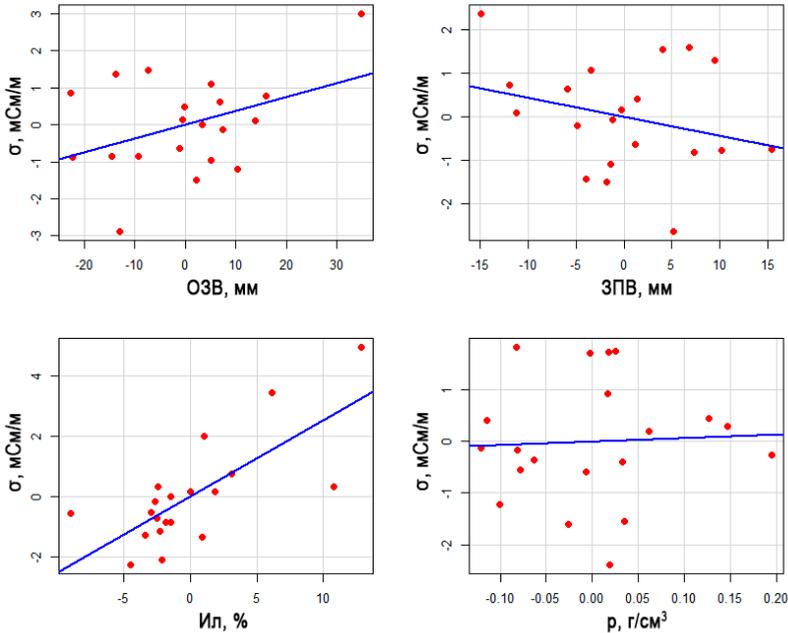


Рис. 4. Отклик электропроводности (σ , мСм/м) на изменчивость влажности (ОЗВ – общие запасы влаги, ЗПВ – запасы продуктивной влаги), плотности (ρ), содержания ила в слоях 0–20, 0–40, 0–60, 0–80, 0–100 см.

Fig. 4. Relation of electrical conductivity (σ , мСм/м) to the variability of moisture content (total moisture storage, productive moisture storage), bulk density (ρ), and silt content in layers 0–20, 0–40, 0–60, 0–80, 0–100 cm.

Инвариантность относительно условий в период геофизического обследования, т. е. относительно кратковременного динамического состояния водного режима почв, является ключевым моментом проведенного исследования, в результате которого выявлен факт индикаторной роли электропроводности почв при изучении контрастности их литологического строения при обязательном выполнении условия $W > НВ$.

4. Диагностика оглеения на основе описания морфологии почвенного профиля

Для детализации съемки почвенного покрова помимо опорных разрезов были заложены два профиля, состоящих из серии скважин с шагом 20 м (рис. 5). В результате исследования тестового участка выявлено почвенное разнообразие, включающее три типа почв: буроземы глееватые, дерново-подзолистые глеевые и дерново-глеевые. Дерново-подзолистые глеевые почвы встречаются в описаниях А1, А2, В1, В8 – у подножия склонов холма. Дерново-глеевые почвы характерны для западных комплексов, в которых расположены площадки А10, А9, В9. Остальные площадки характеризуют буроземы, преимущественно сильноглееватые.

Степень выраженности оглеения горизонтов, глубина и суммарная мощность оглеенной части профиля варьирует между площадками. На рисунке 5А продемонстрированы колонки, обозначающие чередование почвенных горизонтов в профилях описанных почв. Степень оглеения изменяется от “0” – отсутствие оглеения, которое в основном характерно для пахотного горизонта, до “4” – окисленный глей.

При оценке влияния эдафических условий на интенсивность оглеения прибегают к анализу варьирования признаков застойного увлажнения – в почвенном профиле между горизонтами и в почвенном покрове между ареалами почв. Таксономическая характеристика оглеения на уровне вида позволяет утверждать, что все почвы, наблюдаемые на тестовом участке либо сильноглееватые, либо глеевые, так как нижняя часть иллювиального горизонта Вg подвержена сильному оглеению, переходя в окисленный глей. В то же время на уровне индивидуумов (рис. 6А) заметно варьирование степени оглеения горизонтов и их мощности в почвенном профиле. При рассмотрении внутренних связей и причин варьирования степени оглеения был применен метод многомерного шкалирования почв.

5. Упорядочивание почвенных описаний по интенсивности оглеения на основе многомерного шкалирования

В результате многомерного шкалирования выявлены четыре независимых фактора, отвечающих за изменчивость интенсивности оглеения в профиле почв выборочной совокупности. При $k > 4$ значения стресса по случайной модели превышают стресс, рассчитанный на основе исходных данных. Для описания изменчивости интенсивности оглеения выбрана оптимальная размерность $k = 4$, что соответствует пересечению исходной и случайной модели по Евклиду. Ранжирование почвенных профилей по значениям 2-го, 3-го, 4-го факторов не обеспечивает их строгого упорядочивания. Эти факторы описывают частные следствия застойно-промывного переувлажнения, например, частоту изменения степени оглеения в профиле, чередование горизонтов с разной степенью оглеения в профиле и др. Их визуализация не приведена в статье.

В таблице 3 сведены все значения факторов выборочной совокупности почв, строки ранжированы по значениям первого фактора (выделен полужирным).

Учитывая исходную структуру данных, можно считать, что первый фактор определяет направленную изменчивость интенсивности оглеения в почвенном профиле – нарастание степени оглеения почвы с глубиной и общую сумму глееватых или оглеенных горизонтов в профиле.

На рисунке 5Б почвенные профили упорядочены по возрастанию значений первого фактора. В крайней слева колонке P110 (ПР110) изображена почва, наименее подверженная процессам оглеения – бурозем среднеглееватый супесчаный. И наоборот, в правой части рисунка изображены гидроморфные дерново-глеевые почвы с глеем под пахотным глееватым горизонтом. В результате ранжирования почвы выстроены в ряду “буроземы глееватые – дерново-подзолистые глеевые – дерново-глеевые” согласно нарастанию интенсивности оглеения, а следовательно, согласно увеличению продолжительности периода с избыточным увлажнением. Исследования, проведенные на данном участке в период с 2012 по 2022 гг., подтвердили гипотезу о связи степени оглеения и периода с воздухоносной пористостью менее 10%, а также длительностью существования верховодки (Анциферова, 2022). Поэтому эти количественные показатели являются индикаторами избыточного увлажнения.

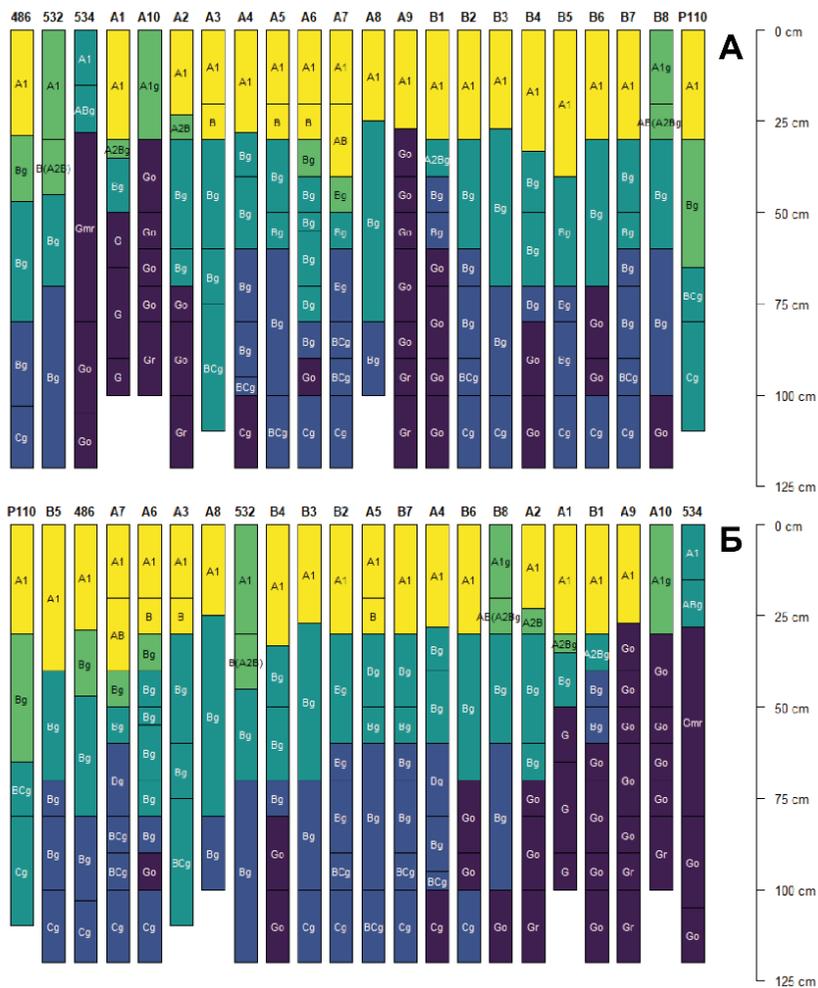
Таблица 3. Независимые факторы, описывающие изменчивость степени оглеения в почвенном профиле

