

===== **СТАТЬИ** =====

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-5-26



Ссылки для цитирования:

Иванов А.Л., Болотов А.Г., Филь П.П., Баматов И.М. Подземная распределенная сеть мониторинга состояния почвы // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 129. С. 5-26.
DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-5-26

Cite this article as:

Ivanov A.L., Bolotov A.G., Fil P.P., Bamatov I.M., Underground distributed IoT soil monitoring network, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 129, pp. 5-26,
DOI: 10.19047/0136-1694-2026-129-5-26

Благодарность.

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

Вклад авторов. А.Л. Иванов – концептуализация; А.Г. Болотов – концептуализация, написание текста; П.П. Филь – концептуализация, методология, проведение исследования, написание текста; И.М. Баматов – проведение исследования.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных.

Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

Acknowledgments.

The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2024-545 dated April 24, 2024).

Authors' contributions. A.L. Ivanov – conceptualization; A.G. Bolotov – conceptualization, writing; P.P. Fil – conceptualization, methodology, investigation, writing; I.M. Bamatov – investigation.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies.

No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability.

All data obtained during this study are included in the published article.

Подземная распределенная сеть мониторинга состояния почвы

© 2026 г. А. Л. Иванов¹, А. Г. Болотов^{1*}, П. П. Филь^{1**},
И. М. Баматов²

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

*<https://orcid.org/0000-0002-8264-3266>,

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

²Всероссийский научно-исследовательский институт мелиорированных
земель – филиал Почвенного института им. В.В. Докучаева, Россия,
170530, Тверская обл., п. Эммаусс, 27.

Поступила в редакцию 02.12.2025, после доработки 28.05.2026,
принята к публикации 21.08.2026

Резюме: В работе рассматривается возможность использования технологии узкополосной фазоманипулирующей связи для реализации системы мониторинга подповерхностных слоев почв. Полевые испытания проведены в 2024 г. на агрополигоне ВНИИМЗ (Тверская область) на дерново-подзолистых среднесуглинистых почвах. Три радиомодема NB-Fi BT100 последовательно размещались в девяти точках на расстояниях порядка 300–1300 м от базовой станции и заглублялись на 20 и 40 см, имитируя работу узлов подземной сети. Телеметрические данные передавались один раз в сутки, качество радиоканала оценивалось по значениям отношения сигнал/шум и мощности принимаемого сигнала (SNR и RSSI). Выявлено, что при установке радиомодемов на глубине 20–40 см устойчивый прием информационных пакетов на наземной базовой станции сохраняется во всем диапазоне расстояний, а значения SNR (~5–25 дБ, с максимумами до 30–33 дБ) и RSSI (от -90 до -140 дБм) остаются выше порогов чувствительности приемника. Таким образом, эксперимент продемонстрировал, что рассматриваемая технология может быть использована в качестве подземного канала связи при создании

распределенных систем мониторинга состояния подповерхностных слоев почв без вывода антенн на поверхность.

Ключевые слова: подземные сенсорные сети; мониторинг почв; агроландшафты; беспроводные сети датчиков.

Underground distributed IoT soil monitoring network

© 2026 A. L. Ivanov¹, A. G. Bolotov^{1*}, P. P. Fil^{1**},
I. M. Bamatov²

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>,*

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

²*All-Russian Research Institute of Reclaimed Lands –
V.V. Dokuchaev Soil Science Institute affiliation,
27 Emmaus, Tver Region 170530, Russian Federation.*

Received 02.12.2025, Revised 28.05.2026, Accepted 21.08.2026

Abstract: This paper examines the feasibility of using a narrowband phase-shift keying (PSK) communication technology to implement a subsurface soil monitoring system. Field trials were carried out in 2024 at the VNIIMZ agro-experimental site (Tver Oblast, Russia) on loamy sod-podzolic soils. Three NB-Fi BT100 radio modems were deployed sequentially at nine locations at distances of about 300–1300 m from the base station and buried at depths of 20 and 40 cm to emulate underground network nodes. Telemetry data were transmitted once per day, and the radio link quality was evaluated using the signal-to-noise ratio (SNR) and the received signal strength indicator (RSSI). It was found that when the radio modems were installed at depths of 20–40 cm, stable reception of data packets was maintained over the entire range of distances, while SNR values (~5–25 dB, with maxima up to 30–33 dB) and RSSI values (from –90 to –140 dBm) remained above the receiver sensitivity thresholds. Thus, the experiment demonstrates that the considered technology can be used as a subsurface communication channel for distributed soil monitoring systems without bringing antennas to the surface.

Keywords: underground sensor networks; soil monitoring; agricultural landscapes; wireless sensor networks.

ВВЕДЕНИЕ

Усиление изменчивости климата сопровождается не только ростом средних температур, но и увеличением внутрисезонной и межгодовой изменчивости осадков, частоты засух, паводков и других экстремальных событий. Современные оценки и модельные расчеты показывают, что во многих аграрных регионах мира ожидается не только однозначное изменение, но и рост контрастности водного режима почв: учащение периодов дефицита влаги и экстремальных почвенных засух, с одной стороны, и эпизодов переувлажнения и застойного увлажнения (в том числе весеннего) – с другой (Hersbach et al., 2020; Национальный доклад, 2018). Для землепользователей это означает снижение надежности долгосрочного планирования, основанного на усредненных климатических показателях. В данных условиях возрастает роль оперативного мониторинга состояния почвенно-растительной системы и развития наряду с долгосрочным стратегическим планированием, более ситуационного, краткосрочного, адаптивного управления агротехнологиями, опирающегося на технологии цифровых двойников почв агроэкосистем.

На этом фоне автоматизированные системы регулярного сбора и передачи данных становятся ключевым элементом как фундаментальных исследований почв – изучения их генезиса, функционирования, гидрологических и биогеохимических процессов, так и прикладных задач: оптимизации агротехнологий и оперативной поддержки хозяйственных решений (Zhang et al., 2024; Finke, 2012). Уже сегодня современные автоматизированные технологии мониторинга позволяют получать непрерывные измерения состояния почвы, что дает возможность исследователям сосредотачиваться на анализе данных, а не на их ручном сборе, и своевременно реагировать на изменения внешних условий.

