

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-149-167



**Ссылки для цитирования:**

Позднякова А.Д., Поздняков Л.А. Электрофизические и геоинформационные методы картографирования биологических свойств торфоземов // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 103. С. 149-167. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-149-167

**Cite this article as:**

Pozdnyakova A.D., Pozdnyakov L.A., Electrophysical and geoinformational methods of mapping the biological properties of peats, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 103, pp. 149-167, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-149-167

## Электрофизические и геоинформационные методы картографирования биологических свойств торфоземов

© 2020 г. А. Д. Позднякова<sup>1\*</sup>, Л. А. Поздняков<sup>1,2\*\*</sup>

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

\*<https://orcid.org/0000-0002-7277-8685>, e-mail: [antdanpozd@list.ru](mailto:antdanpozd@list.ru).

<sup>2</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,

119991, Москва, Ленинские горы, 1,

\*\*<https://orcid.org/0000-0002-0525-5841>, e-mail: [apl-223@mail.ru](mailto:apl-223@mail.ru).

Поступила в редакцию 03.06.2020, после доработки 12.08.2020,  
принята к публикации 10.09.2020

**Резюме:** Показано, что использование электрофизических методов и ГИС-технологий позволяет выявить структуру почвенного покрова и пространственное распределение отдельных биологических показателей, в частности интенсивности образования парниковых газов, в мелиорированных торфяных почвах (торфоземах), расположенных в сложных ландшафтно-гидрологических условиях долины реки Яхромы в Московской области. Таким образом, получен опыт интеграции на основе ГИС-технологий и геофизики различных аспектов строения и функционирования почвы, что генерирует легко читаемое “изображение” почвы в данном месте и в определенное время. Используемый подход основан на идее, что электрическое сопротивление почв, связанное с

плотностью подвижных зарядов (катионов и анионов почвенного поглощающего комплекса и раствора), формируется под влиянием почвообразующих процессов и является интегральным показателем широкого спектра свойств почвы. Принимая во внимание, что эволюция и деградация торфяников после их осушения является в первую очередь микробиологическим процессом, мы уделили особое внимание исследованиям в этой области. В рамках мониторинговых наблюдений на опытных стационарах Яхромской поймы проведено картирование микробного образования  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  и  $\text{CH}_4$  в торфяных почвах. С одной стороны, это позволяет оценить текущую интенсивность разложения органического вещества и потери азота и углерода торфяными почвами различного ботанического состава, условий и методов мелиорации, а с другой – определить вклад этих почв в формирование парникового эффекта. Установлено, что электрическое сопротивление почвы, базальное, субстрат-индуцированное дыхание и денитрификационная активность (одна из форм анаэробного дыхания) зависят от одного и того же комплекса свойств торфозема и коррелируют друг с другом на исследуемой территории. Высокая скорость и производительность электрофизических методов позволяют использовать их для первичной диагностики почвы, выбора ключевых точек для дальнейших исследований, детализации картографических контуров и уточнения расчетов потоков парниковых газов с больших площадей.

**Ключевые слова:** электрическое сопротивление почв, цифровое картографирование почв, базальное дыхание, денитрификация, субстрат-индуцированное дыхание, парниковые газы.

## Electrophysical and geoinformational methods of mapping the biological properties of peats

A. D. Pozdnyakova<sup>1\*</sup>, L. A. Pozdnyakov<sup>1,2\*\*</sup>

<sup>1</sup>*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,  
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,  
\* <https://orcid.org/0000-0002-7277-8685>, e-mail: [antdanpozd@list.ru](mailto:antdanpozd@list.ru).*

<sup>2</sup>*Lomonosov Moscow State University,  
1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,  
\*\* <https://orcid.org/0000-0002-0525-5841>, e-mail: [apl-223@mail.ru](mailto:apl-223@mail.ru).*

*Received 03.06.2020, Revised 12.08.2020, Accepted 10.09.2020*

**Abstract:** It is shown that the use of electrophysical methods and GIS technologies allows revealing soil coverage structure and spatial distribution

of individual biological indicators, in particular, greenhouse gases production, in drained histosols (eutrophic peat soils) located in complex landscape and hydrological conditions of the Yakhroma Valley in the Moscow Region. The combination of GIS technologies and soil electrophysics made it possible to bring together the various aspects of the soil composition and functioning. Consequently, it generates easily readable “image” of soil in a given place and at certain times. The used approach is based on the idea that the electrical resistance of soils, associated with the density of mobile charges (cations and anions of soil absorbing complex and solution), is formed under the influence of soil-forming processes and it is an integral indicator of a wide range of soil properties. Taking into account that the evolution and degradation of peatlands after their drainage is a microbiological process primarily, we paid special attention to the research in this area. The experience has been obtained in the mapping of the microbial formation of CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> in peat soils. On the one hand, it allows estimating the current intensity of organic matter decomposition and losses of nitrogen and carbon by peat soils of different botanical composition, terms and methods of meliorations, and on the other hand, to determine the contribution of these soils to the greenhouse effect. It was established that the electrical resistance of the soil, basal, substrate-induced respiration and denitrification activity (specific form of anaerobic respiration) depend on the same set of soil properties and correlate with each other within the studied area. The high speed and productivity of electrophysical methods allow them to be used for primary soil diagnostics, selection of key points for further research, detailing the cartographic contours and refining the calculations of greenhouse gas fluxes from large areas.

