

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-5-25



Ссылки для цитирования:

Болотов А.Г., Калиниченко Р.В., Скворцова Е.Б., Шеин Е.В., Дембовецкий А.В., Филь П.П., Хархардинов Н.А., Шумилин П.А., Иванов А.Л. Применение технологии автоматизированного мониторинга режимов почв для интеллектуальных цифровых платформ // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 128. С. 5-25. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-5-25

Cite this article as:

Bolotov A.G., Kalinichenko R.V., Skvortsova E.B., Shein E.V., Dembovetsky A.V., Fil P.P., Kharhardinov N.A., Shumilin P.A., Ivanov A.L., Application of automated soil condition monitoring technology for intelligent digital platforms, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 128, pp. 5-25, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-5-25

Благодарность:

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-545 от 24.04.2024 г.).

Acknowledgments:

The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement No. 075-15-2024-545 dated April 24, 2024).

Применение технологии автоматизированного мониторинга режимов почв для интеллектуальных цифровых платформ

© 2026 г. А. Г. Болотов^{1*}, Р. В. Калиниченко¹, Е. Б. Скворцова¹, Е. В. Шеин^{1,2**}, А. В. Дембовецкий^{2***}, П. П. Филь^{2****}, Н. А. Хархардинов^{1*****}, П. А. Шумилин², А. Л. Иванов¹

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

* <https://orcid.org/0000-0002-8264-3266>, e-mail: bolotov@esoil.ru,

** <https://orcid.org/0000-0002-0101-5293>, e-mail: evgeny.shein@gmail.com,

*** <https://orcid.org/0000-0002-9851-5381>, e-mail: philpaulp@esoil.ru,

**** <https://orcid.org/0000-0002-4084-4991>.

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,
119234, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 12,

<https://orcid.org/0000-0002-8568-504X>.

Поступила в редакцию 23.12.2025, после доработки 17.03.2026,
принята к публикации 29.04.2026

Резюме: Теоретически обоснована и разработана стационарная система автоматизированного измерения гидротермических режимов почв, с помощью которой экспериментально проведены регулярные исследования профильного распределения влажности и температуры почв, а также глубины залегания грунтовых вод в условиях Тверской области (опытное поле ВНИИМЗ) на агродерново-подзолистых оглеенных легкосуглинистых почвах. На основе этих данных построены карты хроноизоплант влажности и температуры почвы. Используя послойные значения почвенно-гидрологических констант (ПГК), определенных из основных гидрофизических характеристик, проанализирован водный режим почв с выделением периодов гравитационного стока, переувлажнения и почвенной засухи в годовом цикле. В течение года в исследуемой толще почвы наблюдаются периоды избытка и недостатка влаги для растений, а также периоды быстрого изменения профилей влажности и температуры, обусловленные метеоусловиями, в частности, в конце октября – начале ноября и в конце апреля. Это требует проведения соответствующих агротехнических и мелиоративных мероприятий на исследованных почвах. Получение, накопление и обработка количественных цифровых данных о водном и температурном режимах почв позволяет применять современные методы анализа динамических свойств почв в составе интеллектуальных цифровых платформ, устанавливать строгое количественное соответствие с метеоданными, определять и прогнозировать время наступления критических периодов и научно обоснованно управлять почвенно-мелиоративными процессами.

Ключевые слова: влажность почвы; температура почвы; режим влажности почвы; водный режим почвы; почвенно-гидрологические константы; хроноизопланты.

Application of automated soil condition monitoring technology for intelligent digital platforms

© 2026 A. G. Bolotov^{1*}, R. V. Kalinichenko¹, E. B. Skvortsova¹,
E. V. Shein^{1,2**}, A. V. Dembovetsky^{2***}, P. P. Fil^{2****},
N. A. Kharhardinov^{1*****}, P. A. Shumilin², A. L. Ivanov¹

¹*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,*

** <https://orcid.org/0000-0002-8264-3266>, e-mail: bolotov@esoil.ru,*

*** <https://orcid.org/0000-0002-0101-5293>, e-mail: evgeny.shein@gmail.com,*

**** <https://orcid.org/0000-0002-9851-5381>, e-mail: philpaulp@esoil.ru,*

***** <https://orcid.org/0000-0002-4084-4991>.*

²*Lomonosov Moscow State University,*

12 Bld. 1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,

**** <https://orcid.org/0000-0002-8568-504X>.*

Received 23.12.2025, Revised 17.03.2026, Accepted 29.04.2026

Abstract: A stationary system for automated measurement of soil hydrothermal regimes has been theoretically substantiated and developed. This system was used to conduct regular experimental studies of layer-by-layer moisture and temperature, as well as the groundwater depth, in the Tver Region (VNIMZ Experimental Field) on agrosod-podzolic gleyed light loamy soils. These data were used to construct chronoisopleth maps of moisture and temperature using digital methods. Using layer-by-layer values of soil-hydrological constants (SHC), determined from the main hydrophysical characteristics, the soil water regime was analyzed, identifying periods of gravitational runoff, swampiness and soil drought in the annual cycle. Throughout the year, the studied soil layer experiences periods of excess and deficiency of moisture for plants, as well as periods of rapid changes in moisture and temperature throughout the profile due to meteorological conditions, particularly in late October, early November, and late April. This requires appropriate agronomic and reclamation measures for the studied soils. Obtaining, accumulating, and processing quantitative digital data on soil water and temperature regimes enables the application of modern methods for analyzing dynamic soil properties within intelligent digital platforms, establishing strict quantitative correlation with meteorological data, identifying and predicting the onset of critical periods, and scientifically managing soil reclamation processes.