При этом традиционные автоматизированные системы мониторинга почв в сельском хозяйстве на основе сетей GSM, Bluetooth, ZigBee, LoRa, Wi-Fi имеют существенные ограничения. Наиболее критичным из них является необходимость размещения антенн и источников энергии над поверхностью почвы (Da Silva et al., 2013; Cariou et al., 2023; Национальный доклад, 2021). В усло-

виях работы сельскохозяйственной техники это часто приводит к повреждению оборудования, вынужденному размещению точек мониторинга лишь на границах полей, а также нарушению условий эксперимента, когда технике приходится объезжать датчики. Эти проблемы особенно проявляются на тех участках, где требуется высокая пространственная детализация измерений, например, при пространственном изучении водного режима.

Технологии подземного интернета вещей (Internet of Underground Things, IoUT) представляют собой альтернативный подход, позволяющий полностью погружать устройства под землю без вывода антенн, солнечных панелей и кабельных соединений на поверхность (Vuran et al., 2018; Филь и др., 2024). Такие подземные системы менее подвержены повреждениям и могут размещаться в любой точке поля, решая ключевую проблему передачи сигнала сквозь почву.

Одной из технологий, потенциально способной обеспечить связь в подземной среде, является протокол NB-Fi (Narrowband Fidelity). Стандарт NB-Fi использует узкополосную фазовую модуляцию сигнала с высокой дискретностью изменения частот и помехоустойчивым кодированием сигнала, обеспечивая высокую чувствительность приема до -150 дБм и высокую потенциальную проникаемость сигнала.

Гипотеза исследования заключалась в том, что благодаря особенностям передачи и декодирования сигнал NB-Fi способен проникать через экранирующую среду – почву. Для ее проверки был проведен эксперимент по передаче сигнала из-под поверхности почвы с использованием NB-Fi-логгеров. Целью исследования являлось определение способности узкополосной фазоманипулирующей технологии передачи данных обеспечивать устойчивый канал связи *in situ* и выявление факторов (глубина установки, расстояние до базы), которые наиболее существенно влияют на успешность доставки информационных пакетов.

IOUT: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ

Подземные IoUT-системы изначально активно развивались в горной промышленности и подземной городской инфраструктуре

и лишь затем были адаптированы для задач сельского хозяйства. Эти технологии используются для мониторинга вентиляционных шахт глубоких и сверхглубоких рудников (Pathegama et al., 2017; Anvari, Benndorf, 2025), для мониторинга угольных шахт (Li, Liu, 2009). IoUT устройства применяются для контроля параметров городских подземных вентиляционных систем (температуры, влажности, давления воздуха) (Santos et al., 2022), комплексные IoUT-решения – для экологического и производственного мониторинга в подземных выработках (Zhang et al., 2023). Во многих случаях реализуются системы на базе ZigBee/Sigfox/Lora и других промышленных беспроводных сетей, интегрированных с ГИС (We et al., 2011; Moridi et al., 2015). Одновременно развивается направление подземных параллельных вычислений: предварительная фильтрация и анализ данных выполняются на локальных шлюзах, что снижает нагрузку на каналы связи с облаком и уменьшает задержки обратного отклика (Wu et al., 2019; Bing et al., 2023; Liu et al., 2021). Фундаментальные ограничения подземного канала связи (затухание, зависимость от свойств среды, энергетические ограничения) являются общими для разных хозяйственных отраслей, тогда как сельскохозяйственные WUSN/IoUT добавляют к ним свою специфику.

Существующие решения для подземной беспроводной связи можно условно разделить на несколько классов в зависимости от физического принципа передачи сигнала. Наиболее разработаны системы на базе электромагнитных (ЭМ) волн с дипольными или монополярными антеннами. Для них детально описано поведение канала связи “почва–почва” и “почва–воздух” с учетом диэлектрической проницаемости, проводимости и объемной влажности почвы (Vuran, Akyildiz, 2010; Sadeghioon et al., 2017; Huang et al., 2020). Полевые эксперименты показывают, что затухание ЭМ-сигнала в почве в диапазоне от сотен мегагерц до нескольких гигагерц на порядок выше, чем в воздухе, и резко возрастает с увеличением глубины, содержания воды и солей. Поэтому устойчивая связь достигается либо на очень малых глубинах (10–30 см), либо при использовании сильно пониженных частот и малых дистанций между узлами сети.

На этой основе развиваются решения на базе LoRa/LoRaWAN. В работе (Hardie, Hoyle, 2019) показано, что при использовании 433 МГц LoRa в почвах устойчивый прием возможен при заглублении радиомодемов до 10–20 см в относительно сухих условиях; при увеличении влажности или глубины связь быстро теряется. L. Moiroux-Arvis и соавторы (Moiroux-Arvis et al., 2022) количественно сравнили проникаемость сигнала на частотах 433 и 868 МГц в сценарии “подземный радиомодем – наземный приемник” и показали, что на частоте 433 МГц запас по уровню сигнала и дальности существенно выше, но и он остается сильно ограниченным при увеличении влажности выше 50% полной влагоемкости и утяжелении гранулометрического состава почвы. Похожие выводы получены для LoRa-сетей в почвах при мониторинге земляных плотин (Liang et al., 2023). Тем не менее, LoRa-решения для подземных систем мониторинга остаются компромиссом: они используют зрелую массовую технологию LPWAN, но рассчитаны прежде всего на надземный канал, и их сигнал быстро затухает в почве.

Проведенное Р. Levchenko и соавторами сравнение NB-Fi с другими массовыми LPWAN-технологиями (LoRaWAN, Sigfox) показало, что при сопоставимых частотно-энергетических ресурсах NB-Fi особенно эффективен в сценариях передачи небольших объемов данных, характерных для телеметрии, например, разовых сообщений о значениях влажности почвы (Levchenko et al., 2022). В таких условиях NB-Fi сигнал имеет более низкую вероятность потерь пакетов по сравнению с альтернативными решениями. При этом NB-Fi изначально разрабатывался для “классических” IoT-задач – учета энергоресурсов, ЖКХ, мониторинга городской инфраструктуры и окружающей среды (Bankov et al., 2022; ГОСТ Р 70036-2022, 2022; WAVEIoT, 2025), то есть для надземных условий с относительно благоприятным радиоканалом.