**Keywords:** soil electrical resistance, digital mapping of soil, basal respiration, substrate-induced respiration, denitrification, greenhouse gases.

## ВВЕДЕНИЕ

Величина удельного электрического сопротивления почвы как природного тела, имеющего в основном ионную проводимость, зависит от объемной плотности подвижных электрических зарядов, а потому оказывается связана с большим количеством процессов и свойств, определяющих их распределение в почвенном профиле. Из таких свойств, прежде всего, нужно отметить механический и минералогический состав, содержание органического вещества, концентрацию легкорастворимых солей, влажность и температуру. К перераспределяющим подвижные заряды процессам относятся подзолообразование, лессиваж, гумусо- и торфонакопление, засоление и др. ([Поздняков и др., 1996](#)).

Многочисленные попытки выявить доминирующий фактор, который определял бы величину электрического сопротивления отдельных почв и который мог бы напрямую рассчитываться по сопротивлению, привели к созданию множества разнообразных математических моделей, каждая из которых, однако, характерна для крайне специфических почвенных условий и обычно требует дополнительной настройки при использовании на другом объекте. Результатом этого стало понимание, что использовать электрическое сопротивление следует не для опосредованного определения тех или иных параметров почвы, а прежде всего – для выявления внутренне однородных почвенных объектов, которые впоследствии могут быть подробно исследованы традиционными методами почвоведения. В этом случае множественность факторов, определяющих электрическое сопротивление, становится не проблемой для интерпретации результатов, а достоинством, определяющим чувствительность метода: изменение любого из них приведет к изменению сопротивления и обнаружению неоднородности.

Для эффективного применения электрофизическая съемка должна предшествовать другим исследованиям. Поскольку удельное электрическое сопротивление почв относится к числу наиболее быстро измеряемых в полевых условиях показателей, то шаг сетки при этом может быть сокращен вплоть до минимума, определяемого физическими габаритами измерительной установки. Для наглядного представления распределения электрического сопротивления в пространстве полезно использовать программы геоинформационных систем, которые в последнее время широко применяются в почвенных исследованиях ([Апарин, 2012](#); [Бышов, 2013](#); [Савин и др., 2019](#); [2020](#)). С опорой на полученную цифровую карту производится отбор образцов и детальное изучение почв в характерных различающихся точках. Предварительное электрофизическое обследование позволяет, с одной стороны, сократить затраты времени и ресурсов, поскольку исключает отбор и анализ многочисленных образцов из однородных контуров, что неизбежно влечет за собой использование равномерной сетки, а с другой – позволяет улучшить точность картографирования, ука-

зывая на участки с высокой неоднородностью, которые требуют более тщательного анализа ([Corwin, 2008](#)).

Картографирование распределения электрического сопротивления по площади легко поддается автоматизации. Аппаратура для этих целей получила распространение на западных рынках в 1990-е годы с появлением доступных для гражданского использования систем спутникового позиционирования ([Corwin, 2008](#)). Обычно она выполняется в виде буксируемой тележки с вращающимися электродами дисковидной формы ([Panissod, 1997](#); [Lund, 1999](#); [Lueck, 2013](#)), и ее использование ограничивается пахотными землями. Вместе с этим используется также оборудование для бесконтактного определения электрического сопротивления посредством электромагнитной индукции ([Doolittle, 2014](#)) – оно существует как в буксируемом, так и в переносном варианте, однако для применения требует калибровки и характеризуется фиксированной глубиной (набором глубин), на которую может проводиться обследование почвы.

Портативное оборудование, используемое в данной работе, отличается универсальностью ([Позднякова, 2018](#)), благодаря чему лучше подходит для разнообразных исследовательских целей, но также может применяться и для решения производственных задач ([Medeiros, 2016](#)). Хотя в агрономической и почвенной практике электрофизическими методами обследуется обычно только верхний (пахотный, корнеобитаемый) слой, они позволяют получать информацию о целом почвенном профиле и верхних слоях материнских пород, вести послойное обследование, а также проводить детальную 3D визуализацию их структуры ([Loke, 2013](#)).

Картирование удельного электрического сопротивления внедряется в практику точного земледелия многих стран, где для разных почв и сельскохозяйственных культур этот метод используется для выделения территорий с одинаковой продуктивностью, либо требующих схожих способов обработки ([Lund, 1999](#); [Anderson-Cook, 2002](#); [Corwin, 2003, 2008](#); [Lueck, 2013](#); [Doolittle, 2014](#); [Stadler, 2015](#); [Medeiros, 2016](#); [Singh, 2016](#)). Те же принципы могут быть применены для уточнения границ почвенных контуров при создании классических почвенных карт ([Doolittle, 2014](#)), поскольку направленность и степень развития процессов почвообра-

зования могут быть разделены по соответствующим им значениям электрического сопротивления ([Поздняков, 1996](#)).