Keywords: soil moisture; soil temperature; soil moisture regime; soil water regime; soil-hydrological constants; chronoisopleths.

ВВЕДЕНИЕ

Динамические данные о влажности, температуре и ряде других быстро изменяющихся свойств почв являются основой для их комплексного исследования и управления. На основе этих данных определяются особенности почвенных гидротермических условий,

классификационная принадлежность почв, сравнительная характеристика режимных наблюдений в разных условиях ландшафта, критические периоды быстрых изменений профильных распределений влажности и температуры, влажностные и температурные оптимумы и другие характеристики функционирования почвенного покрова во времени с учетом рельефа и метеоусловий. Именно динамика этих свойств в почвенной толще определяет основные агротехнические приемы, сроки их применения, а также мелиоративные расчеты и мероприятия (Роде, 1952; Димо, 1972; Болдырев, 1981; Емельянов, Маслов, 1985; Добровольский, Никитин, 1990; Зайдельман, 1996; Шестаков, Поздняков, 2003; Кирюшин, 2011). Кроме того, учитывая широкое применение физически обоснованных математических моделей, необходимо экспериментальное обеспечение для их верификации и адаптации к конкретным почвенно-климатическим условиям, прежде всего, по гидро-термическому режиму почвы в строго определенный контролируемый период времени, с использованием почвенно-гидрологических констант (Роде, 1960; Роде, 1961; Зайдельман, 1985; Кирюшин, 2011).

Стоит отметить, что оптимизация режимов почв стратегически более результативна, чем оптимизация их свойств. Также большое значение имеет не только величина параметров, но и их приращение, и градиент. Экспериментальное определение приращений параметров и в целом режимов предполагает повторные измерения в той же самой точке через определенные интервалы времени, что ставит результаты исследования в зависимость от пространственного варьирования измеряемых параметров и их приращений (Дмитриев, 1972; Козловский, 1991). Исследование режимов почв в разных точках ландшафта предопределяет синхронность измерений динамики их свойств.

Традиционно данные о динамике влажности почвы получали буровыми методами, требующими специальной долговременной подготовки, конкретных условий проведения, а также последующего анализа. Эти методы трудоемки, затратны и не всегда удовлетворяют требованиям, в частности, из-за высокой пространственной вариабельности исследуемых свойств, присущей точечным измерениям. В связи с этим ряд авторов (Полуэктов и

др., 2003; Архангельская, 2020; Gerke et al., 2022) считает, что при отсутствии стандартных методов оперативного “on-line” измерения гидротермических режимов почвы и их параметров в реальных условиях агроландшафта единственным надежным способом получения необходимой информации является расчетный метод с использованием тех или иных математических моделей. В то же время предпринимались попытки автоматизированного (с помощью различных приборов) наблюдения за влажностью и температурой почвы. По нашему мнению, наиболее перспективно применение комплекса современных информационных и математических средств моделирования почвенно-атмосферного теплового переноса с измерительными системами, позволяющими получать экспериментальные значения граничных и начальных условий для моделей гидротермического режима почвы. Такой подход позволит сократить долю инструментальных ресурсов при получении информации о почвенных режимах без потери точности и минимизировать работу по экспериментальному обеспечению входных параметров моделей.

Стоит отметить радиометрические методы на основе нейтронных влагомеров (Kodikara et al., 2014), обладающие рядом недостатков: необходимостью калибровки для конкретных почвенно-климатических условий и др.; “точечный” характер наблюдений (Evet et al., 2008; Bogena et al., 2017; Kodikara et al., 2014; Шеин и др., 2019; Nieberding et al., 2023); ряд технико-методических особенностей в виде неравномерной сферы исследования; пристенных эффектов движения влаги и ряда других особенностей (Выржиковский, Кузьмичев, 1968; Емельянов, Маслов, 1985). Это вызвало новую волну методических исследований с применением следующего поколения стационарных датчиков по измерению влажности почвы: кондуктометрических датчиков, гипсовых блоков и пр. (Evet et al., 2008; Abdelal et al., 2025). Однако эти устройства также требовали проверки, поверки, определенных условий применения и присутствия оператора, что ограничивало их применение. В последнее время в почвенно-физических исследованиях широко распространяются диэлькометрические методы (Calamita et al., 2012; Zhu et al., 2019), оптимально сочетающие точность и доступность измерения параметров.

На основе рассмотренных проблем измерения режимов почв был разработан и испытан прототип стационарной системы мониторинга режимов почв в составе т. н. интеллектуальных цифровых платформ, применяющих технологии “Интернета вещей”, искусственного интеллекта и больших данных. Такие платформы являются составной частью цифровых двойников (Кирюшин, 2011; Иванов и др., 2025), способны генерировать новые знания на базе поступающих и уже имеющихся данных, а также предлагать решения. В этом отношении цифровой двойник можно рассматривать как фундаментальный компонент стратегии управления с обратной связью. Виртуальное представление достигается путем моделирования процессов, происходящих в физическом объекте (почве), с использованием математических моделей и автоматической загрузкой больших объемов экспериментальных данных, получаемых в реальном времени с помощью систем сбора данных.

Цель данной работы: разработка и испытание прототипа стационарной системы мониторинга режимов почв.

Задачи:

1) Экспериментально обосновать в полевых условиях использование диэлькометрических датчиков влажности почвы и датчиков уровня грунтовых вод.

2) Установить датчики для наблюдений за послойной динамикой влажности, температуры почвы и уровня грунтовых вод, их дистанционное получение и передачу к пользователю на основе “облачных” технологий (создание функционального прототипа).