Несмотря на быстрое развитие NB-Fi как национального стандарта в Российской Федерации и накопление данных по городским и промышленным IoT-сценариям, работ, посвященных применению NB-Fi для мониторинга почв, пока нет. В доступной литературе не рассматриваются особенности распространения NB-Fi-сигнала в почве и в системе “почва–воздух”. В этой связи в

настоящей работе ставится задача оценки возможности применения технологии NB-Fi при размещении логгеров под поверхностью почвы и рассмотрения возможности доставки данных на сервер без вывода антенн на дневную поверхность.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Полевые исследования проводились в 2024 г. на опытном участке ФГБНУ “Всероссийский НИИ мелиорированных земель” (ВНИИМЗ), расположенном в Калининском районе Тверской области, в окрестностях поселка Эммаусс. Территория полигона находится в южнотаежной подзоне хвойно-широколиственных лесов. В физико-географическом отношении участок приурочен к Верхневолжской низменности, представляющей собой озерно-водноледниковую равнину, осложненную моренными грядами (рис. 1). Агроклиматические условия полигона характеризуются умеренно влажным климатом с избыточным или близким к избыточному увлажнению. По данным ближайшей метеостанции “Тверь” среднегодовое количество атмосферных осадков составляет порядка 650–700 мм, низкая теплообеспеченность определяет формирование дерново-подзолистых почв. Значительная часть территории осушена закрытым дренажем глубиной около 1 м с расстоянием между дренами 20–40 м.

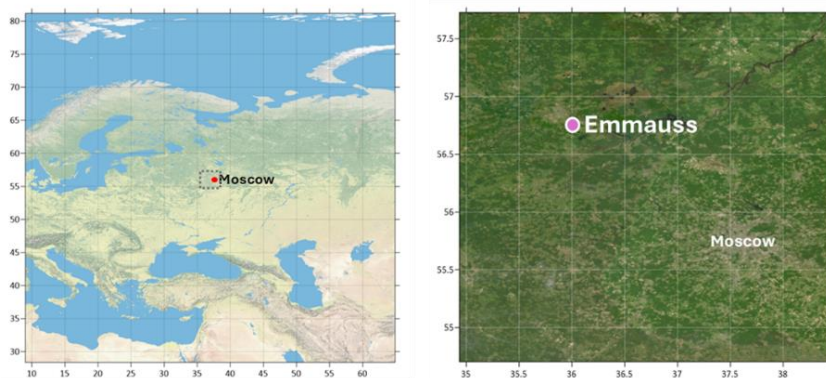


Рис. 1. Расположение участка проведения эксперимента.

Fig. 1. Location of the experimental site.

Рельеф опытного поля слабоволнистый, центральная, более приподнятая, часть участка приурочена к моренной гряде с абсолютными отметками до ~165 м н. у. м. и сложена суглинистой мореной с тонкой покровной толщей более легких отложений. Мощность песчано-супесчаной толщи существенно варьирует (от 10–20 см до 2–3 м) (Шеин и др., 2023).

В задачи эксперимента входило количественно оценить показатели качества радиосвязи тестовых модемов NB-Fi – отношение сигнал/шум SNR (Signal-to-Noise Ratio) и индикатор мощности принимаемого сигнала RSSI (Received Signal Strength Indicator) в зависимости от расстояния до базовой станции и глубины их заложения в почву. Всего в эксперименте использовались три подземных радиомодема NB-Fi BT100 (WAVIoT) с заданными идентификаторами. В период с 24 мая по 28 июня 2024 г. они попеременно переставлялись каждые 5–8 дней между заранее выбранными точками, расположенными на расстоянии от ~300 до 1300 м до базовой станции. Точки выбирались так, чтобы охватить характерные для участка сочетания рельефа и почвенных условий. В каждой точке устройство устанавливалось в почву на одну из двух фиксированных глубин – 20 или 40 см от дневной поверхности. Скважины для установки выполнялись буром Эдельмана, после размещения логгера их заполняли извлеченной почвой с уплотнением. Для каждой комбинации “радиомодем – точка – глубина” регистрировались значения SNR и RSSI. Схема закладки эксперимента и взаимное расположение базовой станции и тестовых точек приведены на рисунке 2.

Передача телеметрии от каждого радиомодема осуществлялась один раз в сутки в автоматическом режиме. Для анализа качества связи использовали значения SNR и RSSI, зарегистрированные на 2–4-е сутки после установки; данные первого и последнего дней не учитывали во избежание влияния возможной нестабильности в моменты монтажа и демонтажа оборудования, даты установки и переноса логгеров. Графики накопленных осадков представлены на рисунке 3.

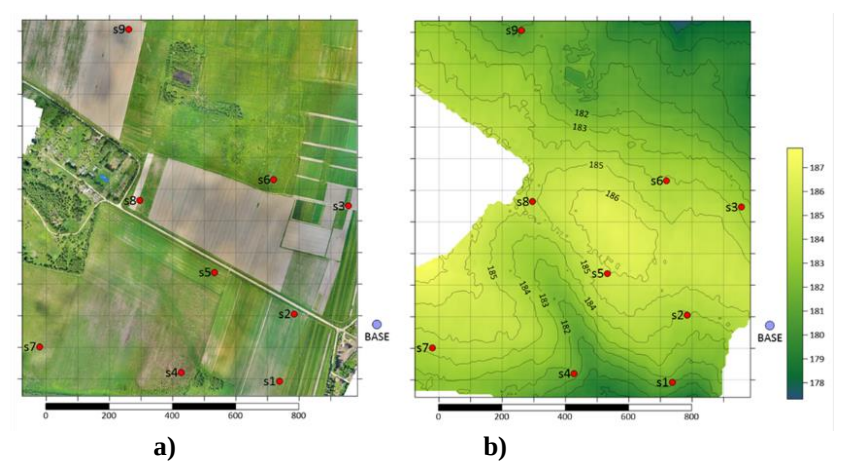


Рис. 2. Схема расположения базовой станции и а) точек закладки модемов BT100; б) цифровая модель рельефа.
Fig. 2. Location of the base station and а) the BT100 modem deployment points; б) the digital elevation model.