Карты электрического сопротивления в зависимости от целей и методов построения могут быть источником информации как по варьированию конститутивных свойств почв (например, гранулометрического состава), так и по распределению текущих значений вариативных свойств, таких как влажность. В последнем случае целесообразно повторять процедуру картографирования многократно в различные сезоны и при разных погодных условиях. При этом отмечается воспроизведение на картах одних и тех же пространственных структур, различающихся абсолютными значениями сопротивления ([Lund, 1999](#); [Lueck, 2013](#); [Doolittle, 2014](#); [Stadler, 2015](#); [Medeiros, 2016](#)). Поэтому влияние колебаний температуры и влажности на информативность методов электрического сопротивления почв не следует переоценивать.

В конечном счете было показано, что электрическое сопротивление почв связано с урожайностью и другими показателями развития растений в той степени, в которой лимитирующим фактором для них являются свойства почвы ([Lund, 1999](#); [Anderson-Cook, 2002](#); [Corwin, 2003, 2008](#); [Stadler, 2015](#); [Singh, 2016](#)). Можно полагать, что продуктивность почвенных микробных сообществ, также чувствительных к особенностям своей среды обитания, будет проявлять опосредованную связь с электрическим сопротивлением. При изучении структуры почвенного покрова сельскохозяйственных угодий микроорганизмам обычно не уделялось первостепенное внимание, и они рассматривались как один из факторов развития культурных растений. Тем не менее в отдельных работах было показано, что состав микробного сообщества, его биомасса и физиологическая активность коррелирует со структурой почвы, гранулометрическим составом, содержанием азота, органического углерода и т. д. ([Gelsomino, 1999](#); [Groffman, 1996](#)). Электрическое сопротивление почвы также оказывалось среди величин, связанных с отдельными биологическими показателями ([Johnson, 2003](#); [Kim et al., 2016](#)).

Так, электрофизическими методами можно оценить пространственное варьирование скоростей образования парниковых газов в пахотном горизонте антропогенно-преобразованных тор-

фяных и дерново-подзолистых почв ([Поздняков, 2008](#); [Поздняков, 2015](#)). Учет распределения удельного электрического сопротивления позволит не только выявить полный диапазон варьирования потоков парниковых газов, но также уточнить пространственную структуру их изменений и оценить площади, на которые приходятся те или иные их значения. Поскольку для расчетов эмиссии парниковых газов с обширной территории требуется информация о распределении конкретных свойств почвенного покрова, влияющих на величину потока, то картирование связанного с ними удельного электрического сопротивления позволит решить эту задачу точнее, чем использование традиционных почвенных карт, аналогично тому, как это отмечается для сельскохозяйственной практики ([Савин, 2020](#)).

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на одном из старейших объектов мелиорации в России – Яхромской долине Московской области. Река Яхрома является притоком реки Сестры и принадлежит бассейну Волги. Ниже Дмитрова она протекает по обширной заторфованной котловине, которая традиционно называется “Яхромской поймой”, хотя данное название не вполне корректно, и ее происхождение не связано с деятельностью реки.

Освоение Яхромской поймы началось с участка “Ближний” в 1906–1914 гг. История этого участка хорошо документирована: в архивах ВНИИМЗ имеются ботанические, агрохимические и гидрологические данные практически с начального этапа освоения долины. На их основе можно проследить ряд общих закономерностей эволюции торфяников при освоении, определить интенсивность деградации и эволюции, прогнозировать дальнейшее развитие схожих низинных торфяников. В 1960-е годы вся территория поймы претерпела кардинальные изменения – было произведено осушение и вовлечение земельных угодий в сельскохозяйственный оборот. Естественная луговая и болотная растительность постепенно сменилась культурной и сорной, произошли глубокие изменения водного режима и различных свойств торфяных и других почв долины. Будучи осушенным на 50 лет раньше остальной территории, участок “Ближний” подвергся более глубо-

кой трансформации почвенного покрова, что представляет интерес для прогнозирования состояния торфоземов остальных частей долины.

Антропогенное воздействие различной степени и направленности оказалось наложено на исходную высокую неоднородность почвенного покрова долины. Находясь в сложных ландшафтных, гидрологических и геохимических условиях, почвы здесь сформированы на торфах различного ботанического состава (осокового, гипнового, древесного, тростникового и смешанных вариантов), переслаивающихся озерными, аллювиальными и делювиальными отложениями. Все это требует пристального внимания к неоднородности и структуре почвенного покрова Яхромской поймы и подобных ей объектов.

Для изучения этой структуры были использованы программы геоинформационных систем (ГИС). На предварительном этапе исследований методы ГИС позволили перевести старые карты в цифровой формат, обобщить и наглядно визуализировать архивный табличный материал, а также найти географические координаты точек обследования в предыдущие годы. В дальнейшем для мониторинга изменения почвенных свойств отбирались и исследовались образцы именно в этих точках (рис. 1). Для анализа отбирались смешанные образцы из пахотного горизонта, время отбора – конец июня.