3) Обосновать методы представления и анализа динамических данных о режимах влажности и температуры почвы, соответствующие новым возможностям наблюдений и формам получения экспериментальных данных.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на Опытном поле ВНИИМЗ (Тверская область, пос. Эммаусс) на агродерново-подзолистых оглеенных легкосуглинистых почвах (по WRB – Albic Retisol), сформированных на краевой морене. Морфология, свойства, топографическое положение и особенности использования этих почв приведены в нашей ранней работе (Шеин и др., 2022). Почвы

осушены гончарным дренажем на глубине 100–110 см при межд-
ренном расстоянии 30 м. Подстилающая порода – суглинистая
морена, залегающая на глубине 50–110 см.

По данным метеонаблюдений, в 2023–2024 гг. был сформи-
рован высокий снежный покров, и в весенний период наблюда-
лось медленное таяние снега (что негативно сказалось на перези-
мовке озимых культур). Если высота снежного покрова в феврале
достигала 48.1 см, то в результате активного снеготаяния в марте
она составляла 22.1 см, а в апреле снежный покров уже отсутство-
вал. Максимальные дневные температуры в марте, апреле и мае
достигали +17, +23 и +29 °С, ночные соответственно – –13, –3, –
3 °С. Также в мае наблюдались поздние весенние заморозки, кото-
рые также оказали негативное влияние на развитие растений и
урожай озимых. Сумма осадков за 2024 г. составила 592 мм, в том
числе за апрель–сентябрь – 313 мм (53.9% от суммы за год). Агро-
климатические условия 2025 г. в течение вегетационного периода
отличались от среднегодовы показателей. В апреле склады-
вались благоприятные погодные условия для вегетации озимых
культур и многолетних трав. Температура воздуха на протяжении
двух последних декад превышала среднегодовы показатели
на 4 °С. Максимальные дневные температуры в марте, апреле и
мае достигали +15, +27 и +30 °С, ночные, соответственно – –8, –5,
–2 °С. В середине апреля визуально наблюдалась сильно и избы-
точно увлажненная поверхность почвы в результате таяния снега
и выпадения осадков. В весенне-летний период наблюдалось из-
быточное количество осадков – в мае 122% от нормы, в июне в 2
раза выше нормы, а в отдельные декады превышение количества
осадков достигало 293–348%. По данным метеонаблюдений, сум-
ма осадков за 2025 г. составила 567 мм, в том числе за период ап-
рель–июнь – 240 мм (42.3%), а за апрель–сентябрь – 363 мм
(64.0%).

На северном пологом склоне водораздела агроландшафта
были установлены дигизметрические датчики для определения
влажности на глубинах 10, 20, 30, 40, 60 и 100 см и датчики уров-
ня грунтовых вод (УГВ). В точке наблюдения в непосредственной
близости от датчиков был установлен логгер с модулем передачи
данных через интернет в “облачное хранилище”.

В основе диэлькометрических методов лежит зависимость диэлектрической проницаемости почвы от ее влажности. Электромагнитный импульс распространяется вдоль зондовых стержней (или в замкнутом контуре) со скоростью, обратно пропорциональной диэлектрической проницаемости среды. Время прохождения импульса (TDR) или частота колебаний (FDR) измеряются и преобразуются в значение объемной влажности почвы (Bogena et al., 2017; Ramos et al., 2018; Шеин и др., 2019).

Для создания функционального прототипа в качестве первичного преобразователя выбран датчик влажности и температуры (производство КНР), погружаемый на соответствующую глубину в почву, который может применяться при долгосрочном мониторинге данных параметров в режиме реального времени. Измерительная схема расположена в герметичном неразборном водонепроницаемом корпусе с тремя измерительными иглами-зондами из нержавеющей стали. Датчик имеет встроенный аналого-цифровой преобразователь и микроконтроллер управления, производящий вычисления значений влажности почвы и др., передающихся в логгер через цифровой интерфейс RS-485. Основные технические характеристики датчиков, заявленные производителем:

Диапазон измерения объемной влажности: 0–100%.

Погрешность измерения влажности: $\pm 2\%$ (0–50%), подтверждена нами в сравнении с термостатно-весовым способом с учетом плотности сложения почвы; $\pm 3\%$ (50–100%).

Объем почвы, в котором измеряется влажность: $\sim 300 \text{ см}^3$.

Разрешение: 0.03% (0–50%) и 1% (50–100%).

Время измерения: 1 с.

Принцип измерения: FDR ($\sim 100 \text{ МГц}$).

Диапазон измерения температуры: $-40 \dots 85 \text{ }^\circ\text{C}$.

Точность измерения температуры: $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ (разрешение $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$).

Выход: Цифровой интерфейс RS-485 (протокол Modbus RTU).

Схема устройства дистанционного измерения и передачи данных изображена на рисунке 1.

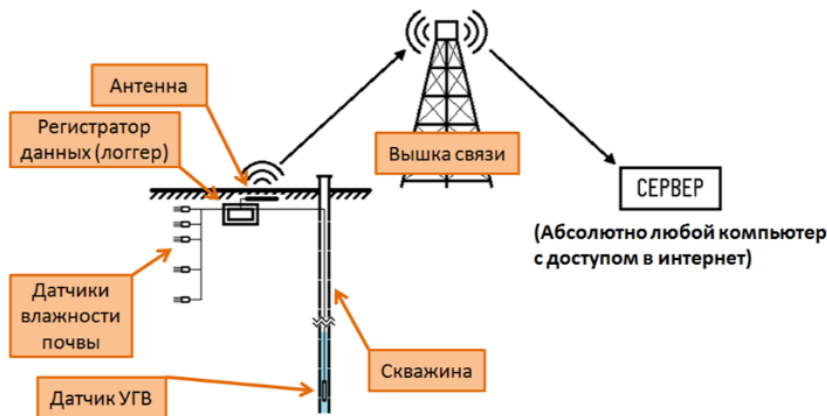


Рис. 1. Схема получения и передачи данных о влажности и температуре почвы через интернет.