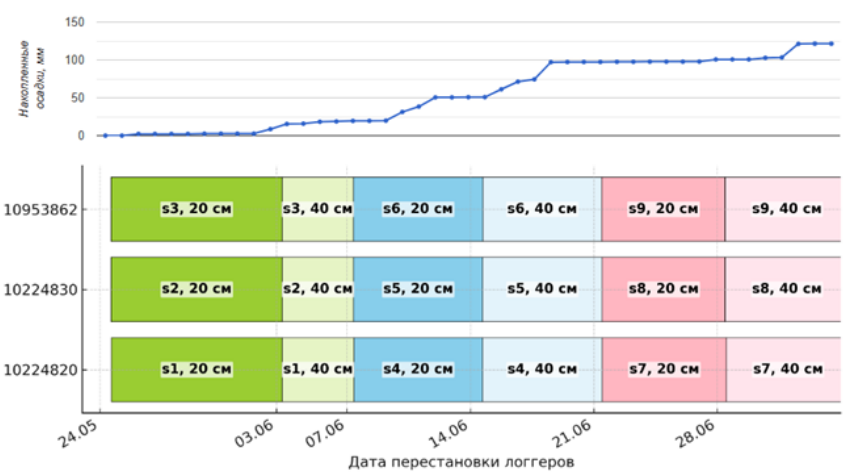


Рис. 3. Графики накопленных осадков и периоды работы логгеров в точках s1-s9.
Fig. 3. Cumulative precipitation and logger operation periods at points s1-s9.

Эксперимент проводился в условиях текущих погодных условий без специального управления увлажнением или другими факторами среды. В рамках настоящей работы пространственно-временная изменчивость влагосодержания и гранулометрического состава почв не анализируется детально: основной акцент сделан на принципиальной оценке возможности устойчивой передачи NB-Fi-сигнала через почвенную толщу при заглублении логгеров.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исходные данные о качестве связи (SNR и RSSI) формировались автоматически инфраструктурой сети NB-Fi и ПО оператора WAVEIoT. Для каждого логгера и каждых суток фиксировались все принятые пакеты с привязкой к идентификатору устройства и времени. На этапе предварительной обработки данные были агрегированы в виде средних значений SNR и RSSI для каждой комбинации “радиомодем – точка – глубина” за период работы устройства.

Полученные средние значения были сопоставлены с координатами точек наблюдений и далее пространственно интерполированы отдельно для двух глубин заложения (20 и 40 см). Для этого использовался инструментарий библиотеки SciPy на Python с реализацией метода ближайшего соседа (nearest neighbour), позволяющий по значениям в точках измерения построить регулярное поле SNR и RSSI на всей площади тестового участка. В результате были получены четыре карты: SNR на глубине 20 и 40 см и RSSI на глубине 20 и 40 см (рис. 4).

Во всем диапазоне расстояний от базовой станции (от ~300 до 1300 м) сохранялся приемлемый уровень качества сигнала при заглублении модемов на 20–40 см. По полевым картам средние значения SNR варьировали в пределах от 27 до 9 дБ, что соответствует переходу от “очень хорошего” к “удовлетворительному” качеству канала. RSSI изменялся в диапазоне примерно от –90 до –120 дБм, то есть уровень принимаемого сигнала оставался выше порогов чувствительности приемника NB-Fi во всех точках поля. В среднем при увеличении расстояния до базовой станции уровень сигнала ухудшался.

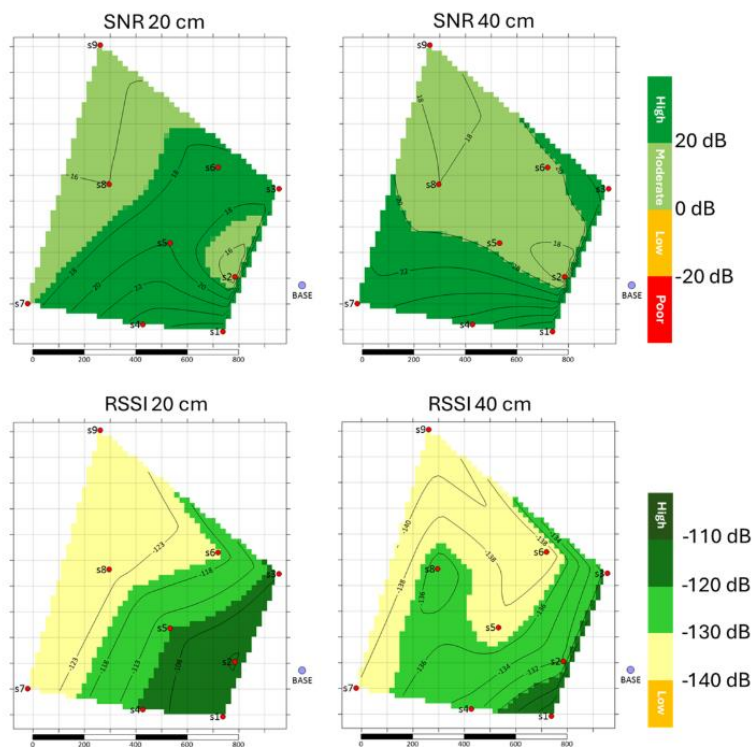


Рис. 4. Пространственная изменчивость значений SNR и RSSI для 9 точек на глубинах 20 и 40 см.

Fig. 4. Spatial variability of SNR and RSSI values at nine points at depths of 20 and 40 cm.

Анализ суточных данных SNR и RSSI для трех логгеров NB-Fi показал, что при заглублении на 20–40 см и расстояниях до базовой станции 340–860 м радиоканал в целом сохранял устойчивость. На минимальных расстояниях (340–460 м) при глубине 20 см значения SNR в большинстве случаев лежали в диапазоне примерно 10–25 дБ (с отдельными максимумами до 30–33 дБ), а RSSI – порядка –125 – –138 дБм, что соответствует уверенной зоне при-

ема с запасом относительно паспортной чувствительности приемника NB-Fi. При увеличении расстояния до 570–680 м и особенно до 1270 м, а также при переходе на глубину 40 см наблюдалось ожидаемое ухудшение параметров в связи с увеличением расстояния от логгера до базовой станции: SNR чаще находился в интервале 5–15 дБ, а RSSI изредка опускался до –140 – –143 дБм, однако даже в этих условиях фиксировались положительные значения SNR и стабильный прием пакетов.