Величины продукции парниковых газов определялись газохроматографическими методами в микрокосмах ([Степанов, Лысак, 2002](#)). Для этого из свежих образцов почвы отбирали навески по 2 г в пенициллиновые флаконы объемом 15 мл.

Во флаконах измерялись величины базального (БД), а также субстрат-индуцированного дыхания (СИД), в ходе чего количество вносимой глюкозы составляло 2.5 мг/г почв. Потенциальная способность к образованию метана оценивалась после внесения таких же количеств глюкозы и вытеснения воздуха во флаконах аргоном для создания анаэробных условий. Для определения активности образования  $N_2O$  денитрифицирующими микроорганизмами в почву добавляли раствор  $KNO_3$  (0.3 мг/г) и глюкозы (2.5 мг/г), воздух во флаконах также замещался аргоном, и в него шприцом вносили 1 мл ацетилена. Ацетилен блокирует действие



фермента редуктазы закиси азота и останавливает поглощение этого газа. Инкубация образцов производилась в термостате при 28 °С в течение суток, за исключением СИД, интенсивность которого оценивалась в течение 2 часов.

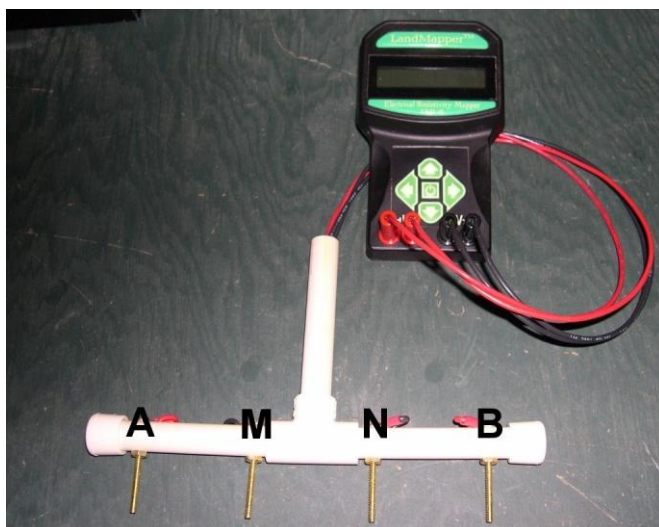


**Рис. 1.** Расположение на участке “Ближний” точек отбора образцов и измерения удельного электрического сопротивления.

**Fig. 1.** Location of points for sampling and measuring of specific electric resistance at the “Blizhniy” experimental site.

Измерение электрического сопротивления проводилось прибором LandMapper ERM-02 с измерительной четырехэлек-

тродной установкой для профилирования (рис. 2), где электроды АВ являются питающими, а MN приемными ([Поздняков и др., 1996](#)). Прибор автоматически проводит серию измерений, выдавая усредненные значения удельного электрического сопротивления почвы, рассчитанные через геометрический коэффициент К, зависящий от расстояния между электродами, которое определяет конфигурацию формирующегося электрического поля.



**Рис. 2.** Прибор LandMapper и установка AMNB для измерений удельного электрического сопротивления почв в полевых условиях.

**Fig. 2.** LandMapper device and AMNB installation for measuring of specific electric resistance of soils in the field.

Координаты точек обследования на местности определяли навигационным прибором GPS-72 фирмы Garmin, для последующей обработки в программах ГИС. В данной работе применялось программное обеспечение Surfer и MapInfo.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно архивным данным обследований участка “Ближний”, распределение содержания  $C_{орг}$ , ЕКО, зольности, гидrolити-

ческой кислотности и ряда других параметров соответствует делению поймы на прирусловый, притеррасный и центральный участки. В целом оно связано со всем комплексом условий торфо- и почвообразования в долине, обусловленным воздействием реки, выклинивающихся у склонов долины грунтовых вод, растительностью и ботаническим составом торфа. Так, вдоль русла Яхромы в пределах долины протянулась собственно пойма, причем аллювиальные отложения здесь залегают поверх торфа и чередуются с торфяными прослойками. В настоящее время слоистость данных почв разрушена вспашкой, и здесь сформированы торфоземы агроминеральные, имеющие в пахотном горизонте относительно низкое содержание  $C_{орг}$ , низкую ЕКО, но наивысшую кислотность.

Обширные пространства центральной части долины не были подвержены воздействию аллювиальных процессов. Здесь сформированы мощные залежи торфа древесного ботанического состава, содержащие максимальные запасы органического вещества, чем также обусловлена высокая ЕКО. Глубже иногда залегают торфа иного ботанического состава, что сказывается на гидрологии залежи. Сформировавшиеся здесь торфоземы являются наиболее плодородными почвами всей Яхромской поймы. Вдоль края долины на поверхность выходят жесткие минерализованные грунтовые воды, являвшиеся основной причиной ее заболачивания в прошлом. Торф здесь имеет осоково-гипновый состав, переслаивается делювием, но в целом имеет существенно более низкую зольность, чем в прирусловых частях. За счет грунтовых вод в почвенном профиле в обилии встречаются новообразования железа и карбонатов, а pH возрастает до нейтральных значений.