Fig. 1. Scheme for receiving and transmitting data on soil moisture and temperature via the Internet.

Выбор интерфейса RS-485 обусловлен возможностью объединения нескольких датчиков в сеть по двухпроводной линии, что удобно для мониторинга почвенного профиля. Адреса устройств в сети настраиваются в диапазоне 1–250.

Для передачи данных через Интернет использовались GSM регистры данных, подключаемые к облачному сервису “Promodem Cloud” (ООО “Аналитик-ТС”, РФ). Функционал облачного сервиса включает: сбор и хранение данных с приборов, отображение информации в виде графиков и таблиц, экспорт массива данных (например, в Excel, txt, cvs) и отображение местоположения приборов на карте.

Переданная регистраторами информация размещается в базе данных, структура которой представлена многомерным кубом и имеет три пространственных уровня: модем – датчик – регистр. В авторском варианте к одному модему подключается до 10 датчиков, каждый из которых содержит несколько десятков регистров. В регистрах отображаются измеряемые параметры и их настройка, включающая калибровочные константы, диапазон измерений, тек-

стуру почвы и номер датчика. Наиболее важными калибровочными константами является текстура почвы: 0 – mineral soil; 1 – sandy soil; 2 – clay; 3 – organic soil. В данной работе применено значение по умолчанию – 0. Как правило, физически измеряются электрические параметры, пропорциональные диэлектрической проницаемости, электропроводности и температуре почвы. Далее на их основе датчик рассчитывает влажность почвы, общее содержание солей и др. В данном исследовании, ввиду отсутствия засоления агродерново-подзолистых почв опытного поля, данные по ЕС не приводятся, но в аридных условиях такие данные могут представлять большую практическую значимость при оценке засоления, расчете промывных норм и т. д. Также были протестированы датчики, измеряющие pH и содержание NPK почвы, но качество полученных данных недостаточно для применения их на практике. Учитывая, что датчики и логгеры можно устанавливать в различных частях агроландшафта, кроме пространственного уровня база данных содержит информацию о времени измерения. При этом время выборки (частота дискретизации) изменяется пользователем и составляет 1 сек. и более.

С помощью описанного выше устройства были получены послойные данные о влажности почвы, а для оценки водного режима почв, т. е. состояния и движения влаги в почве и ее доступности для растений, использовались послойные значения почвенно-гидрологических констант (ПГК): наименьшая влагоемкость (НВ), влажность завядания (ВЗ), максимальная гигроскопичность (МГ). ПГК были рассчитаны по методу секущих Воронина (Воронин, 1986) из основных гидрофизических характеристик (ОГХ), полученных комбинированным методом (капилляриметрия до pF 2.81 и над насыщенными растворами солей в диапазоне pF 2.81–4.20) (Вадюнина, Корчагина, 1986).

Образцы на плотность сложения отбирались классическим буровым методом Качинского. Гранулометрический состав определялся методом лазерной дифрактометрии с предварительной обработкой ультразвуком. Более подробно методика определения описана в работе по исследованию особенностей гранулометрического состава почвенного покрова опытного поля (Шеин и др., 2022).

Динамические данные о послойной влажности, полученные через Интернет, обрабатывались с использованием программы Golden Software Surfer для построения карт хроноизоплет влажности. На эти карты наносились значения ПГК для оценки фаз водного режима (гравитационный сток, легкодоступная влага, недоступная влага).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По данным полевых и лабораторных исследований в понижении северной части водораздела, в месте установки измерительной системы, были определены некоторые водно-физические свойства агродерново-подзолистой почвы, приведенные в таблице 1.

Профиль исследуемой почвы отчетливо разделяется на три слоя по гранулометрическому составу и соответственно по гидрофизическим свойствам, как видно из таблицы 1. Гранулометрический состав показал преобладание мелкозернистого песка по всему профилю с пиком 70–100 мкм. Верхний слой (0–30 см) сложен средним суглинком, который сменяется на глубине 30–50 опесчаным суглинком и затем с 50 см – надморенным средним суглинком.

В результате непрерывных дистанционных наблюдений с 15 июля 2024 г. по 15 июля 2025 г. с суточным интервалом был получен обширный массив данных о динамике объемной влажности и температуры в почвенном профиле, а также об уровне грунтовых вод. Измерение проводилось в одно и то же время суток для исключения влияния суточных температур почвы. Эти данные послужили основой для построения карт хроноизоплет влажности и температуры почвы (рис. 2). В верхней части рисунка 2 (а, б) представлены также данные по осадкам и температуре воздуха из архива погоды Тверской метеостанции. Хроноизоплеты наглядно отображают пространственно-временное распределение влажности и температуры по профилю.