Table 3. Factors affecting the variability of the degree of gley intensity in the soil profile

№ пло- шадки	Название почвы	Ф1*	Ф2	Ф3	Ф4
ПР110	Бурозем среднеглееватый супесчаный	-9.23	4.16	0.51	1.84
В5	Бурозем сильноглееватый супесчаный	-5.88	-2.26	-1.27	0.93
А7	Бурозем сильноглееватый легкосуглини- стый	-5.88	0.28	0.1	-0.28
486	Бурозем сильноглееватый супесчаный	-5.53	-2.77	-1.47	3.08
А3	Бурозем среднеглееватый супесчаный	-5.22	-1.32	0.6	-1.5
А6	Бурозем сильноглееватый легкосуглини- стый	-5.19	4.46	2.48	1.43
532	Бурозем сильноглееватый супесчаный	-3.25	3.15	0.45	-2.6
А8	Бурозем сильноглееватый легкосуглини- стый	-3.23	0.94	-4.72	-0.23
В3	Бурозем сильноглееватый супесчаный	-1.99	-3.66	-0.51	-3.13
В4	Бурозем глеевый легкосуглинистый	-1.41	1.85	0.8	-1.93
А5	Бурозем сильноглееватый легкосуглини- стый	-1.15	0.2	1.36	0.9
В2	Бурозем сильноглееватый супесчаный	-1.15	0.2	1.36	0.9
В7	Бурозем сильноглееватый супесчаный	-1.15	0.2	1.36	0.9
А4	Бурозем осушенный сильноглееватый легкосуглинистый	-0.58	1.01	1.25	0.11
В8	Дерново-подзолистая глеевая легкосу- глинистая	0.2	-3.49	-0.64	-2.88
В6	Бурозем глеевый супесчаный	0.39	2.39	-2.83	0.91
А2	Дерново-подзолистая глеевая супесчаная	1.02	-1.97	-1.35	-3.4
А1	Дерново-подзолистая глеевая супесчаная	4.39	-5.97	1.08	3.26
В1	Дерново-подзолистая глеевая легкосу- глинистая	5	-3.39	1.54	1.46
А9	Дерново-глеевая легкосуглинистая	12.41	1.68	4.69	-1.9
А10	Дерново-глеевая тяжелосуглинистая	12.73	0.98	0.05	1.63
534	Дерново-глеевая тяжелосуглинистая	14.69	3.34	-4.84	0.5

Примечание. Ф1...Ф4* – независимые факторы, описывающие изменчивость степени оглеения в выборочной совокупности почв.

Note. Ф1...Ф4* – independent factors describing the variability of the degree of gley formation in the soil sample population.



Степень оглеения почвенных горизонтов

	■	■	■	■	■
A1, A2B	Нет явных признаков застойного переувлажнения	Единичные сизовато-серые пятна по общему фону	Неинтенсивный сизоватый налет, охристые аморфные новообразования	Интенсивная сизая окраска, охристые аморфные новообразования, много орштейнов	Глей окисленный, по однородному фону единичные охристые пятна на 20%
B, BC, C		Сизые полосы оглеения по краям от отд., до 20% поверхности всего горизонта	Сеть латен оглеения, мраморовидная окраска, площадь 20-50%	Сеть пятен оглеения, мраморовидная окраска, площадь 50-80%	Глей окисленный, по однородному фону 80% площади горизонта имеет холодную окраску

Методы эколого-мелиоративных изысканий и исследований почв (Зайдельман, 2008)

Рис. 5. Сравнительная характеристика оглеения горизонтов в выборочной совокупности почв тестового участка: **А** – до многомерного шкалирования; **Б** – после шкалирования и упорядочивания профилей по возрастанию интенсивности оглеения.

Fig. 5. Comparative characteristic of gley formation of soils of the test plot: **A** – before multidimensional scaling; **B** – after scaling and ordering of soil profiles by increasing intensity of gley formation.

Таким образом, многомерное шкалирование решает задачу описания связей внутри профиля, между отдельными почвенными горизонтами и между почвенными индивидуумами в условной выборочной совокупности. Далее необходимо соотнести величину интенсивности оглеения и литолого-геоморфологические (эдафические) условия почвообразования для описания причин, которые приводят к изменению условий переувлажнения в почвенном покрове.

6. Оценка влияния литолого-геоморфологических условий на интенсивность оглеения почвенного профиля

Разработана линейная модель, которая демонстрирует зависимость между морфометрическими характеристиками рельефа, электропроводностью почв и оценочной интенсивностью оглеения в почвенном профиле. Всего в модель включено 18 параметров, из которых 15 – показатели крутизны, формы рельефа (кривизна, индексы превышений), водосборной площади, топографический индекс влажности и другие расчетные морфометрические величины, а три параметра – электропроводность почв в слоях 0–0.375 м, 0–0.75 м и 0–1.5 м. В таблице регрессионного анализа (табл. 4) представлены только две наиболее значимые переменные из 18, отобранные на основании t-критерия и значений p-value.

Данные в таблице 4 указывают на сильную статистическую значимость отклика зависимых переменных при объяснении изменчивости интенсивности оглеения почв. В целом данная модель объясняет 81% изменчивости интенсивности оглеения в выборочной совокупности почвенных описаний. Среднеквадратическая ошибка между наблюдаемой величиной интенсивности оглеения и предсказанной на основе регрессионной модели составляет 2.53. С

учетом разброса исходных данных от -10 до 15 данное значение ошибки можно считать сравнительно небольшим.

Таблица 4. Выходные данные пошаговой регрессии
Table 4. Output data for stepwise regression

	Коэффициент	Стандартная ошибка	t- статистика	p- значение
Пересечение (Intercept)	-8.35	1.59	-5.27	0.000519
Электропроводность в слое 0–1.5 м, мСм/м	0.76	0.12	6.39	0.0000509
Индекс превышений в окрестности 10 м, м	-133.3	35.42	-3.76	0.00143

На рисунке 6 представлена диаграмма рассеяния почв тестовой площадки: по оси абсцисс – электропроводность почв в слое 0–1.5 м (мСм/м), по оси ординат – величина относительных превышений в окрестности 10 м (м). Размер точки на графике отражает интенсивность оглеения – чем больше точка, тем выше степень оглеения почвенного профиля. Выражена тенденция к разделению точек на три класса с характерными сочетаниями значений электропроводности и относительных превышений.

Зарегистрированный диапазон электропроводности варьирует от 6 до 33 мСм/м со средним значением 14 мСм/м. Установлено, что буроземы сильноглееватые и дерново-подзолистые глеевые почвы характеризуются уровнем электропроводности, не превышающим 15 мСм/м, что связано с их формированием на субстрате из супесей и легких опесчаненных суглинков. Отличительной чертой дерново-глеевых почв является электропроводность, превышающая 20 мСм/м. Профиль дерново-глеевых почв отличается наличием тяжелосуглинистого состава в верхнем слое и переходом от тяжелых суглинков к легким суглинкам или супесям с прослойками глин на глубине от 60 до 80 см. Результаты исследования демонстрируют, что электропроводность почвы может слу-

жить надежным индикатором для определения контрастности литологического строения почвообразующих пород.