Полученные нами данные показывают, что распределение величин БД и СИД также соответствуют вышеуказанному делению. В целом БД в пахотном горизонте торфяных почв участка “Ближний” Яхромской поймы менялось довольно значительно: от 0.6 до 3.4 мкмоль  $CO_2 \cdot g^{-1} \cdot сут^{-1}$ . Наибольшие значения достигались в центральной части поймы, где почва все еще богата слаборазложной органикой, а при приближении к руслу реки и притеррасной части поймы, где торф переслаивается минеральными наносами, рассматриваемый показатель снижался в 5 и более раз. Статистический анализ показал, что именно содержание минеральных

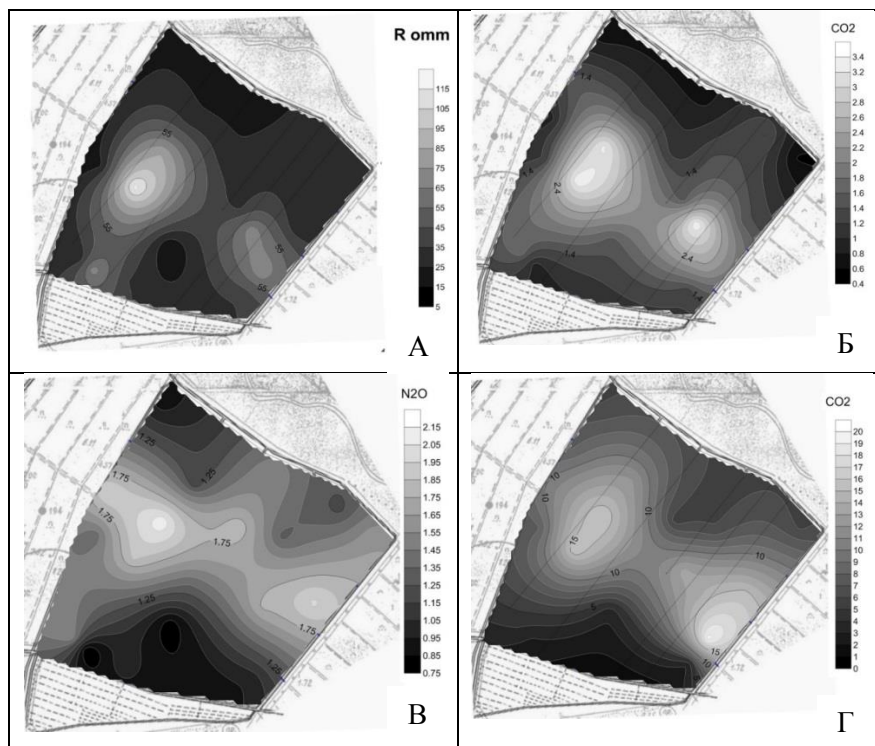
веществ (зольность), является тем фактором, который оказывает наибольшее влияние на величины образования  $\text{CO}_2$ .

СИД, то есть образование  $\text{CO}_2$  при устранении ограничений по имеющимся в почве элементам питания и зависящее только от накопленной биомассы аэробных гетеротрофных микроорганизмов, проявляет те же закономерности, хотя изменяется еще более резко: от 2.4 до 19.5  $\mu\text{моль}\text{CO}_2 \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ .

Аналогичным закономерностям подчинялась и активность денитрификации, которая достигала максимальных значений в центральной части поймы и снижалась при движении к террасе и руслу почти в 3 раза. Иным оказалось распределение метаногенеза, приуроченного в основном к переувлажненным притеррасным участкам.

Измеренное нами удельное электрическое сопротивление пахотного горизонта изменялось в полном соответствии с делением торфоземов по положению в прирусловой, центральной и притеррасной частях поймы. Наибольшие величины достигались в центральной пойме, где зольность минимальна, а почвенный раствор не так минерализован, то есть несет в себе мало подвижных ионогенных соединений (электрических зарядов) (рис. 3А).

Распределения величин дыхания и электрического сопротивления проявляют в почвенном покрове исследованного участка сходные паттерны, поскольку зависят от одного набора физико-химических свойств почвы, главным образом от содержания органического вещества и зольности. Прежде всего, это касается базального дыхания. Коэффициент детерминации  $R^2$  для зависимости БД от удельного электрического сопротивления составляет 0.63, тогда как для СИД – 0.31. Важно, что сопротивление теснее связано со значениями БД, отражающего реальную активность микроорганизмов, чем с измеряемым в идеальных условиях СИД.



**Рис. 3.** Пространственное распределение электрических и микробиологических параметров пахотного горизонта участка “Ближний” (сверху – прирусовая часть участка, снизу – притеррасная). А – электрическое сопротивление (Ом·м); Б – базальное дыхание, В – денитрификация; Г – субстрат-индуцированное дыхание (мкмоль газа/(г почвы\*сут)).