Отдельные дни характеризовались кратковременным ухудшением канала (SNR вплоть до ~0 дБ и RSSI около –143 дБм), что можно интерпретировать как эпизодические сбои или коллизии в сети, но не как устойчивую потерю связи. В целом по всему диапазону расстояний (от ~300 до ~1300 м) и для обеих глубин заложения логгеров не зафиксировано конфигураций, при которых связь полностью прекращалась; параметры SNR и RSSI оставались в диапазоне, обеспечивающем работоспособность NB-Fi-канала для задач подземного мониторинга почв.

Таким образом, полевые испытания на полигоне ВНИИМЗ показали, что передача сигнала NB-Fi протоколом обеспечивает устойчивую доставку данных от подземных логгеров, заглубленных на 20–40 см, на расстояние до 1.3 км в реальных полевых условиях.

Полученные результаты подтверждают, что узкополосный фазоманипулирующий протокол NB-Fi, изначально разработанный для классических задач городского интернета вещей, может сохранять устойчивый канал связи и в условиях подземного размещения логгеров в почвах агроландшафта. При заглублении логгеров на 20–40 см в дерново-подзолистых суглинистых почвах и расстояниях до базовой станции до 1.3 км параметры SNR и RSSI оставались в диапазоне, обеспечивающем прием пакетов без устойчивой потери связи. Это принципиально важно с точки зрения практической реализуемости концепции подземного интернета вещей (IoUT) применительно к задачам мониторинга водного режима почв.

Отдельно следует отметить, что на момент проведения эксперимента на рынке фактически отсутствовали готовые решения, сочетающие NB-Fi-технологии и конструктивную пригодность

для долгосрочной работы в агрессивной почвенной среде. В настоящей работе акцент сделан на оценке работоспособности радиоканала в почве; конструктивные и схемотехнические особенности устройства рассматриваются только в той мере, в какой они необходимы для интерпретации результатов связи.

Сопоставление полученных результатов с опубликованными работами по WUSN/IoUT показывает, что достигнутый радиус действия и глубина заложения логгеров находятся на верхней границе или несколько превышают типичные значения для электромагнитной связи в почве. Полевые эксперименты с LoRa в почвах, как правило, имеют устойчивый прием при заглублении датчиков на 10–20 см и расстояниях до сотен метров в относительно сухих условиях, тогда как увеличение глубины и влажности быстро приводит к потере связи. В настоящем исследовании устойчивая радиосвязь сохранялась при заглублении радиомодема на 20–40 см и расстояниях до 0.8–1.3 км, хотя RSSI при этом приближался к порогам чувствительности приемника. Это указывает на то, что возможности технологии NB-Fi частично компенсируют затухание сигнала в почве как среды распространения радиосигнала. Вместе с тем оптимизация настройки антенны базовой станции/ретранслятора (выбор типа и коэффициента усиления антенны, ее высоты установки и ориентации относительно тестового участка) должны позволить увеличить и, тем самым расширить диапазон допустимых расстояний и глубин установки модемов.

С другой стороны, NB-Fi остается классическим электромагнитным решением с присущей ему чувствительностью к диэлектрическим свойствам и влажности почвы. Тот факт, что в рамках данного эксперимента не было зафиксировано устойчивой потери связи при изменяющихся погодных условиях, нельзя интерпретировать как универсальную характеристику технологии: в более тяжелых, переувлажненных или засоленных почвах затухание может оказаться существенно выше. В этом смысле наши результаты следует рассматривать как демонстрацию работоспособности NB-Fi в конкретных условиях.

Выполненный эксперимент имеет ряд методических ограничений. Во-первых, использовалось всего три подземных логгера и наблюдения проводились на протяжении относительно неболь-

шого периода, что не позволяет полноценно определить вклад отдельных факторов среды. Во-вторых, изменения влажности и температуры почвы, гранулометрического состава, микрорельефа, а также погодных условий и температуры воздуха учитывались лишь косвенно, как фоновые условия конкретного сезона, и не были предметом целенаправленного статистического анализа.

Понимание этих ограничений задает направления дальнейшей работы. Во-первых, необходимы специализированные эксперименты с варьированием влажности, температуры и плотности почвы, а также с учетом рельефа и экспозиции, что позволит количественно оценить чувствительность параметров SNR и RSSI к состоянию почвы. Во-вторых, перспективным представляется развитие адаптивных алгоритмов передачи для подземных узлов: динамическая корректировка частоты опроса и объема передаваемых данных в зависимости от состояния почвы и уровня помех, временное накопление измерений во внутренней памяти с последующей передачей в более благоприятные интервалы (например, в ночные часы с меньшим уровнем электромагнитных шумов или при уменьшении влажности почвы), оптимизация битовой скорости и мощности передатчика. Такие подходы могут существенно повысить надежность передачи данных и энергоэффективность подземных логгеров в условиях, близких к предельным для электромагнитной связи.

С точки зрения задачи построения мониторинговых сетей почв агроландшафтов важно то, что NB-Fi позволяет полностью исключить наземную инфраструктуру в условиях обработки полей сельскохозяйственной техникой: логгеры могут размещаться внутри почвы без вывода антенн на поверхность и без установки солнечных панелей. Это снижает риск их механических повреждений и упрощает схемы размещения.

Полученные результаты, подтвердившие принципиальную работоспособность NB-Fi-связи при установке логгеров в почву, являются основой разработки специализированного подземного прибора мониторинга. В дальнейшем предполагается адаптировать конструкцию и алгоритмы передачи данных с учетом особенностей различных типов почв и режимов увлажнения.