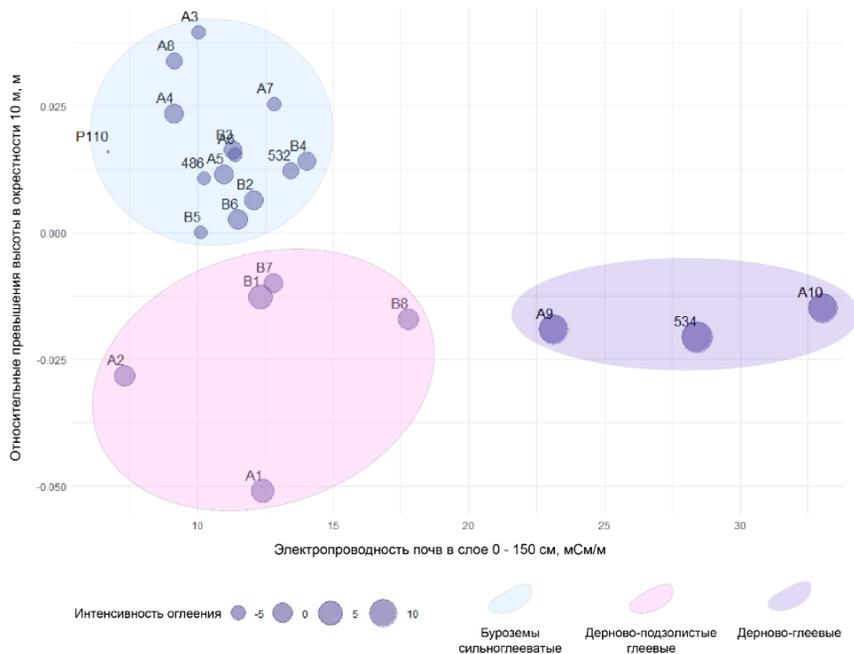


Рис. 6. Диаграмма рассеяния почвенных профилей тестового участка в пространстве литолого-геоморфологических факторов – электропроводности почв в слое 0–1.5 м и относительных превышений высоты в окрестности 10 м.

Fig. 6. Scatterplot of soil profiles of the test plot in the space of lithological and geomorphological factors – soil electrical conductivity in the 0–1.5 m layer and topographical position index 10 m.

Методика электромагнитного индукционного профилирования, принятая в данном исследовании, ограничивает возможность дифференциации литологического строения внутри почвенного профиля, между почвенными горизонтами. При рассмотрении объекта электромагнитного зондирования как слоистой среды можно констатировать, что почвы на тестовом участке в первом

приближении демонстрируют двухслойное строение. Наблюдаются сочетания супесей на легких суглинках, легких суглинков на супесях или песках, тяжелых суглинков на супесях и песках с прослойками глин.

Отмеченный электромагнитный отклик коррелирует с типологическими особенностями строения почвенного профиля в целом. Дифференциация тонких слоев с использованием аппаратуры ЕМ38-МК2 зависит от ряда факторов, включая глубину залегания горизонтов, степень контрастности электромагнитных свойств между породами в профиле, а также специфических настроек самого прибора. В отличие от вертикального электрического зондирования методом сопротивлений, в методе индукционного профилирования невозможно регулировать разрешающую способность слоя, в котором возникает вторичное магнитное поле. Регулирование разрешающей способности зондирования обеспечивается увеличением расстояния между катушками или изменением высоты прибора относительно поверхности. Однако данные исследования в масштабе тестового участка нами не проводились.

На рисунке 6 прослеживается разделимость групп почв вдоль оси ординат – относительное превышение высоты в окрестности 10 м. Ее величина варьирует в пределах -0.05 и 0.025 м, то есть в диапазоне нескольких сантиметров. С учетом размера окрестности можно считать, что данный индекс характеризует формы микрорельефа или элементы мезорельефа в пределах тестового участка.

Буроземы сильноглееватые расположены на плоской выровненной вершине холма без выраженного микрорельефа, а также на выпуклых покатых и крутых склонах холма. В этих почвах возможно формирование верховодки в экстремально сырые годы с сентября по март, летом в течение вегетационного периода верховодка отсутствует. Буроземы сильноглееватые в большей степени, чем остальные исследуемые почвы, подвержены длительному переувлажнению. Это подчеркивается показателем периода воздухоносной пористости выше 10% – в буроземах сильноглееватых этот показатель составляет 155.6 дней. Чем дольше сохраняется низкая пористость аэрации, тем глубже и интенсивнее развивается оглеение.

Дерново-подзолистые почвы собирают большой объем влаги, располагаясь на вогнутых элементах и подножиях склонов. Их песчано-супесчаный состав и хорошая водопроницаемость способствует тому, что влага не скатывается по поверхности, а почти полностью впитывается. При этом в профиле глубже 40–50 см идет утяжеление гранулометрического состава и увеличение плотности связных супесей и легких суглинков. Несмотря на наличие гончарного дренажа отток избыточной влаги не прослеживается. Эти наблюдения свидетельствуют о том, что на вогнутых склонах, у подножий склонов холма, а также в слабовогнутых микропонижениях на его вершине возникают условия аккумуляции избыточной влаги, что приводит к развитию более длительного оглеения, чем в буроземах сильноogleеватых.

Ареал дерново-глеевых почв маркируется величиной электропроводности выше 20 мСм/м. Этот ареал соответствует межхолмовым понижениям и крупным ложбинам в мезорельефе, концентрирующим весь внутрпочвенный сток. Сочетание двух факторов – водоупорных пород (глин в понижении) и вогнутого элемента мезорельефа – приводит к потерям урожая до 80% в годы с влагообеспеченностью выше средней климатической нормы. Период с воздухоносной пористостью менее 10% у дерново-глеевых почв достигает 214 дней – это максимальный показатель, наблюдаемый среди компонентов почвенного покрова изученного участка (табл. 5).

На основе модели в таблице 4 выполнен картографический прогноз интенсивности оглеения почв на тестовом участке. Его результат представлен на рисунке 7. При помощи регрессионной модели интенсивности оглеения почв рассчитана в каждой ячейке 5×5 м тестового участка. Достоверно выделены ареалы с тяжело-суглинистым и супесчано-легкосуглинистым составом почв. Локальные неоднородности площадью до 20–25 м² мощностью до 2 м находятся за пределами чувствительности прибора и не отражаются на картах при площадной съемке.

Таблица 5. Сравнительные количественные характеристики гидроморфизма почв на тестовой площадке (по данным почвенно-гидрологического мониторинга)

Table 5. Comparative characteristics of soil hydromorphism at the test site (based on soil-hydrological monitoring data)

Характеристики в слое 0–100 см	486	П110	532	534
Влажность выше НВ, дни	56.1	39.4	41.3	23**
Период с ВП менее 10%, дни	155.6	22.2	135	214
Верхняя граница зоны с ВП менее 10%, см	34.4	71.7	40	1.1
Верховодка в период апрель–октябрь, дни	-*	10.6	15	38.3***

Примечание. * – на глубине 100–140 см около 20 дней в средние и влажные по количеству осадков годы;

** – сквозное промачивание отсутствует вследствие наличия водоупорного пласта глин в почвенном профиле. При этом длительность поверхностного затопления составляет в среднем 23 дня по наблюдениям 2012–2020 гг.;

*** – в дерново-глеевых почвах формируется несколько уровней верховодки вследствие слоистости глин (поверхностное затопление + верховодка на уровне 80–100 см).

Note. * – at a depth of 100–140 cm for about 20 days in years with average and above-average precipitation;

** – percolation is restricted due to the presence of a clay layer within the soil profile that restricts water infiltration. As a result, surface flooding persists for an average of 23 days, based on observations from 2012 to 2020;

*** – in sod-gley soils, the stratified clay layers lead to the formation of multiple perched water tables, including surface flooding and an additional perched water level at a depth of 80–100 cm.).

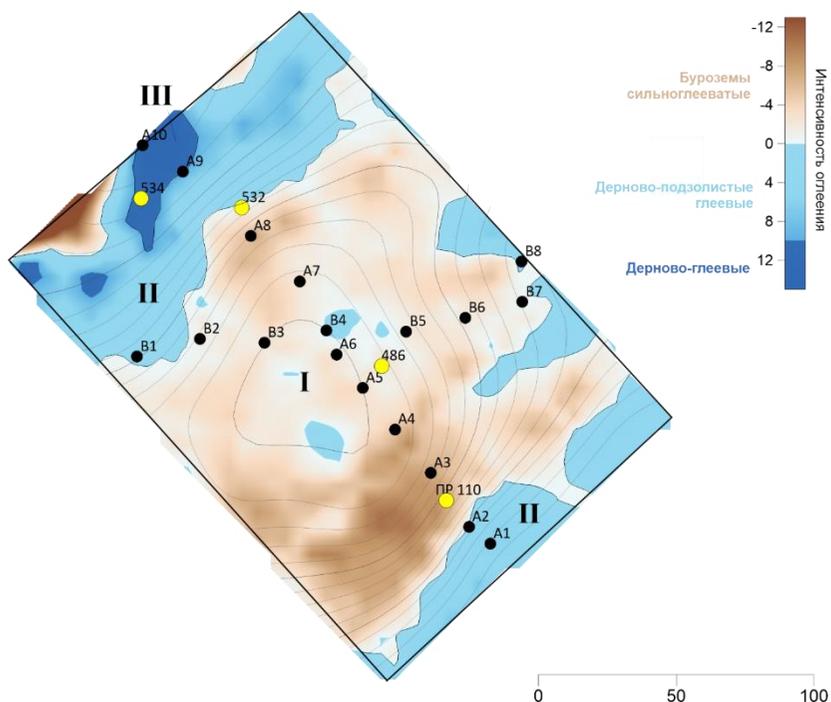


Рис. 7. Карта структур почвенного покрова на тестовом участке. Границами обозначены различные почвенные комбинации, цветом – доминантная почва и ее степень интенсивности оглеения согласно принятой шкале. Чем выше значение на шкале, тем оглеение сильнее. Почвенные комбинации: I – микромозаики буроземов сильноглееватых и дерново-подзолистых глеевых почв; II – микромозаики дерново-подзолистых глееватых и дерново-глеевых почв; III – дерново-глеевые почвы.