**Fig. 3.** Spatial distribution of electrical and microbiological parameters in the upper horizon at the “Blizhniy” experimental site (top of the map is located near the river, bottom – near the terrace). А – specific electric resistance; В – basal respiration; С – denitrification; D – substrate-induced respiration ( $\mu\text{mol}$  of corresponding gas/(g soil\*day)).

Корреляция с денитрификацией слабее, что особенно заметно в прирусовой части, где ведется сельскохозяйственное производство, за счет чего  $R^2$  опускается до 0.07. Здесь в 1-ом – 3-ем кварталах мы видим приуроченность локальных минимумов де-

нитрификации к максимальному уровню дыхательной активности (и наоборот), что может быть вызвано особенностями условий увлажнения, аэрации и азотного питания при проведении агротехнологических мероприятий. На всей остальной территории связь уровня денитрификации и электрического сопротивления прослеживается визуально (рис. 3).

Хуже всего ( $R^2 = 0.02$ ) проявляется связь для активности метаногенов – узкоспециализированной группы строго анаэробных микроорганизмов. Ее максимумы приходятся на области с низким электрическим сопротивлением почвы, однако, в случае, если низкое сопротивление вызвано не переувлажнением, а, например, увеличением зольности, как в прирусловой части поймы, то фиксируется минимальный уровень образования метана. Важно отметить, что поскольку области с низким электрическим сопротивлением отделены друг от друга в пространстве, они были бы обнаружены и выделены при предварительной электроразведке, а последующее измерение активности метаногенеза в каждой из них все равно показало бы существование между ними отличий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Удельное электрическое сопротивление, таким образом, может быстро и эффективно использоваться для характеристики структуры почвенного покрова, позволяя объективно подойти к выбору точек для дальнейших точных измерений и впоследствии корректно производить расчеты потоков парниковых газов с обширных территорий. Прежде всего это касается процессов микробного образования  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2\text{O}$ , а в определенной степени – и  $\text{CH}_4$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Апарин Б.Ф., Абакумов Е.В., Касаткина Г.А., Матинян Н.Н., Русаков А.В., Рюмин А.Г., Сухачева Е.Ю. Почвенное картирование. СПб: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2012. 128 с.
2. Бышов Н.В., Бышов Д.Н., Бачурин А.Н., Олейник Д.О., Якунин Ю.В. Геоинформационные системы в сельском хозяйстве. Рязань: ФГБОУ ВПО РГАТУ, 2013. 169 с.

3. Позднякова А.Д., Поздняков Л.А., Анциферова О.Н. Универсальный прибор для измерений электрических свойств почв // Бюллетень науки и практики. 2018. Т. 4. № 4. С. 232–245. DOI: 10.5281/zenodo.1218483.
4. Поздняков А.И., Позднякова Л.А., Позднякова А.Д. Стационарные электрические поля в почвах. М.: КМК Scientific Press LTD, 1996. 358 с. URL: [http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o\\_37706](http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_37706).
5. Поздняков А.И., Елисеев П.И., Поздняков Л.А. Электрофизический подход к оценке некоторых элементов окультуренности и плодородия легких почв гумидной зоны // Почвоведение. 2015. № 7. С. 832–842.
6. Поздняков Л.А. Оценка биологической активности торфяных почв по удельному электрическому сопротивлению // Почвоведение. 2008. № 10. С. 1217–1223.
7. Савин И.Ю. Пространственные аспекты прикладного почвоведения // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 101. С. 5–18. DOI: [10.19047/0136-1694-2020-101-5-18](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-5-18).
8. Савин И.Ю., Жоголев А.В., Прудникова Е.Ю. Современные тренды и проблемы почвенной картографии // Почвоведение. 2019. № 5. С. 517–528.
9. Степанов А.Л., Лысак Л.В. Методы газовой хроматографии в почвенной микробиологии. М.: МАКС Пресс, 2002. 88 с.
10. Anderson-Cook C.M., Alley M.M., Roygard J.K.F., Khosla R., Noble R.B., Doolittle J.A. Differentiating Soil Types Using Electromagnetic Conductivity and Crop Yield Maps // Soil Science Society of America Journal. 2002. No. 66 (5). P. 1562–1570. DOI: [10.2136/sssaj2002.1562](https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1562).
11. Corwin D., Lesch S., Shouse P.J., Sopper R., Ayars J.E. Identifying Soil Properties that Influence Cotton Yield Using Soil Sampling Directed by Apparent Soil Electrical Conductivity // Agron. J. 2003. Vol. 95. DOI: [10.2134/agronj2003.03520](https://doi.org/10.2134/agronj2003.03520).
12. Corwin D.L. Past, present, and future trends of soil electrical conductivity measurement using geophysical methods / Allred B., Daniels J., Ehsani M. (Eds.). Handbook of Agricultural Geophysics. 2008. Boca Raton: CRC Press. DOI: [10.1201/9781420019353](https://doi.org/10.1201/9781420019353).
13. Doolittle J.A., Brevik E.C. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies // Geoderma. 2014. Vol. 223–225. P. 33–45. DOI: [10.1016/j.geoderma.2014.01.027](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.027).
14. Gelsomino A., Keijzer-Wolters A.C., Cacco G., van Elsas J.D. Assessment of bacterial community structure in soil by polymerase chain reaction and denaturing gradient gel electrophoresis // Journal of microbiological methods. 1999. No. 38 (1–2). P. 1–15.