ВЫВОДЫ

Поставленный эксперимент на агрополигоне ВНИИМЗ показал, что технология NB-Fi обеспечивает работоспособный радиоканал при подземном размещении логгеров в дерново-подзолистых суглинистых почвах: при заглублении на 20–40 см устойчивый прием пакетов сохранялся на расстояниях до 1.3 км от базовой станции. Значения SNR и RSSI во всем диапазоне глубин и расстояний оставались выше порогов чувствительности приемника NB-Fi, что позволяет рассматривать данную технологию как перспективную основу для подземных сенсорных сетей (WUSN/IoUT) мониторинга водного режима почв без вывода антенн на дневную поверхность. Полученные результаты имеют пилотный характер: эксперимент выполнялся с ограниченным числом логгеров и в течение одного сезона, без детального учета пространственно-временной изменчивости влажности, температуры и гранулометрического состава почв. Это определяет необходимость дальнейших исследований, направленных на оптимизацию антенн и режимов работы NB-Fi, выбора мощности передачи сигналов, емкости батарей, а также разработку адаптивных алгоритмов передачи данных с учетом состояния почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 70036–2022. Информационные технологии. Интернет вещей. Протокол беспроводной передачи данных на основе узкополосной модуляции радиосигнала (NB-Fi); Стандартиформ: Москва, 2022.
2. Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России: оценка рисков и эколого-экономических последствий деградации земель. Адаптивные системы и технологии рационального природопользования (сельское и лесное хозяйство)”; Почвенный институт им. В.В. Докучаева; ГЕОС: Москва, 2018; Т. 1, 357 с.
3. Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России: проявления засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидация последствий и адаптационные мероприятия (сельское и лесное хозяйство)”; ООО “Издательство МБА”: Москва, 2021; Т. 3, 700 с.
4. Филь, П.П.; Болотов, А.Г.; Козлов, Д.Н.; Фомин, Д.С.; Хархардинов, Н.А. Технологии подземного интернета вещей в мониторинге почв. В *“Почвоведение: горизонты будущего”*: сб. тезисов

докладов VIII Всерос. конференции молодых ученых с международным участием; Почвенный институт им. В.В. Докучаева: Москва, 2024; С. 279–280.

5. Шеин, Е.В.; Болотов, А.Г.; Дембовецкий, А.В.; Усенко, Д.Ю.; Хархардинов, Н.А.; Вернюк, Ю.И. Использование модели SWAT для характеристики водного режима почв агроландшафта. *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева* **2023**, (117), 5–22. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-117-5-22>.

6. WAVIoT. NB-Fi – стандарт интернета вещей. Официальный сайт компании WAVIoT. <https://waviot.ru>.

7. Anvari, K.; Benndorf, J. Real Time Mining – A Review of Developments within the Last Decade. *Mining* **2025**, (5), 38. <https://doi.org/10.3390/mining5030038>.

8. Bankov, D.V.; Lyakhov, A.I.; Pavlova, I.D.; Khorov, E.M. On the Efficiency of Carrier Sense Multiple Access in NB-Fi Networks. *Journal of Communications Technology and Electronics* **2022**, (67), 137–143. <https://doi.org/10.1134/S1064226922130010>.

9. Bing, Z.; Wang, X.; Dong, Z.; Dong, L.; He, T. A Novel Edge Computing Architecture for Intelligent Coal Mining System. *Wireless Networks* **2023**, (29), 1545–1554. <https://doi.org/10.1007/s11276-021-02858-x>.

10. Cariou, C.; Moiroux-Arvis, L.; Pinet, F.; Chanet, J.-P. Internet of Underground Things in Agriculture 4.0: Challenges, Applications and Perspectives. *Sensors* **2023**, (23), 4058. <https://doi.org/10.3390/s23084058>.

11. Da Silva, A.R.; Moghaddam, M.; Liu, M. The Future of Wireless Underground Sensing Networks Considering Physical Layer Aspects. In *The Art of Wireless Sensor Networks. Vol. 2: Advanced Topics and Applications*; Springer: Berlin; Heidelberg, 2013; pp 451–484. https://doi.org/10.1007/978-3-642-40066-7_12.

12. Finke, P.A. On Digital Soil Assessment with Models and the Pedometrics Agenda. *Geoderma* **2012**, (171), 3–15. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.01.001>.

13. Hardie, M.; Hoyle, D. Underground Wireless Data Transmission Using 433-MHz LoRa for Agriculture. *Sensors* **2019**, (19), 4232. <https://doi.org/10.3390/s19194232>.

14. Hersbach, H.; Bell, B.; Berrisford, P.; Hirahara, S.; Horányi, A.; Muñoz-Sabater, J.; Nicolas, J.; Peubey, C.; Radu, R.; Schepers, D.; Simmons, A.; Soci, C.; Abdalla, S.; Abellan, X.; Balsamo, G.; Bechtold, P.; Biavati, G.; Bidlot, J.; Bonavita, M.; De Chiara, G.; Dahlgren, P.; Dee, D.; Diamantakis, M.; Dragani, R.; Flemming, J.; Forbes, R.; Fuentes, P.; Geer, A.; Haimberger, L.; Healy, S.; Hogan, R.J.; Hólm, E.; Janisková, M.; Keeley, S.; Laloyaux, P.; Lopez, P.; Lupu, C.; Radnoti, G.; de Rosnay, P.; Rozum, I.; Vamborg, F.;