Fig. 7. Map of soil cover structures in the test plot. Line boundaries indicate different soil combinations, the colour indicates the dominant soil and its degree of intensity of gley formation according to the adopted map scale. Higher values on the map scale indicate stronger gley formation. Soil combinations: I – micromosaics of strongly gleyey brown soils and sod-podzolic gleyey soils; II – micromosaics of sod-podzolic gleyey and sod-gleyey soils; III – sod-gleyey soils.

Контрастность эдафических условий тестового участка проявляется в контрастности водно-миграционной структуры почвенного покрова. Пестрота микро- и мезорельефа, высокая вариабельность состава почвообразующих пород приводит к образованию микро мозаик дерново-глеевых, буроземов сильноглееватых и дерново-подзолистых глееватых почв. Несмотря на наличие осушительной дренажной сети, все почвы характеризуются наличием сильного оглеения в почвенном профиле (средней и сильной степени), за исключением почв на склонах, которые имеют слабую степень оглеения и частично смытые горизонты в верхней части профиля (выше горизонта Bg).

Многолетний почвенно-гидрологический мониторинг на поле “Перелески” показал, что в засушливые годы с осадками ниже климатической нормы различия в гидрологических характеристиках почв вершин, склонов и понижений становятся менее выраженными, в отличие от умеренно влажных и влажных лет. В мае 2022 г., характеризующимся влажностью почв выше НВ, фактор интенсивности оглеения маркирует вариабельность водного режима почв, тогда как в сухие периоды он может быть менее информативен для явлений переувлажнения. Установленные почвенные ареалы в рамках тестового участка площадью 3 га будут отражать различия в агроэкологических условиях, что непосредственно указывает на дифференциацию урожайности сельскохозяйственных культур.

ВЫВОДЫ

1. Следствием пространственной неоднородности литологических и геоморфологических условий является формирование специфической структуры перераспределения стока холмистых моренно-водноледниковых равнин. В результате почвенный покров в условиях агроландшафтов Самбийской равнины является контрастным по степени и длительности застойного увлажнения.

2. Литологическое строение почвенного покрова обладает пространственной и вертикальной неоднородностью, которая определяет характер внутрипочвенного распределения влаги. На основе эксперимента с применением электромагнитометра EM38-MK2 установлена тесная связь между содержанием илистой фрак-

ции и электропроводностью почв ($R^2 = 0.88$). Взаимосвязь между содержанием влаги и электропроводностью оказалась незначимой в выбранный период проведения исследований.

3. При помощи индукционного электромагнитного профилирования выполнена оценка электропроводности почвенного покрова на тестовом участке в слоях 0–0.375 м; 0–0.75 м; 0–1.5 м. На картах электропроводности определены два типа аномалий – с относительно высокой и низкой электропроводностью, которые в совокупности отображают пестрый рисунок гранулометрического состава почвенного покрова. Опыт детального картографирования с использованием прибора ЕМ38-МК2 показал, что локальные неоднородности площадью до 5–6 м² и мощностью до 0.5 м находятся за пределами чувствительности сенсора при площадной съемке и не отражаются на картах.

4. Многомерное шкалирование явилось основой для ранжирования почв в ряду “буроземы сильноглееватые – дерново-подзолистые глеевые – дерново-глеевые” по нарастанию степени оглеения с глубиной. Данный метод позволил перейти к количественной оценке индикатора гидрологического режима, выявленного ранее в ходе многолетнего мониторинга почв.

5. Разработана модель связи морфометрических характеристик рельефа, электропроводности и оглеения почв, которая позволяет составлять карты интенсивности оглеения для условий холмисто-моренных агроландшафтов с контрастными литологическими условиями. Изменчивость оглеения почв описывается двумя характеристиками: электропроводностью почв в слое 0–1.5 м и топографическим индексом превышений в окрестности 10 м. Точность модели, доля объясненного варьирования интенсивности оглеения, составляет 81% и подтверждается среднесулетними данными длительности периода с воздухоносной пористостью менее 10% в профиле почв и количеством дней с верховодкой за период апрель–октябрь.

6. При помощи модели построена карта структур почвенного покрова. Выявленная пестрота микро- и мезорельефа, высокая вариабельность состава почвообразующих пород приводит к образованию микро мозаик буроземов сильноглееватых и дерново-подзолистых глееватых почв, микро мозаик дерново-подзолистых

глееватых и дерново-глеевых почв и относительно однородных ареалов дерново-глеевых почв. Установленные почвенные ареалы в рамках тестового участка площадью 3 га будут отражать различия в агроэкологических условиях, связанные с различием среднесуточного водного режима почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анциферова О.А.* Гидрологический режим буроземов в агроландшафтах Самбийской равнины (Калининградская область) // Почвоведение. 2022. № 6. С. 713–727. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22060028>.
2. *Анциферова О.А.* Гидрологический режим и агроэкологическая оценка почв агроландшафтов Самбийской равнины: монография. Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО “КГТУ”, 2022. 365 с.
3. *Анциферова О.А.* Почвы Замландского полуострова и их антропогенное изменение. Часть 1. Факторы почвообразования. Почвы подзолистого и буроземного рядов. Калининград: Изд-во КГТУ, 2008. 397 с.
4. *Анциферова О.А.* Почвы Замландского полуострова и их антропогенное изменение. Часть 2. Дерново-глеевые, аллювиальные, болотные, постпланировочные, городские почвы. Структура почвенного покрова. Калининград: Изд-во КГТУ, 2008а. 424 с.
5. *Болотов А.Г.* Гидротермическое состояние почв юго-востока Западной Сибири: диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук. М., 2017. 351 с.
6. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
7. *Васильев И.С.* Водный режим подзолистых почв // Труды Почвенного института им. В.В. Докучаева. 1950. Т. XXXII. С. 74–96.
8. Географический атлас Калининградской области. Калининград: Изд-во КГУ; ЦНИТ, 2002. 276 с.
9. *Герасимов И.П.* Элементарные почвенные процессы как основа для генетической диагностики почв // Почвоведение. 1973. № 5. С. 102–111.
10. *Герасимов И.П.* Опыт генетической диагностики почв СССР на основе элементарных почвенных процессов // Почвоведение. 1975. № 5. С. 1–9.
11. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. Москва: Гриф и К, 2014. 768 с.
12. *Завалишин А.А., Надеждин Б.В.* Почвенный покров Калининградской области // Почвы Калининградской области. М.: Изд-во АН СССР, 1961.

С. 5–130.