15. *Groffman P.M., Eagan P., Sullivan W.M., Lemunyon J.L.* Grass species and soil type effects on microbial biomass and activity // *Plant Soil*. 1996. No. 183. P. 61–67.
16. *Johnson M.J., Lee K.Y., Scow K.M.* DNA fingerprinting reveals links among agricultural crops, soil properties, and the composition of soil microbial communities // *Geoderma*. 2003. Vol. 114. P. 279–303.
17. *Kim J., Roh A.-S., Choi S.-Ch., Kim E.-J., Choi M.-T., Ahn B.-K., Kim S.-K., Lee Y.-H., Joa J.-H., Kang S.-S., Lee S., Ahn J.-H., Song J., Weon H.-Y.* Soil pH and electrical conductivity are key edaphic factors shaping bacterial communities of greenhouse soils in Korea // *Journal of Microbiology*. 2016. Vol. 54. P. 838–845. DOI: [10.1007/s12275-016-6526-5](https://doi.org/10.1007/s12275-016-6526-5).
18. *Loke M.H., Chambers J.E., Rucker D.F., Kuras O., Wilkinson P.B.* Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method // *Journal of Applied Geophysics*. 2013. Vol. 95. P. 135–156. DOI: [10.1016/j.jappgeo.2013.02.017](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.02.017).
19. *Lueck E., Ruehlmann J.* Resistivity mapping with GEOPHILUS ELECTRICUS – Information about lateral and vertical soil heterogeneity // *Geoderma*. 2013. Vol. 199. P. 2–11. DOI: [10.1016/j.geoderma.2012.11.009](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.11.009).
20. *Lund E.D., Christy C.D., Drummond P.E.* Practical applications of soil electrical conductivity mapping. In: *Stafford J.V.* (Ed.) *Precision Agriculture. Proceedings of the Second European Conference on Precision Agriculture*. Sheffield: Academic Press Ltd, 1999. P. 771–779.
21. *Medeiros W., Queiroz D., Valente D., Pinto F., Melo C.* The temporal stability of the variability in apparent soil electrical conductivity // *Bioscience Journal*. 2016. Vol. 32. P. 150–159. DOI: [10.14393/BJ-v32n1a2016-26287](https://doi.org/10.14393/BJ-v32n1a2016-26287).
22. *Panissod C., Dabas M., Jolivet A., Tabbagh A.* A novel mobile multipole system (MUCEP) for shallow (0–3 m) geoelectrical investigation: the “Vol-de-canards” array // *Geophysical Prospecting*. 1997. Vol. 45 (6). P. 983–1002. DOI: [10.1046/j.1365-2478.1997.650303.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.1997.650303.x).
23. *Singh G., Williard K.W.J., Schoonover J.E.* Spatial Relation of Apparent Soil Electrical Conductivity with Crop Yields and Soil Properties at Different Topographic Positions in a Small Agricultural Watershed // *Agronomy*. 2016. Vol. 6 (4). P. 57. DOI: [10.3390/agronomy6040057](https://doi.org/10.3390/agronomy6040057).
24. *Stadler A., Rudolph S., Kupisch M., Langensiepen M., van der Kruk J., Ewert F.* Quantifying the effects of soil variability on crop growth using apparent soil electrical conductivity measurements // *European Journal of Agronomy*. 2015. Vol. 64. P. 8–20. DOI: [10.1016/j.eja.2014.12.004](https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.12.004).