- Villaume, S.; Thépaut, J.-N. The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **2020**, (146), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
15. Huang, H.; Shi, J.; Wang, F.; Zhang, D. Theoretical and Experimental Studies on the Signal Propagation in Soil for Wireless Underground Sensor Networks. *Sensors* **2020**, (20), 2580. <https://doi.org/10.3390/s20092580>.
16. Levchenko, P.; Bankov, D.; Khorov, E.; Lyakhov, A. Performance Comparison of NB-Fi, Sigfox and LoRaWAN. *Sensors* **2022**, (22), 9633. <https://doi.org/10.3390/s22249633>.
17. Li, M.; Liu, Y. Underground Coal Mine Monitoring with Wireless Sensor Networks. *ACM Transactions on Sensor Networks* **2009**, (5), 1. <https://doi.org/10.1145/1498915.1498916>.
18. Liang, M.-C.; Chen, H.-E.; Tfwala, S.S.; Lin, Y.-F.; Chen, S.-C. The Application of Wireless Underground Sensor Networks for Seepage Monitoring in Earth Dams. *Sensors* **2023**, (23), 3795. <https://doi.org/10.3390/s23083795>.
19. Liu, C.; Su, X.; Li, C. Edge Computing for Data Anomaly Detection of Multi-Sensors in Underground Mining. *Electronics* **2021**, (10), 302. <https://doi.org/10.3390/electronics10030302>.
20. Moiroux-Arvis, L.; Cariou, C.; Chanet, J.-P. Evaluation of LoRa Technology in 433-MHz and 868-MHz for Underground to Aboveground Data Transmission. *Computers and Electronics in Agriculture* **2022**, (194), 106770. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106770>.
21. Moridi, M.A.; Kawamura, Y.; Sharifzadeh, M.; Chanda, E.K.; Wagner, M.; Jang, H.; Okawa, H. Development of Underground Mine Monitoring and Communication System Integrated ZigBee and GIS. *International Journal of Mining Science and Technology* **2015**, (25), 811–818. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.07.017>.
22. Pathegama, G.R.; Zhao, J.; Ju, M.; De Silva, R.V.S.; Rathnaweera, T.D.; Bandara, A.K. Opportunities and Challenges in Deep Mining: A Brief Review. *Engineering* **2017**, (3), 546–551. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.04.024>.
23. Sadeghioon, A.M.; Chapman, D.N.; Metje, N.; Anthony, C.J. A New Approach to Estimating the Path Loss in Underground Wireless Sensor Networks. *Journal of Sensor and Actuator Networks* **2017**, (6), 18. <https://doi.org/10.3390/jsan6030018>.
24. Santos, R.C.P. dos; da Silva, J.M.; Junior, W.A.; Pinto, C.L.; Oliveira, M.M.; Mazzinghy, D.B. Development of a Low-Cost Device for Monitoring Ventilation Parameters (Temperature, Humidity and Pressure) in Underground Environments to Increase Operational Safety Using IoT. *Mining* **2022**, (2), 746–756. <https://doi.org/10.3390/mining2040041>.
25. Vuran, M.C.; Akyildiz, I.F. Channel Model and Analysis for Wireless

- Underground Sensor Networks in Soil Medium. *Physical Communication* **2010**, (3), 245–254. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2010.07.001>.
26. Vuran, M.C.; Salam, A.; Wong, R.; Irmak, S. Internet of Underground Things in Precision Agriculture: Architecture and Technology Aspects. *Ad Hoc Networks* **2018**, (81), 160–173. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2018.07.017>.
27. Wei, Q.; Zhu, S.; Du, C. Study on Key Technologies of Internet of Things Perceiving Mine. *Procedia Engineering* **2011**, (26), 2326–2333. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2442>.
28. Wu, Y.; Chen, M.; Wang, K.; Fu, G. A Dynamic Information Platform for Underground Coal Mine Safety Based on Internet of Things. *Safety Science* **2019**, (113), 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.11.003>.
29. Zhang, H.; Li, B.; Karimi, M.; Saydam, S.; Hassan, M. Recent Advancements in IoT Implementation for Environmental, Safety, and Production Monitoring in Underground Mines. *IEEE Internet of Things Journal* **2023**, (10), 14507–14526. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3267828>.
30. Zhang, X.; Feng, G.; Sun, X. Advanced Technologies of Soil Moisture Monitoring in Precision Agriculture: A Review. *Journal of Agriculture and Food Research* **2024**, (18), 101473. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101473>.

REFERENCES

1. GOST R 70036–2022 (Russian Standard); Standartinform: Moscow, 2022. (In Russ.)
2. National Report “Global Climate and Soil Cover of Russia: Assessment of Risks and Environmental and Economic Consequences of Land Degradation. Adaptive Systems and Technologies of Rational Nature Management (Agriculture and Forestry)”; V.V. Dokuchaev Soil Science Institute; GEOS: Moscow, 2018; Vol. 1, 357 p. (In Russ.)
3. National Report “Global Climate and Soil Cover of Russia: Manifestations of Drought, Prevention Measures, Control, Elimination of Consequences and Adaptation Activities (Agriculture and Forestry)”; ООО “Izdatel’stvo MBA”: Moscow, 2021; Vol. 3, 700 p. (In Russ.)
4. Fil’, P.P.; Bolotov, A.G.; Kozlov, D.N.; Fomin, D.S.; Kharkhardinov, N.A. Subsurface Internet of Things Technologies for Soil Monitoring. In *Soil Science: Horizons of the Future, Proc. 8th All-Russian Conference of Young Scientists with International Participation*; V.V. Dokuchaev Soil Science Institute: Moscow, 2024. (In Russ.)