13. *Зайдельман Ф.Р., Л.В. Степанцова, А.С. Никифорова, Никифорова А.С., Красин Н.В., Сафронов С.Б., Красина Т.В.* Генезис и деградация черноземов Европейской России под влиянием переувлажнения. Способы защиты и мелиорации. Воронеж: Издательство “Кварта”, 2013. 352 с.
14. *Зайдельман Ф.Р.* Генезис и экологические основы мелиорации почв и ландшафтов. М.: КДУ, 2009. 720 с.
15. *Зайдельман Ф.Р.* Гидрологический режим почв Нечерноземной зоны. Л., 1985. 329 с.
16. *Зайдельман Ф.Р.* Мелиорация почв. М.: Московский государственный университет, 2003. 448 с.
17. *Зайдельман Ф.Р.* Методы эколого-мелиоративных изысканий и исследований почв. М.: Колосс, 2008. 486 с.
18. *Зайдельман Ф.Р., Степанцова Л.В., Никифорова А.С., Красин В.Н., Даутоков И.М., Красина Т.В.* Новообразования (ортштейны и псевдофибры) поверхностно-оглеенных супесчаных почв севера Тамбовской равнины // Почвоведение. 2019. № 5. С. 544–557. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0032180X19050125>.
19. *Зайдельман Ф.Р.* Режим и условия мелиорации заболоченных почв. М.: Колос, 1975. 320 с.
20. *Зайдельман Ф.Р., Никифорова А.С., Степанцова Л.В., Красин В.Н., Сафронов С.Б.* Эколого-гидрологические и генетические особенности черноземовидных почв замкнутых западин севера Тамбовской низменности // Почвоведение. 2008. № 2. С. 198–213.
21. *Зейлигер А.М., Музалевский К.В., Зинченко Е.В., Ермолаева О.С., Мелихов В.В.* Полевое тестирование метода картографического моделирования влагозапасов поверхностного слоя почвенного покрова, основанного на данных радарной съемки Sentinel-1 и цифровой модели рельефа // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 113–128. DOI: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-4-113-128>.
22. *Кирейчева Л.В.* Биосферно-экологическое обоснование комплексных мелиораций // Природообустройство. 2023. № 2. С. 15–22. DOI: <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-2-15-22>.
23. Классификация и диагностика почв СССР. Москва: Колос, 1977. 221 с.
24. *Поздняков А.И., Елисеев П.И.* Зависимости удельного электрического сопротивления от некоторых свойств антропогенно-преобразованных легких почв агроландшафтов гумидной зоны // Вестник Оренбургского государственного университета. 2012. № 10(146). С. 98–104.

25. Поздняков А.И., Позднякова Л.А., Позднякова А.Д. Стационарные электрические поля в почвах. М.: КМК Scientific Press LTD, 1996. 358 с.
26. Пузаченко Ю.Г., Федяева М.В., Козлов Д.Н., Пузаченко М.Ю. Методологические основания отображения элементарных геосистемных процессов // Современные естественные и антропогенные процессы в почвах и геосистемах. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2006. С. 13–52.
27. Роде А.А. Основы учения о почвенной влаге. Методы изучения водного режима почв. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 287 с.
28. Романова Т.А. Водный режим в генетической характеристике почв гумидной зоны // Почвоведение. 1994. № 4. С. 32–39.
29. Романова Т.А. Водный режим почв Беларуси. Минск, 2015. 144 с.
30. Субботин А.И., Дыгало В.С. Многолетние характеристики гидрометеорологического режима в Подмосковье (Материалы наблюдений Подмосковной воднобалансовой станции). М., 1982. 220 с.
31. ФГБУ “Управление “Калининградмелиоводхоз”. URL: <https://inform-raduga.ru/fgbu/86>.
32. Abbaszadeh P., Moradkhani H., Gavahi K., Kumar S., Hain C., Zhan X., Duan Q., Peters-Lidard C., Karimiziarani S. High-resolution SMAP satellite soil moisture product: Exploring the opportunities // Bulletin of the American Meteorological Society. 2021. Vol. 102. No. 4. P. 309–315. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0016.1>.
33. Ågren A.M., Larson J., Paul S.S., Laudon H., Lidberg W. Use of multiple LIDAR-derived digital terrain indices and machine learning for high-resolution national-scale soil moisture mapping of the Swedish forest landscape // Geoderma. 2021. Vol. 404. P. 115280. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115280>.
34. Babaeian E., Sadeghi M., Jones S.B., Montzka C., Vereecken H., Tuller M. Ground, proximal, and satellite remote sensing of soil moisture // Reviews of Geophysics. 2019. Vol. 57. No. 2. P. 530–616. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018RG000618>.
35. Bore T., Schwing M., Llano M., Speer J., Scheuermann A., Wagner N. A new broadband dielectric model for simultaneous determination of water saturation and porosity // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2018. Vol. 56. No. 8. P. 4702–4713. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2835447>.
36. Borg I., Groenen P.J.F. Modern multidimensional scaling: Theory and applications. New York: Springer Science & Business Media, 2005. 472 p.
37. Bughici T., Skaggs T., Corwin D.L., Scudiero E. Ensemble HYDRUS-2D modeling to improve apparent electrical conductivity sensing of soil salinity under drip irrigation // Agricultural Water Management. 2022. Vol. 272. P. 107813. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107813>.

38. *Claes N., Paige G., Grana D., Parsekian A.D.* Parameterization of a hydrologic model with geophysical data to simulate observed subsurface return flow paths // *Vadose Zone Journal*. 2020. Vol. 19. No. 1. P. e20024. DOI: <https://doi.org/10.1002/vzj2.20024>.
39. *Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J.* System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1.4 // *Geoscientific Model Development*. 2015. Vol. 8. No. 7. P. 1991–2007. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>.
40. *Corwin D.L., Scudiero E.* Review of soil salinity assessment for agriculture across multiple scales using proximal and/or remote sensors // *Advances in agronomy*. 2019. Vol. 158. P. 1–130. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.07.001>.
41. *Das N.N., Entekhabi D., Dunbar R.S., Chaubell M.J., Colliander A., Yueh S., Jagdhuber T., Chen F., Crow W., O'Neill P.E., Walker J.P., Berg A., Bosch D.D., Caldwell T., Cosh M.H., Collins C.H., Lopez-Baeza E., Thibeault M.* The SMAP and Copernicus Sentinel 1A/B microwave active-passive high resolution surface soil moisture product // *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 233. P. 111380. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111380>.
42. *Dietrich S., Weinzettel P.A., Varni M.* Infiltration and drainage analysis in a heterogeneous soil by electrical resistivity tomography // *Soil Science Society of America Journal*. 2014. Vol. 78. No. 4. P. 1153–1167. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.02.0062>.
43. *El-Naggar A.G., Hedley C.B., Roudier P., Horne D., Clothier B.E.* Imaging the electrical conductivity of the soil profile and its relationships to soil water patterns and drainage characteristics // *Precision Agriculture*. 2021. Vol. 22. No. 4. P. 1045–1066. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09763-x>.
44. *Fan B., Liu X., Zhu Q., Qin G., Li J., Lin H., Guo L.* Exploring the interplay between infiltration dynamics and Critical Zone structures with multiscale geophysical imaging: A review // *Geoderma*. 2020. Vol. 374. P. 114431. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114431>.
45. *Fletcher R.S.* Temporal Comparisons of Apparent Electrical Conductivity: A Case Study on Clay and Loam Soils in Mississippi // *Agricultural Sciences*. 2022. Vol. 13. No. 8. P. 936–946. DOI: <https://doi.org/10.4236/as.2022.138058>.
46. *Friedman S.P.* Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review // *Computers and electronics in agriculture*. 2005. Vol. 46. No. 1–3. P. 45–70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.11.001>.
47. EM38–MK2 ground conductivity meter operating manual. Geonics Ltd, 2009. 42 p.

48. Gillin C.P., Bailey S.W., McGuire K.J., Gannon J.P. Mapping of hypopedologic spatial patterns in a steep headwater catchment // Soil Science Society of America Journal. 2015. Vol. 79. No. 2. P. 440–453. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.05.0189>.

49. Heil K., Schmidhalter U. The application of EM38: Determination of soil parameters, selection of soil sampling points and use in agriculture and archaeology // Sensors. 2017. Vol. 17. No. 11. P. 2540. DOI: <https://doi.org/10.3390/s17112540>.

50. Huang J., Ramamoorthy P., McBratney A.B., Bramley H. Soil water extraction monitored per plot across a field experiment using repeated electromagnetic induction surveys // Soil Systems. 2018. Vol. 2. No. 1. P. 11. DOI: <https://doi.org/10.3390/soilsystems2010011>.

51. Lausch A., Zacharias S., Dierke C., Pause M., Kühn I., Doktor D., Dietrich P., Werban U. Analysis of vegetation and soil patterns using hyperspectral remote sensing, EMI, and gamma- ray measurements // Vadose Zone Journal. 2013. Vol. 12. No. 4. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2012.0217>.

52. Liu J., Pattey E., Nolin M.C., Miller J.R., Ka O. Mapping within-field soil drainage using remote sensing, DEM and apparent soil electrical conductivity // Geoderma. 2008. Vol. 143. No. 3–4. P. 261–272. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.11.011>.

53. Martini E., Werban U., Zacharias S., Pohle M., Dietrich P., Wollschläger U. Repeated electromagnetic induction measurements for mapping soil moisture at the field scale: Validation with data from a wireless soil moisture monitoring network // Hydrology and Earth System Sciences. 2017. Vol. 21. No. 1. P. 495–513. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-21-495-2017>.