Таблица 1. Некоторые водно-физические свойства агродерновой почвы
Table 1. Some water-physical properties of agroturf soil

Глубина, см	Содержание физ. глины, %	Содержание фракций, %			Название		Плотность почвы, г/см ³	ПГК, % (массовые)		
		Clay (<2 мкм)	Silt (2–50 мкм)	Sand (50–2 000 мкм)	по Качинскому	по USDA		НВ	ВЗ	МГ
0–10	31.59	7.41	55.46	37.13	суглинок средний	пылеватый суглинок	1.07	23.0	7.7	5.7
10–20	32.08	7.84	54.2	37.95	суглинок средний	пылеватый суглинок	1.27	20.2	6.7	5.0
20–30	24.97	6.53	49.26	44.21	суглинок легкий	суглинок	1.15	17.0	5.3	4.1
30–40	15.64	4.42	41.83	53.75	супесь	опесчаный суглинок	1.54	13.7	3.2	2.3
40–50	16.15	5.25	33.3	61.46	супесь	опесчаный суглинок	1.75	11.5	3.6	2.9
50–60	33.41	10.17	48.61	41.22	суглинок средний	суглинок	1.71	15.7	6.6	5.4

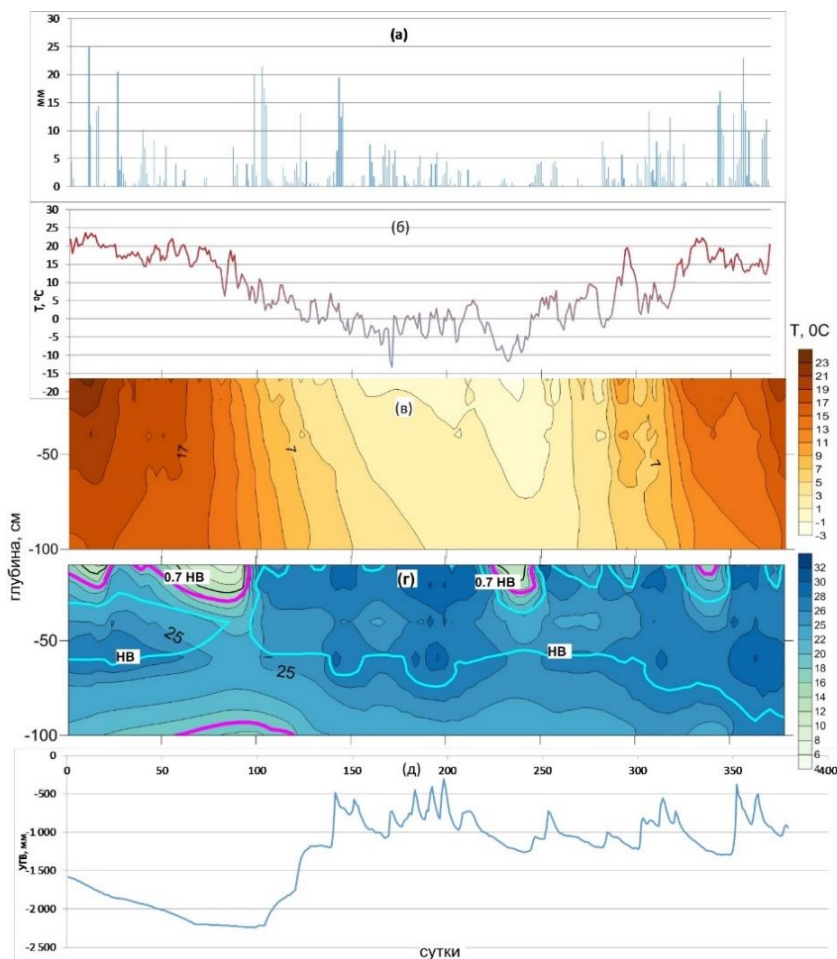


Рис. 2. (а) – осадки, (б) – температура воздуха, (в) – хроноизоплеты температуры, (г) – объемной влажности, (д) – уровень грунтовых вод агродерново-подзолистой почвы (Опытное поле ВНИИМЗ) за период 15.07.2024–15.07.2025. **Примечание:** на хроноизоплетах влажности нанесены почвенно-гидрологические константы (НВ – наименьшая влагоемкость, 0.7НВ).

Fig. 2. (а) – precipitation, (б) – air temperature, (в) – temperature chronopleths, (г) – volumetric moisture content, (д) – groundwater level of agrosod-podzolic soil (VNIIMZ experimental field) for the period 15.07.2024–

15.07.2025. **Note:** Soil-hydrological constants (HV – least moisture capacity, 0.7HV) are plotted on the moisture chrono-isopleths.

Анализ полученных хроноизоплет в комплексе с нанесенными значениями ПГК позволил детально охарактеризовать водный режим исследуемой почвы и выявить критические периоды.

На графиках отчетливо видны периоды резкого изменения влажности во всем профиле, связанные в основном с интенсивными осадками. Особенно четко выражены периоды стремительного увлажнения почвенной толщи в конце октября – начале ноября (формирование осенних запасов влаги) и иссушения в конце сентября – начале октября. Период в конце апреля также характеризуется значительными изменениями влажности, связанными с началом снеготаяния и вегетации. По хроноизоплетам температуры почвы также наблюдается резкое снижение температуры осенью (конец октября – ноябрь) и ее повышение весной (апрель) – периоды, определяющие сроки проведения агротехнических мероприятий (закрытие влаги, посев).

Анализ хроноизоплет влажности позволил выделить основные фазы водного режима. По ним видно, что практически на протяжении всего исследуемого периода в верхних слоях (20–60 см) присутствует гравитационный сток (влажность > HV), особенно после сильных дождей осенью и весной. Зоны легкодоступной влаги (HV – 0.7HV) отмечаются в летний период в верхних слоях корнеобитаемого слоя и частично в нижних при снижении УГВ. Зоны недоступной влаги (< BЗ) зафиксированы не были.

Карты хроноизоплет с нанесенными ПГК являются ключевым документом для характеристики водного режима, оценки длительности и глубины проявления его критических фаз (гравитационный сток, дефицит влаги), что необходимо для планирования дренажа, орошения и других мелиоративных мероприятий (Выржиковский, Кузьмичев, 1968; Добровольский, Никитин, 1990).