5. Shein, E.V.; Bolotov, A.G.; Dembovetskiy, A.V.; Usenko, D.Yu.; Kharkhardinov, N.A.; Vernyuk, Yu.I. Using the SWAT Model to Characterise the Water Regime of Soils in Agrolandscapes. *Dokuchaev Soil Bulletin* **2023**, (117), 5–22. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-117-5-22>. (In Russ.)
6. WAVIoT. NB-Fi – Internet of Things Standard. Official Website of the WAVIoT Company. <https://waviot.ru>.
7. Anvari, K.; Benndorf, J. Real Time Mining – A Review of Developments within the Last Decade. *Mining* **2025**, (5), 38. <https://doi.org/10.3390/mining5030038>.
8. Bankov, D.V.; Lyakhov, A.I.; Pavlova, I.D.; Khorov, E.M. On the Efficiency of Carrier Sense Multiple Access in NB-Fi Networks. *Journal of Communications Technology and Electronics* **2022**, (67), 137–143. <https://doi.org/10.1134/S1064226922130010>.
9. Bing, Z.; Wang, X.; Dong, Z.; Dong, L.; He, T. A Novel Edge Computing Architecture for Intelligent Coal Mining System. *Wireless Networks* **2023**, (29), 1545–1554. <https://doi.org/10.1007/s11276-021-02858-x>.
10. Cariou, C.; Moiroux-Arvis, L.; Pinet, F.; Chanut, J.-P. Internet of Underground Things in Agriculture 4.0: Challenges, Applications and Perspectives. *Sensors* **2023**, (23), 4058. <https://doi.org/10.3390/s23084058>.
11. Da Silva, A.R.; Moghaddam, M.; Liu, M. The Future of Wireless Underground Sensing Networks Considering Physical Layer Aspects. In *The Art of Wireless Sensor Networks. Vol. 2: Advanced Topics and Applications*; Springer: Berlin; Heidelberg, 2013; pp 451–484. https://doi.org/10.1007/978-3-642-40066-7_12.
12. Finke, P.A. On Digital Soil Assessment with Models and the Pedometrics Agenda. *Geoderma* **2012**, (171), 3–15. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.01.001>.
13. Hardie, M.; Hoyle, D. Underground Wireless Data Transmission Using 433-MHz LoRa for Agriculture. *Sensors* **2019**, (19), 4232. <https://doi.org/10.3390/s19194232>.
14. Hersbach, H.; Bell, B.; Berrisford, P.; Hirahara, S.; Horányi, A.; Muñoz-Sabater, J.; Nicolas, J.; Peubey, C.; Radu, R.; Schepers, D.; Simmons, A.; Soci, C.; Abdalla, S.; Abellan, X.; Balsamo, G.; Bechtold, P.; Biavati, G.; Bidlot, J.; Bonavita, M.; De Chiara, G.; Dahlgren, P.; Dee, D.; Diamantakis, M.; Dragani, R.; Flemming, J.; Forbes, R.; Fuentes, M.; Geer, A.; Haimberger, L.; Healy, S.; Hogan, R.J.; Hólm, E.; Janisková, M.; Keeley, S.; Laloyaux, P.; Lopez, P.; Lupu, C.; Radnoti, G.; de Rosnay, P.; Rozum, I.; Vamborg, F.; Villaume, S.; Thépaut, J.-N. The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **2020**, (146), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.

15. Huang, H.; Shi, J.; Wang, F.; Zhang, D. Theoretical and Experimental Studies on the Signal Propagation in Soil for Wireless Underground Sensor Networks. *Sensors* **2020**, (20), 2580. <https://doi.org/10.3390/s20092580>.
16. Levchenko, P.; Bankov, D.; Khorov, E.; Lyakhov, A. Performance Comparison of NB-Fi, Sigfox and LoRaWAN. *Sensors* **2022**, (22), 9633. <https://doi.org/10.3390/s22249633>.
17. Li, M.; Liu, Y. Underground Coal Mine Monitoring with Wireless Sensor Networks. *ACM Transactions on Sensor Networks* **2009**, (5), 1. <https://doi.org/10.1145/1498915.1498916>.
18. Liang, M.-C.; Chen, H.-E.; Tfwala, S.S.; Lin, Y.-F.; Chen, S.-C. The Application of Wireless Underground Sensor Networks for Seepage Monitoring in Earth Dams. *Sensors* **2023**, (23), 3795. <https://doi.org/10.3390/s23083795>.
19. Liu, C.; Su, X.; Li, C. Edge Computing for Data Anomaly Detection of Multi-Sensors in Underground Mining. *Electronics* **2021**, (10), 302. <https://doi.org/10.3390/electronics10030302>.
20. Moiroux-Arvis, L.; Cariou, C.; Chanut, J.-P. Evaluation of LoRa Technology in 433-MHz and 868-MHz for Underground to Aboveground Data Transmission. *Computers and Electronics in Agriculture* **2022**, (194), 106770. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106770>.
21. Moridi, M.A.; Kawamura, Y.; Sharifzadeh, M.; Chanda, E.K.; Wagner, M.; Jang, H.; Okawa, H. Development of Underground Mine Monitoring and Communication System Integrated ZigBee and GIS. *International Journal of Mining Science and Technology* **2015**, (25), 811–818. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.07.017>.
22. Pathegama, G.R.; Zhao, J.; Ju, M.; De Silva, R.V.S.; Rathnaweera, T.D.; Bandara, A.K. Opportunities and Challenges in Deep Mining: A Brief Review. *Engineering* **2017**, (3), 546–551. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.04.024>.
23. Sadeghioon, A.M.; Chapman, D.N.; Metje, N.; Anthony, C.J. A New Approach to Estimating the Path Loss in Underground Wireless Sensor Networks. *Journal of Sensor and Actuator Networks* **2017**, (6), 18. <https://doi.org/10.3390/jsan6030018>.
24. Santos, R.C.P. dos; da Silva, J.M.; Junior, W.A.; Pinto, C.L.; Oliveira, M.M.; Mazzinghy, D.B. Development of a Low-Cost Device for Monitoring Ventilation Parameters (Temperature, Humidity and Pressure) in Underground Environments to Increase Operational Safety Using IoT. *Mining* **2022**, (2), 746–756. <https://doi.org/10.3390/mining2040041>.
25. Vuran, M.C.; Akyildiz, I.F. Channel Model and Analysis for Wireless Underground Sensor Networks in Soil Medium. *Physical Communication* **2010**, (3), 245–254. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2010.07.001>.

26. Vuran, M.C.; Salam, A.; Wong, R.; Irmak, S. Internet of Underground Things in Precision Agriculture: Architecture and Technology Aspects. *Ad Hoc Networks* **2018**, (81), 160–173. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2018.07.017>.
27. Wei, Q.; Zhu, S.; Du, C. Study on Key Technologies of Internet of Things Perceiving Mine. *Procedia Engineering* **2011**, (26), 2326–2333. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2442>.
28. Wu, Y.; Chen, M.; Wang, K.; Fu, G. A Dynamic Information Platform for Underground Coal Mine Safety Based on Internet of Things. *Safety Science* **2019**, (113), 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.11.003>.
29. Zhang, H.; Li, B.; Karimi, M.; Saydam, S.; Hassan, M. Recent Advancements in IoT Implementation for Environmental, Safety, and Production Monitoring in Underground Mines. *IEEE Internet of Things Journal* **2023**, (10), 14507–14526. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3267828>.
30. Zhang, X.; Feng, G.; Sun, X. Advanced Technologies of Soil Moisture Monitoring in Precision Agriculture: A Review. *Journal of Agriculture and Food Research* **2024**, (18), 101473. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101473>.