54. McCune B., Grace J.B. Analysis of ecological communities. Glenden Beach: MjM Software Design, 2002. 300 p.

55. McNeill J.D. Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Technical Note TN-6. Geonics Ltd, 1980. 15 p.

56. O'Brien L. Learning Shiny with the Spline Tool. 2017. URL: https://obrl-soil.github.io/posts/2017-10-22_learning-shiny.

57. Robinson D.A., Campbell C.S., Hopmans J.W., Hornbuckle B.K., Jones S.B., Knight R., Ogden F., Selker J., Wendroth O. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed- scale observatories: A review // Vadose zone journal. 2008. Vol. 7. No. 1. P. 358–389. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2007.0143>.

58. Rossel R.A.V., Adamchuk V.I., Sudduth K.A., McKenzie N.J., Lobsey C.R. Proximal soil sensing: An effective approach for soil measurements in space and time // Advances in agronomy. 2011. Vol. 113. P. 243–291. DOI:

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386473-4.00010-5>.

59. *Sadeghi M., Babaieian E., Tuller M., Jones S.B.* The optical trapezoid model: A novel approach to remote sensing of soil moisture applied to Sentinel-2 and Landsat-8 observations // Remote sensing of environment. 2017. Vol. 198. P. 52–68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.041>.

60. *Scudiero E., Corwin D.L., Markley P.T., Pourreza A., Rounsaville T., Bughici T., Skaggs T.H.* A system for concurrent on-the-go soil apparent electrical conductivity and gamma-ray sensing in micro-irrigated orchards // Soil and Tillage Research. 2024. Vol. 235. P. 105899. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105899>.

61. *Shaukat H., Flower K.C., Leopold M.* Quasi-3D mapping of soil moisture in agricultural fields using electrical conductivity sensing // Agricultural Water Management. 2022. Vol. 259. P. 107246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107246>.

62. *Tavakol A., Mcdonough K., Rahmani V., Hutchinson S.L., Hutchinson J.M.S.* The soil moisture data bank: The ground-based, model-based, and satellite-based soil moisture data // Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2021. Vol. 24. P. 100649. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100649>.

63. *Triantafylis J., Lesch S., Lau K., Buchanan S.* Field level digital soil mapping of cation exchange capacity using electromagnetic induction and a hierarchical spatial regression model // Soil Research. 2009. Vol. 47. No. 7. P. 651–663. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR08240>.

64. *Vergopolan N., Chaney N.W., Pan M., Sheffield J., Beck H., Ferguson C.R., Torres-Rojas L., Sadri S., Wood E.F.* SMAP-HydroBlocks, a 30-m satellite-based soil moisture dataset for the conterminous US // Scientific Data. 2021. Vol. 8. No. 1. P. 264. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-021-01050-2>.

65. *Visconti F., De Paz J.M.* A semi-empirical model to predict the EM38 electromagnetic induction measurements of soils from basic ground properties // European Journal of Soil Science. 2021. Vol. 72. No. 2. P. 720–738. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.13044>.

66. *Xu X., Huang G., Zhan H., Qu Z., Huang Q.* Integration of SWAP and MODFLOW-2000 for modeling groundwater dynamics in shallow water table areas // Journal of Hydrology. 2012. Vol. 412. P. 170–181. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.002>.

67. *Ye N., Hills J., Walker J.P., Yeo I.-Y., Jackson T.J., Kerr Y., Kim E., McGrath A., Popstefanija I., Goodberlet M.* Toward P-band passive microwave sensing of soil moisture // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2020. Vol. 18. No. 3. P. 504–508. DOI: <https://doi.org/10.1109/LGRS.2020.2976204>.

68. Zare E., Li N., Khongnawang T., Farzamian M., Triantafilis J. Identifying potential leakage zones in an irrigation supply channel by mapping soil properties using electromagnetic induction, inversion modelling and a support vector machine // *Soil Systems*. 2020. Vol. 4. No. 2. P. 25. DOI: <https://doi.org/10.3390/soilsystems4020025>.
69. Zeyliger A., Chinilin A., Ermolaeva O. Spatial interpolation of gravimetric soil moisture using EM38-mk induction and ensemble machine learning (case study from dry steppe zone in Volgograd region) // *Sensors*. 2022. Vol. 22. No. 16. P. 6153. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22166153>.
70. Zhu A.X., Liu F., Li B-L, Tao P., Qin C.-Z., Liu G., Wang Y., Yaning C., Ma X., Qi F., Zhou C. Differentiation of soil conditions over low relief areas using feedback dynamic patterns // *Soil Science Society of America Journal*. 2010. Vol. 74. No. 3. P. 861–869. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0411>.
71. Zhu Q., Lin H., Doolittle J. Repeated electromagnetic induction surveys for determining subsurface hydrologic dynamics in an agricultural landscape // *Soil Science Society of America Journal*. 2010. Vol. 74. No. 5. P. 1750–1762. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2010.0055>.

REFERENCES

1. Antsiferova O.A., *Gidrologicheskii rezhim burozemov v agrolandshaftakh Sambiiskoi ravniny (Kaliningradsкая область)* (Hydrological regime of cambisols in the agricultural landscape of the Sambia Plain (Kaliningrad region)), *Pochvovedenie*, 2022, No. 6, pp. 713–727, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22060028>.
2. Antsiferova O.A., *Gidrologicheskii rezhim i agroekologicheskaya otsenka pochv agrolandshaftov Sambiiskoi ravniny* (Hydrological regime and agroecological assessment of soils of agrolandscapes of the Sambia Plain: monograph), Kaliningrad: Izd-vo FGBOU VO “KGTU”, 2022, 365 p.
3. Antsiferova O.A., *Pochvy Zamlandskogo poluostrova i ikh antropogennoe izmenenie. Chast' 1. Faktory pochvoobrazovaniya. Pochvy podzolistogo i burozemnogo ryadov* (Soils of the Zamland Peninsula and their anthropogenic change. Part 1. Factors of soil formation. Podzols and Cambisols series), Kaliningrad: Izd-vo KGTU, 2008, 397 p.
4. Antsiferova O.A., *Pochvy Zamlandskogo poluostrova i ikh antropogennoe izmenenie. Chast' 2. Dernovo-gleevye, allyuvial'nye, bolotnye, postplanirovochnye, gorodskie pochvy. Struktura pochvennogo pokrova* (Soils of the Zamland Peninsula and their anthropogenic change. Part 2. Umbrisols, Fluvisols, Histosols, post-planning and urban soils. Soil cover structure), Kaliningrad: Izd-vo KGTU, 2008a, 424 p.

5. Bolotov A.G. *Gidrotermicheskoe sostoyanie pochv yugo-vostoka Zapadnoi Sibiri: dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni doktora biologicheskikh nauk* (Hydrothermal condition of soils in the south-east of Western Siberia, Dissertation of Doctor Biological Sciences), Moscow, 2017, 351 p.
6. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A., *Metody issledovaniya fizicheskikh svoystv pochv* (Methods of research of physical properties of soils), Moscow: Agropromizdat, 1986, 416 p.
7. Vasil'ev I.S., *Vodnyi rezhim podzolistykh pochv* (Water regime of podzols), *Trudy Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*, 1950, Vol. XXXII, pp. 74–96.
8. *Geograficheskii atlas Kaliningradskoi oblasti* (Geographical atlas of the Kaliningrad region), Kaliningrad: Izd-vo KGU; TsNIT, 2002, 276 p.
9. Gerasimov I.P., *Elementarnye pochvennye protsessy kak osnova dlya geneticheskoi diagnostiki pochv* (Elementary soil processes as a basis for genetic diagnosis of soils), *Pochvovedenie*, 1973, No. 5, pp. 102–111.
10. Gerasimov I.P., *Opyt geneticheskoi diagnostiki pochv SSSR na osnove elementarnykh pochvennykh protsessov* (Experience of genetic diagnostics of soils of the USSR based on elementary soil processes), *Pochvovedenie*, 1975, No. 5, pp. 1–9.
11. *Edinyi gosudarstvennyi reestr pochvennykh resursov Rossii. Versiya 1.0* (Unified State Register of soil resources in Russia. Version 1.0), Moscow: Grif i K, 2014, 768 p.
12. Zavalishin A.A., Nadezhdin B.V., *Pochvennyi pokrov Kaliningradskoi oblasti* (Soil cover of the Kaliningrad region) In: *Pochvy Kaliningradskoi oblasti* (Soils of Kaliningrad region), Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1961, pp. 5–130 (164 p.).
13. Zaidel'man F.R., L.V. Stepantsova, A.S. Nikiforova, Nikiforova A.S., Krasin N.V., Safronov S.B., Krasina T.V., *Genezis i degradatsiya chernozemov Evropeiskoi Rossii pod vliyaniem pereuvlazhneniya. Sposoby zashchity i melioratsii* (Genesis and degradation of chernozems due to excessive moistening in European Russia. The ways of their protection and improvement), Voronezh: Izdatel'stvo "Kvarta", 2013, 352 p.
14. Zaidel'man F.R. *Genezis i ekologicheskie osnovy melioratsii pochv i landshaftov* (Genesis and ecological bases of soil-landscape reclamation), Moscow: KDU, 2009, 720 p.
15. Zaidel'man F.R., *Gidrologicheskii rezhim pochv Nechernozemnoi zony* (Hydrological regime of soils of the Non-Chernozem zone), Leningrad, 1985, 329 p.
16. Zaidel'man F.R., *Melioratsiya pochv* (Soil reclamation), Moscow: Moskovskii gosudarstvennyi universitet, 2003, 448 p.
17. Zaidel'man F.R., *Metody ekologo-meliorativnykh izyskaniy i issledovaniy*