Преимущества предложенного подхода и устройства дистанционного измерения влажности и температуры, регулярность и синхронность измерений позволит установить количественные связи между метеорологическими условиями (осадки, температура

воздуха) и динамикой влажности/температуры в почвенном профиле, что является необходимой информацией для верификации математических моделей.

Непрерывный мониторинг с относительно высоким временным разрешением (сутки, с возможностью уменьшения интервала) позволил зафиксировать короткие, но важные периоды резкого изменения свойств (увлажнение/иссушение, промерзание/оттаивание), которые легко пропустить при традиционных редких и затратных измерениях. Приведем примеры из проведенного эксперимента: кратковременное увлажнение пахотного горизонта после снеготаяния (период с 250-го по 270-ый, с 280-го по 300-й день); промачивание всего почвенного профиля до грунтовых вод (период с 300-го по 320-ый день); 5–10-дневные моменты переувлажнения пахотного горизонта в 150-й, 250-й, 320-й дни; закономерное периодическое, в данном случае импульсное, подтягивание грунтовых вод в холодный период.

Регулярное получение идентичных по формату данных с разных участков или глубин создает основу для строгого статистического сравнения их водного и температурного режимов (например, с использованием критерия Стьюдента), что актуально для выделения зон с разной влагообеспеченностью в агроландшафте.

Предложенный метод дистанционного измерения влажности и температуры почв стимулирует развитие подходов к анализу данных. С его помощью можно идентифицировать и более детально изучить “критические периоды” с возможным изменением частоты опроса датчиков.

Появляется возможность пространственно-статистического анализа водных режимов почв и гидрофизических свойств на основе обратной задачи в сложном почвенном покрове.

Не до конца решен вопрос о влиянии инструментальной точности измеряемых параметров на режимы, учитывая неоднородность почв по гранулометрическому составу, что потребует дальнейших методических исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и апробирован функциональный прототип си-

стемы сбора и дистанционной передачи данных о послойной влажности, температуре почвы и уровне грунтовых вод с использованием диэлькометрических датчиков и облачных технологий.

Получен массив непрерывных данных с суточным интервалом за период июнь 2024 г. – апрель 2025 г. На основе этих данных построены характеристические карты хроноизоплет влажности и температуры, что обеспечило наглядное представление пространственно-временной динамики гидротермического режима исследуемой агродерново-подзолистой почвы.

Использование почвенно-гидрологических констант, нанесенных на хроноизоплеты влажности, позволило детально проанализировать водный режим почвы, выделить периоды гравитационного стока, легкодоступной и недоступной влаги, а также выявить критические периоды резкого изменения влажности (конец сентября – начало октября, конец октября – начало ноября, конец апреля) и температуры (конец октября – ноябрь, апрель) во всем профиле.

Ключевым преимуществом предложенного подхода является возможность синхронного получения информации в различных точках агроландшафта с ее дистанционной передачей, что позволяет: 1) устанавливать количественные соответствия между метеоусловиями и почвенными режимами; 2) надежно фиксировать короткие, но агрономически значимые критические периоды резкого изменения влажности и температуры; 3) проводить статистическое сравнение водных режимов разных почв или почвенных слоев; 4) оперативно использовать почвенные данные для управления мелиоративными процессами и прогнозирования критических периодов.

Применение данного подхода открывает новые возможности для анализа данных, включая фокусировку на критических периодах, пространственно-статистическую оценку режимов в сложном покрове и уточнение стратегий калибровки датчиков в зависимости от решаемых задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Архангельская Т.А.* Параметры зависимости температуропроводности минеральных почв от влажности для различных текстурных классов // Почвоведение. 2020. № 1. С. 44–55.
2. *Болдырев А.Г.* Физические свойства почв как теоретическая основа прогноза их уплотнения // Влияние сельскохозяйственной техники на почву. М.: Наука, 1981. С. 80–85.
3. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
4. *Воронин А.Д.* Основы физики почв. М.: Изд-во Моск.ун-та, 1986. 244 с.
5. *Выржиковский Л.В., Кузьмичев Д.С.* Определение влажности торфа емкостным влагомером // Мелиорация и использование осушенных земель. Минск: Урожай, 1968. Т. XVI.
6. *Димо В.Н.* Тепловой режим почв СССР. М., 1972. 359 с.
7. *Дмитриев Е.А.* Математическая статистика в почвоведении. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1972. 292 с.
8. *Добровольский Г.В., Никитин Е.Д.* Функции почв в биосфере и экосистемах. М.: Наука, 1990. 259 с.
9. *Емельянов В.А., Маслов В.П.* Пространственно-временная изменчивость плотности почвы на орошаемых землях // Докл. ВАСХНИЛ. 1985. № 5. С. 8–10.
10. *Зайдельман Ф.Р.* Гидрологический режим почв Нечерноземной зоны. Генетические, агрономические и мелиоративные аспекты. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 328 с.
11. *Зайдельман Ф.Р.* Мелиорация почв. М.: Изд-во МГУ, 1996. 382 с.
12. *Иванов А.Л., Болотов А.Г., Козлов Д.Н. и др.* Цифровые двойники почв как новый технологический уклад генетического и прикладного почвоведения // Почвоведение. 2025. № 6. С. 757–770.
13. *Кирюшин В.И.* Теория адаптивно-ландшафтного земледелия и проектирования агроландшафтов. М.: Колос, 2011. 443 с.
14. *Козловский Ф.И.* Современные естественные и антропогенные процессы эволюции почв. М.: Наука, 1991. 196 с.
15. *Полуэктов Р.А., Опарина И.В., Терлеев В.В.* Оперативный расчет и прогноз динамики почвенной влаги // Фундаментальные физические исследования в почвоведении и мелиорации. 2003. С. 241–244.
16. *Роде А.А.* К вопросу о “водно-физических константах” почвы // Почвоведение. 1961. № 6. С. 20.
17. *Роде А.А.* Методы изучения водного режима почв. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 244 с.