pochv (Methods of ecological and reclamation surveys of soils), Moscow: Koloss, 2008, 486 p.

18. Zaidel'man F.R., Stepantsova L.V., Nikiforova A.S., Krasin V.N., Dautokov I.M., Krasina T.V., Novoobrazovaniya (ortshteiny i psevdofibry) poverkhnostno-ogleennykh supeschanykh pochv severa Tambovskoi ravniny (Neoformations (nodules and placic layers) in surface-gleyed loamy sandy soils of the northern part of the Tambov Plain), *Pochvovedenie*, 2019, No. 5, pp. 544–557, DOI <https://doi.org/10.1134/S0032180X19050125>.

19. Zaidel'man F.R., *Rezhim i usloviya melioratsii zabolochennykh pochv* (Regime and conditions of reclamation of waterlogged soils), Moscow: Kolos, 1975, 320 p.

20. Zaidel'man F.R., Nikiforova A.S., Stepantsova L.V., Krasin V.N., Safronov S.B., Ekologo-gidrologicheskie i geneticheskie osobennosti chernozemovidnykh pochv zamknytykh zapadin severa Tambovskoi nizmennosti (Ecological–hydrological and genetic features of chernozem-like soils of closed depressions in the Northern Tambov Lowland), *Pochvovedenie*, 2008, No. 2, pp. 198–213.

21. Zeiliger A.M., Muzalevskii K.V., Zinchenko E.V., Ermolaeva O.S., Melikhov V.V., Polevoe testirovanie metoda kartograficheskogo modelirovaniya vlagozapasov poverkhnostnogo sloya pochvennogo pokrova, osnovannogo na dannykh radarnoi s"emki Sentinel-1 i tsifrovoi modeli rel'efa (Field testing of the cartographic modeling of soil water content of the surface layer of soil cover based on Sentinel-1 radar survey and digital elevation model), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 4, pp. 113–128, DOI: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-4-113-128>.

22. Kireicheva L.V., *Biosferno-ekologicheskoe obosnovanie kompleksnykh melioratsii* (Biospheric and ecological substantiation of complex land reclamation), *Prirodoobustroistvo*, 2023, No. 2, pp. 15–22, DOI: <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-2-15-22>.

23. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR* (Classification and diagnostics of soils of the USSR), Moscow: Kolos, 1977, 221 p.

24. Pozdnyakov A.I., Eliseev P.I., Zavisimosti udel'nogo elektricheskogo soprotivleniya ot nekotorykh svoystv antropogенно-preobrazovannykh legkikh pochv agrolandshaftov gumidnoi zony (Relationships between Specific Electrical Resistance and Certain Properties of Anthropogenically Transformed Soils in Agro-Landscapes of the Humid Zone), *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, No. 10(146), pp. 98–104.

25. Pozdnyakov A.I., Pozdnyakova L.A., Pozdnyakova A.D., *Statsionarnye elektricheskie polya v pochvakh* (Stationary Electric Fields in Soils), Moscow:

KMK Scientific Press LTD, 1996, 358 p.

26. Puzachenko Yu.G., Fedyaeva M.V., Kozlov D.N., Puzachenko M.Yu., Metodologicheskie osnovaniya otobrazheniya elementarnykh geosistemnykh protsessov (Methodological Foundations for Representing Elementary Geosystem Processes), *Sovremennye estestvennye i antropogennye protsessy v pochvakh i geosistemakh*, Moscow: Pochv. in-t im. V.V. Dokuchaeva, 2006, pp. 13–52.

27. Rode A.A., *Osnovy ucheniya o pochvennoi vlage. Metody izucheniya vodnogo rezhima pochv* (Fundamentals of Soil Moisture Research. Methods of studying soil water regime), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1969, 287 p.

28. Romanova T.A., Vodnyi rezhim v geneticheskoi kharakteristike pochv gumidnoi zony (Water Regime in the Genetic Characterization of Soils in the Humid Zone), *Pochvovedenie*, 1994, No. 4, pp. 32–39.

29. Romanova T.A., *Vodnyi rezhim pochv Belarusi* (Water Regime of Soils in Belarus), Minsk, 2015, 144 p.

30. Subbotin A.I., Dygalo V.S., *Mnogoletnie kharakteristiki gidrometeorologicheskogo rezhima v Podmoskov'e (Materialy nablyudenii Podmoskovnoi vodnobalansovoi stantsii)* (Long-term Characteristics of the Hydrometeorological Regime in the Moscow Region (Observational Data from the Moscow Water Balance Station)), Moscow, 1982, 220 p.

31. FGBU “Upravlenie “Kaliningradmeliovodkhoz”, URL: <https://informraduga.ru/fgbu/86>.

32. Abbaszadeh P., Moradkhani H., Gavahi K., Kumar S., Hain C., Zhan X., Duan Q., Peters-Lidard C., Karimiziarani S., High-resolution SMAP satellite soil moisture product: Exploring the opportunities, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2021, Vol. 102, No. 4, pp. 309–315, DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0016.1>.

33. Ågren A.M., Larson J., Paul S.S., Laudon H., Lidberg W., Use of multiple LIDAR-derived digital terrain indices and machine learning for high-resolution national-scale soil moisture mapping of the Swedish forest landscape, *Geoderma*, 2021, Vol. 404, p. 115280, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115280>.

34. Babaeian E., Sadeghi M., Jones S.B., Montzka C., Vereecken H., Tuller M., Ground, proximal, and satellite remote sensing of soil moisture, *Reviews of Geophysics*, 2019, Vol. 57, No. 2, pp. 530–616, DOI: <https://doi.org/10.1029/2018RG000618>.

35. Bore T., Schwing M., Llano M., Speer J., Scheuermann A., Wagner N., A new broadband dielectric model for simultaneous determination of water saturation and porosity, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, Vol. 56, No. 8, pp. 4702–4713, DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2835447>.

36. Borg I., Groenen P.J.F., *Modern multidimensional scaling: Theory and applications*, New York: Springer Science & Business Media, 2005, 472 p.
37. Bughici T., Skaggs T., Corwin D.L., Scudiero E., Ensemble HYDRUS-2D modeling to improve apparent electrical conductivity sensing of soil salinity under drip irrigation, *Agricultural Water Management*, 2022, Vol. 272, p. 107813, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107813>.
38. Claes N., Paige G., Grana D., Parsekian A.D., Parameterization of a hydrologic model with geophysical data to simulate observed subsurface return flow paths, *Vadose Zone Journal*, 2020, Vol. 19, No. 1, p. e20024. DOI: <https://doi.org/10.1002/vzj2.20024>.
39. Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J., System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1.4, *Geoscientific Model Development*, 2015, Vol. 8, No. 7, pp. 1991–2007, DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>.
40. Corwin D.L., Scudiero E., Review of soil salinity assessment for agriculture across multiple scales using proximal and/or remote sensors, *Advances in agronomy*, 2019, Vol. 158, pp. 1–130, DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.07.001>.
41. Das N.N., Entekhabi D., Dunbar R.S., Chaubell M.J., Colliander A., Yueh S., Jagdhuber T., Chen F., Crow W., O'Neill P.E., Walker J.P., Berg A., Bosch D.D., Caldwell T., Cosh M.H., Collins C.H., Lopez-Baeza E., Thibeault M., The SMAP and Copernicus Sentinel 1A/B microwave active-passive high resolution surface soil moisture product, *Remote Sensing of Environment*, 2019, Vol. 233, p. 111380, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111380>.
42. Dietrich S., Weinzettel P.A., Varni M., Infiltration and drainage analysis in a heterogeneous soil by electrical resistivity tomography, *Soil Science Society of America Journal*, 2014, Vol. 78, No. 4, pp. 1153–1167, DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.02.0062>.
43. El-Naggar A.G., Hedley C.B., Roudier P., Horne D., Clothier B.E., Imaging the electrical conductivity of the soil profile and its relationships to soil water patterns and drainage characteristics, *Precision Agriculture*, 2021, Vol. 22, No. 4, pp. 1045–1066, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09763-x>.
44. Fan B., Liu X., Zhu Q., Qin G., Li J., Lin H., Guo L., Exploring the interplay between infiltration dynamics and Critical Zone structures with multiscale geophysical imaging: A review, *Geoderma*, 2020, Vol. 374, p. 114431, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114431>.
45. Fletcher R.S., Temporal Comparisons of Apparent Electrical Conductivity: A Case Study on Clay and Loam Soils in Mississippi, *Agricultural Sciences*, 2022, Vol. 13, No. 8, pp. 936–946, DOI:

<https://doi.org/10.4236/as.2022.138058>.

46. Friedman S.P., Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review, *Computers and electronics in agriculture*, 2005, Vol. 46, No. 1–3, pp. 45–70, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.11.001>.

47. *EM38–MK2 ground conductivity meter operating manual*. Geonics Ltd, 2009, 42 p.

48. Gillin C.P., Bailey S.W., McGuire K.J., Gannon J.P., Mapping of hydopedologic spatial patterns in a steep headwater catchment, *Soil Science Society of America Journal*, 2015, Vol. 79, No. 2, pp. 440–453, DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.05.0189>.

49. Heil K., Schmidhalter U., The application of EM38: Determination of soil parameters, selection of soil sampling points and use in agriculture and archaeology, *Sensors*, 2017, Vol. 17, No. 11, p. 2540, DOI: <https://doi.org/10.3390/s17112540>.

50. Huang J., Ramamoorthy P., McBratney A.B., Bramley H., Soil water extraction monitored per plot across a field experiment using repeated electromagnetic induction surveys, *Soil Systems*, 2018, Vol. 2, No. 1, p. 11, DOI: <https://doi.org/10.3390/soilsystems2010011>.

51. Lausch A., Zacharias S., Dierke C., Pause M., Kühn I., Doktor D., Dietrich P., Werban U., Analysis of vegetation and soil patterns using hyperspectral remote sensing, EMI, and gamma- ray measurements, *Vadose Zone Journal*, 2013, Vol. 12, No. 4, pp. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2012.0217>.

52. Liu J., Pattey E., Nolin M.C., Miller J.R., Ka O., Mapping within-field soil drainage using remote sensing, DEM and apparent soil electrical conductivity, *Geoderma*, 2008, Vol. 143, No. 3–4, pp. 261–272, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.11.011>.

53. Martini E., Werban U., Zacharias S., Pohle M., Dietrich P., Wollschläger U., Repeated electromagnetic induction measurements for mapping soil moisture at the field scale: Validation with data from a wireless soil moisture monitoring network, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, Vol. 21, No. 1, pp. 495–513, DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-21-495-2017>.

54. McCune B., Grace J.B., *Analysis of ecological communities*, Gleneden Beach: MjM Software Design, 2002, 300 p.

55. McNeill J.D., *Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers*. Technical Note TN-6, Geonics Ltd, 1980, 15 p.

56. O'Brien L., *Learning Shiny with the Spline Tool*, 2017, URL: https://obr-soil.github.io/posts/2017-10-22_learning-shiny.

57. Robinson D.A., Campbell C.S., Hopmans J.W., Hornbuckle B.K., Jones S.B., Knight R., Ogden F., Selker J., Wendroth O., Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed- scale observatories: A review, *Vadose zone journal*, 2008, Vol. 7, No. 1, pp. 358–389, DOI:

<https://doi.org/10.2136/vzj2007.0143>.

58. Rossel R.A.V., Adamchuk V.I., Sudduth K.A., McKenzie N.J., Lobsey C.R., Proximal soil sensing: An effective approach for soil measurements in space and time, *Advances in agronomy*, 2011, Vol. 113, pp. 243–291, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386473-4.00010-5>.

59. Sadeghi M., Babaeian E., Tuller M., Jones S.B., The optical trapezoid model: A novel approach to remote sensing of soil moisture applied to Sentinel-2 and Landsat-8 observations, *Remote sensing of environment*, 2017, Vol. 198, pp. 52–68, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.041>.

60. Scudiero E., Corwin D.L., Markley P.T., Pourreza A., Rounsaville T., Bughici T., Skaggs T.H., A system for concurrent on-the-go soil apparent electrical conductivity and gamma-ray sensing in micro-irrigated orchards, *Soil and Tillage Research*, 2024, Vol. 235, p. 105899, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105899>.

61. Shaukat H., Flower K.C., Leopold M., Quasi-3D mapping of soil moisture in agricultural fields using electrical conductivity sensing, *Agricultural Water Management*, 2022, Vol. 259, p. 107246, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107246>.

62. Tavakol A., McDonough K., Rahmani V., Hutchinson S.L., Hutchinson J.M.S., The soil moisture data bank: The ground-based, model-based, and satellite-based soil moisture data, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2021, Vol. 24, p. 100649, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100649>.

63. Triantafyllis J., Lesch S., Lau K., Buchanan S., Field level digital soil mapping of cation exchange capacity using electromagnetic induction and a hierarchical spatial regression model, *Soil Research*, 2009, Vol. 47, No. 7, pp. 651–663, DOI: <https://doi.org/10.1071/SR08240>.

64. Vergopolan N., Chaney N.W., Pan M., Sheffield J., Beck H., Ferguson C.R., Torres-Rojas L., Sadri S., Wood E.F., SMAP-HydroBlocks, a 30-m satellite-based soil moisture dataset for the conterminous US, *Scientific Data*, 2021, Vol. 8, No. 1, p. 264, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-021-01050-2>.

65. Visconti F., De Paz J.M., A semi-empirical model to predict the EM38 electromagnetic induction measurements of soils from basic ground properties, *European Journal of Soil Science*, 2021, Vol. 72, No. 2, pp. 720–738, DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.13044>.

66. Xu X., Huang G., Zhan H., Qu Z., Huang Q., Integration of SWAP and MODFLOW-2000 for modeling groundwater dynamics in shallow water table areas, *Journal of Hydrology*, 2012, Vol. 412, pp. 170–181, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.002>.

67. Ye N., Hills J., Walker J.P., Yeo I.-Y., Jackson T.J., Kerr Y., Kim E.,

Mcgrath A., Popstefanija I., Goodberlet M., Toward P-band passive microwave sensing of soil moisture, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, Vol. 18, No. 3, pp. 504–508, DOI: <https://doi.org/10.1109/LGRS.2020.2976204>.

68. Zare E., Li N., Khongnawang T., Farzamian M., Triantafilis J., Identifying potential leakage zones in an irrigation supply channel by mapping soil properties using electromagnetic induction, inversion modelling and a support vector machine, *Soil Systems*, 2020, Vol. 4, No. 2, p. 25, DOI: <https://doi.org/10.3390/soilsystems4020025>.

69. Zeyliger A., Chinilin A., Ermolaeva O., Spatial interpolation of gravimetric soil moisture using EM38-mk induction and ensemble machine learning (case study from dry steppe zone in Volgograd region), *Sensors*, 2022, Vol. 22, No. 16, p. 6153, DOI: <https://doi.org/10.3390/s22166153>.

70. Zhu A.X., Liu F., Li B-L, Tao P., Qin C.-Z., Liu G., Wang Y., Yaning C., Ma X., Qi F., Zhou C., Differentiation of soil conditions over low relief areas using feedback dynamic patterns, *Soil Science Society of America Journal*, 2010, Vol. 74, No. 3, pp. 861–869, DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0411>.

71. Zhu Q., Lin H., Doolittle J., Repeated electromagnetic induction surveys for determining subsurface hydrologic dynamics in an agricultural landscape, *Soil Science Society of America Journal*, 2010, Vol. 74, No. 5, pp. 1750–1762, DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2010.0055>.