18. Роде А.А. Почвенная влага. М.: Изд-во АН СССР, 1952. 445 с.
19. Теории и методы физики почв / Под ред. Е.В. Шеина и Л.О. Карпачевского. М.: Гриф и К, 2007. 616 с.
20. Шеин Е.В., Болотов А.Г., Умарова А.Б., Дембовецкий А.В., Гончаров В.М., Фаустова Е.В., Шнырев Н.А., Кокорева А.А. Руководство по использованию цифровых датчиков в режимных наблюдениях на полевой практике по физике почв. М.: ООО “Книжный дом университета”, 2019. 52 с.
21. Шеин Е.В., Иванов Д.А., Болотов А.Г., Дембовецкий А.В. Гранулометрический состав почв конечно-моренной гряды Верхневолжского постледникового района (Восточно-Европейская равнина, Тверская область) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 110. С. 5–21. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-110-5-21>.
22. Шестаков В.М., Поздняков С.П. Геогидрология. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2003. 176 с.
23. Abdelal Q., Al-Kilani M.R., Al-Shishani G. Impact of soil particle size on soil moisture measurements through dielectric and electrical resistance properties // Eurasian Soil Science. 2025. Vol. 58(3). P. 32. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229324602270>.
24. Bogaen H.R., Huisman J.A., Schilling B., Weuthen A., Vereecken H. Effective calibration of low-cost soil water content sensors // Sensors in Agriculture and Forestry. 2017. Vol. 17. P. 208. DOI: <https://doi.org/10.3390/s17010208>.
25. Calamita G., Brocca L., Perrone A., Piscitelli S., Lapenna V., Melone F., Moramarco T. Electrical resistivity and TDR methods for soil moisture estimation in central Italy test-sites // Journal of Hydrology. 2012. Vol. 454. P. 101–112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.001>.
26. Evet S.R., Hang L.K., Motonet P., Nguyen M.L. Field estimation of soil water content: A practical guide to methods, instrumentation, and sensor technology, In: IAEA. Vienna, 2008. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TCS-30_web.pdf.
27. Gerke H.H., Vogel H.-J., Weber T.K.D., van der Meij W.M., Scholten T. 3–4D soil model as challenge for future soil research: Quantitative soil modeling based on the solid phase // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2022. Vol. 185. P. 720–744. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.202200239>.
28. Ramos Hernández J.G., Gracia-Sánchez J., Rodríguez-Martínez T.P., Zuñiga-Morales J.A. Correlation between TDR and FDR soil moisture measurements at different scales to establish water availability at the south of the Yucatan Peninsula. Chapter 4. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.81477>.

29. Kodikara J., Rajeev P., Chan D., Gallage C. Soil moisture monitoring at the field scale using neutron probe // *Canadian Geotechnical Journal*. 2014. Vol. 51(3). P. 332–345. DOI: <https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0113>.
30. Nieberding F., Huisman J.A., Huebner C., Schilling B., Weuthen A., Bogena H.R. Evaluation of three soil moisture profile sensors using laboratory and field experiments // *Sensors*. 2023. Vol. 23(14). P. 6581. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23146581>.
31. Singh J., Heeren D.M., Rudnick D.R., Woldt W.E., Bai G., Ge Y., Luck J.D. Soil structure and texture effects on the precision of soil water content measurements with a capacitance-based electromagnetic sensor // *Transactions of the ASABE*. 2020. Vol. 63(1). P. 141–152. DOI: <https://doi.org/10.13031/trans.13496>.
32. Zhu Y., Irmak S., Jhala A.J., Vuran M.C., Diotto A. Time-domain and frequency-domain reflectometry type soil moisture sensor performance and soil temperature effects in fine-and coarse-textured soils // *Applied Engineering in Agriculture*. 2019. Vol. 35(2). P. 117–134. DOI: <https://doi.org/10.13031/aea.12908>.

REFERENCES

1. Arkhangelskaya T.A., Parameters of the thermal diffusivity versus water content function for mineral soils of different textural classes, *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53 (1), pp. 39-49.
2. Boldyrev A.G., Physical properties of soils as a theoretical basis for predicting their compaction, In: *The influence of agricultural machinery on the soil*, Moscow: Science, 1981, pp. 80–85. (In Russ.)
3. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A., *Methods for studying the physical properties of soils*, Moscow: Agropromizdat, 1986, 416 p. (In Russ.)
4. Voronin A.D., Fundamentals of soil physics, Moscow: Moscow University Publishing House, 1986, 244 p. (In Russ.)
5. Vyrzhikovskiy L.V., Kuzmichev D.S., Determination of peat moisture content with a capacitive moisture meter, In: *Reclamation and use of drained lands*, Minsk: Urozhai, 1968, Vol. XVI. (In Russ.)
6. Dimo V.N. Thermal regime of soils of the USSR, Moscow, 1972, 359 p. (In Russ.)
7. Dmitriev E.A., Mathematical statistics in soil science, Moscow: Moscow University Publishing House, 1972, 292 p. (In Russ.)
8. Dobrovolsky G.V., Nikitin E.D., *Soil functions in the biosphere and ecosystems*, Moscow: Nauka, 1990, 259 p. (In Russ.)

9. Emelianov V.A., Maslov V.P., Spatio-temporal variability of soil density on irrigated lands, *Reports of the All-Union Academy of Agricultural Sciences*, 1985, No. 5, pp. 8–10. (In Russ.)
10. Zaidelman F.R., *Hydrological regime of soils of the Non-Chernozem Zone. Genetic, Agronomic, and Ameliorative Aspects*, Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, 328 p. (In Russ.)
11. Zaidelman F.R., *Soil melioration*, Moscow: Moscow State University Publishing House, 1996, 382 p. (In Russ.)
12. Ivanov A.L., Bolotov A.G., Kozlov D.N., Vasilyeva N.A., Vladimirov A.A., Vasiliev T.A., Khorosheva L.O., Dukhanin Yu.A., Digital twins of soils as a new technological paradigm in genetic and applied soil science, *Eurasian Soil Science*, 2025, Vol. 58, No. 6, pp. 1–12.
13. Kiryushin V.I., *Theory of adaptive-landscape agriculture and design of agricultural landscapes*, Moscow: Kolos, 2011, 443 p. (In Russ.)
14. Kozlovsky F.I., *Modern natural and anthropogenic processes of soil evolution*, Moscow: Nauka, 1991, 196 p. (In Russ.)
15. Poluektov R.A., Oparina I V., Terleev V.V., Operational calculation and forecast of soil moisture dynamics, *Proc. Conf. Fundamental physical research in soil science and land reclamation*, 2003, pp. 241–244.
16. Rode A.A., On the issue of “water-physical constants” of soil, *Eurasian Soil Science*, 1961, No. 6, pp. 20. (In Russ.)
17. Rode A.A., *Methods for studying the water regime of soils*, Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1960, 244 p. (In Russ.)
18. Rode A.A., *Soil moisture*, Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1952, 445 p. (In Russ.)
19. Shein E.V., Karpachevsky L.O., Theories and methods of soil physics, Moscow: Grif i K, 2007, 616 p. (In Russ.)
20. Shein E.V., Bolotov A.G., Umarova A.B., Dembovetsky A.V., Goncharov V.M., Faustova E.V., Shnyrev N.A., Kokoreva A.A., Guide to the use of digital sensors in field observations on soil physics, Moscow: ООО “Knizhnyy Dom Universitet”, 2019, 52 p.
21. Shein E.V., Ivanov D.A., Bolotov A.G., Dembovetskiy A.V., Granulometric composition of the finite moraine ridge soils of the Upper Volga postglacial region (East European plain, Tver region), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2022, Vol. 110, pp. 5–21, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-110-5-21>. (In Russ.)
22. Shestakov V.M., Pozdnyakov S.P., *Geohydrology*, Moscow: ITC “Akademkniga”, 2003, 176 p. (In Russ.)
23. Abdelal Q., Al-Kilani M.R., Al-Shishani G., Impact of soil particle size on soil moisture measurements through dielectric and electrical resistance

- properties, *Eurasian Soil Science*, 2025, Vol. 58(3), pp. 32, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229324602270>.
24. Bogen H.R., Huisman J.A., Schilling B., Weuthen A., Vereecken H., Effective calibration of low-cost soil water content sensors, *Sensors in Agriculture and Forestry*, 2017, Vol. 17, pp. 208, DOI: <https://doi.org/10.3390/s17010208>.
25. Calamita G., Brocca L., Perrone A., Piscitelli S., Lapenna V., Melone F., Moramarco T., Electrical resistivity and TDR methods for soil moisture estimation in central Italy test-sites, *Journal of Hydrology*, 2012, Vol. 454, pp. 101–112, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.001>.
26. Evet S.R., Hang L.K., Motonet P., Nguyen M.L., Field estimation of soil water content: A practical guide to methods, instrumentation, and sensor technology, In: IAEA, Vienna, 2008, URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TCS-30_web.pdf.
27. Gerke H.H., Vogel H.-J., Weber T.K.D., van der Meij W.M., Scholten T., 3–4D soil model as challenge for future soil research: Quantitative soil modeling based on the solid phase, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2022, Vol. 185, pp. 720–744, DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.202200239>.
28. Ramos Hernández J.G., Gracia-Sánchez J., Rodríguez-Martínez T.P., Zuñiga-Morales J.A., Correlation between TDR and FDR soil moisture measurements at different scales to establish water availability at the south of the Yucatan Peninsula, Chapter 4, 2018, DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.81477>.
29. Kodikara J., Rajeev P., Chan D., Gallage C., Soil moisture monitoring at the field scale using neutron probe, *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, Vol. 51(3), pp. 332–345, DOI: <https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0113>.
30. Nieberding F., Huisman J.A., Huebner C., Schilling B., Weuthen A., Bogen H.R., Evaluation of three soil moisture profile sensors using laboratory and field experiments, *Sensors*, 2023, Vol. 23(14), pp. 6581, DOI: <https://doi.org/10.3390/s23146581>.
31. Singh J., Heeren D.M., Rudnick D.R., Woldt W.E., Bai G., Ge Y., Luck J.D., Soil structure and texture effects on the precision of soil water content measurements with a capacitance-based electromagnetic sensor, *Transactions of the ASABE*, 2020, Vol. 63(1), pp. 141–152, DOI: <https://doi.org/10.13031/trans.13496>.
32. Zhu Y., Irmak S., Jhala A.J., Vuran M.C., Diotto A., Time-domain and frequency-domain reflectometry type soil moisture sensor performance and soil temperature effects in fine-and coarse-textured soils, *Applied Engineering in Agriculture*, 2019, Vol. 35(2), pp. 117–134, DOI: <https://doi.org/10.13031/aea.12908>.