## REFERENCES

1. Aparin B.F., Abakumov E.V., Kasatkina G.A., Matinyan N.N., Rusakov A.V., Ryumin A.G., Sukhacheva E.Yu., *Pochvennoe kartirovanie* (Soil mapping), Saint-Petersburg: Izd-vo S.-Peterb. un-ta, 2012, 128 p.
2. Byshov N.V., Byshov D.N., Bachurin A.N., Oleinik D.O., Yakunin Yu.V., *Geoinformatsionnye sistemy v sel'skom khozyaistve* (Geoinformation systems in agriculture), Ryazan': FGBOU VPO RGATU, 2013, 169 p.
3. Pozdnyakova A.D., Pozdnyakov L.A., Antsiferova O.N., *Universal'nyi pribor dlya izmerenii elektricheskikh svoystv pochv* (Universal device for measuring electrical properties of soils), *Byulleten' nauki i praktiki*, 2018, Vol. 4, No. 4, pp. 232–245.
4. Pozdnyakov A.I., Pozdnyakova L.A., Pozdnyakova A.D., *Statsionarnye elektricheskie polya v pochvakh* (Stationary electric fields in soils Stationary electric fields in soils), Moscow: KMK Scientific Press LTD, 1996, 358 p. URL: [http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o\\_37706](http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_37706).
5. Pozdnyakov A.I., Eliseev P.I., Pozdnyakov L.A., *Elektrofizicheskii podkhod k otsenke nekotorykh elementov okul'turennosti i plodorodiya legkikh pochv gumidnoi zony* (The electrophysical approach to assessing some elements of cultivation and fertility of light soils of the humid zone), *Pochvovedenie*, 2015, No. 7, pp. 832–842.
6. Pozdnyakov L.A., *Otsenka biologicheskoi aktivnosti torfyanykh pochv po udel'nomu elektricheskomu soprotivleniyu* (Assessment of the biological activity of peat soils by electrical resistivity), *Pochvovedenie*, 2008, No.10, pp. 1217–1223.
7. Savin I.Yu., Spatial aspects of applied Soil Science, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 101, pp. 5–18, DOI: [10.19047/0136-1694-2020-101-5-18](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-5-18).
8. Savin I.Yu., Zhogolev A.V., Prudnikova E.Yu., *Sovremennye trendy i problemy pochvennoi kartografii* (Modern trends and problems of soil cartography), *Pochvovedenie*, 2019, No. 5, pp. 517–528.
9. Stepanov A.L., Lysak L.V., *Metody gazovoi khromatografii v pochvennoi mikrobiologii* (Gas chromatography methods in soil microbiology), Moscow: MAKS Press, 2002, 88 p.
10. Anderson-Cook C.M., Alley M.M., Roygard J.K.F., Khosla R., Noble R.B., Doolittle J.A. Differentiating Soil Types Using Electromagnetic Conductivity and Crop Yield Maps, *Soil Science Society of America Journal*, 2002, Vol. 66 (5), pp. 1562–1570, DOI: [10.2136/sssaj2002.1562](https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1562).
11. Corwin D., Lesch S., Shouse P.J., Sophe R., Ayars J.E., Identifying Soil Properties that Influence Cotton Yield Using Soil Sampling Directed by Apparent Soil Electrical Conductivity, *Agronomy J.*, 2003, Vol. 95 (2), DOI: [10.2134/agronj2003.03520](https://doi.org/10.2134/agronj2003.03520).

12. Corwin D.L., Past, present, and future trends of soil electrical conductivity measurement using geophysical methods, *Handbook of Agricultural Geophysics*, Boca Raton: CRC Press, 2008, pp. 17–36. DOI: [10.1201/9781420019353](https://doi.org/10.1201/9781420019353).
13. Doolittle J.A., Brevik E.C., The use of electromagnetic induction techniques in soils studies, *Geoderma*, 2014, Vol. 223–225, pp. 33–45, DOI: [10.1016/j.geoderma.2014.01.027](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.027).
14. Gelsomino A., Keijzer-Wolters A.C., Cacco G., van Elsas J.D., Assessment of bacterial community structure in soil by polymerase chain reaction and denaturing gradient gel electrophoresis, *Journal of microbiological methods*, 1999, No. 38 (1–2), pp. 1–15.
15. Groffman P.M., Eagan P., Sullivan W.M., Lemunyon J.L., Grass species and soil type effects on microbial biomass and activity, *Plant Soil*, 1996, No. 183, pp. 61–67.
16. Johnson M.J., Lee K.Y., Scow K.M., DNA fingerprinting reveals links among agricultural crops, soil properties, and the composition of soil microbial communities, *Geoderma*, 2003, Vol. 114, pp. 279–303.
17. Kim J., Roh A.-S., Choi S.-Ch., Kim E.-J., Choi M.-T., Ahn B.-K., Kim S.-K., Lee Y.-H., Joa J.-H., Kang S.-S., Lee S., Ahn J.-H., Song J., Weon H.-Y. Soil pH and electrical conductivity are key edaphic factors shaping bacterial communities of greenhouse soils in Korea, *Journal of Microbiology*, 2016, Vol. 54, pp. 838–845. DOI: [10.1007/s12275-016-6526-5](https://doi.org/10.1007/s12275-016-6526-5).
18. Loke M.H., Chambers J.E., Rucker D.F., Kuras O., Wilkinson P.B., Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method, *Journal of Applied Geophysics*, 2013, Vol. 95, pp. 135–156. DOI: [10.1016/j.jappgeo.2013.02.017](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.02.017).
19. Lueck E., Ruehlmann J., Resistivity mapping with GEOPHILUS ELECTRICUS – Information about lateral and vertical soil heterogeneity, *Geoderma*, 2013, Vol. 199, pp. 2–11. DOI: [10.1016/j.geoderma.2012.11.009](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.11.009).
20. Lund E.D., Christy C.D., Drummond P.E., Practical applications of soil electrical conductivity mapping, *Precision Agriculture. Proceedings of the Second European Conference on Precision Agriculture*. Sheffield: Sheffield Academic Press Ltd, 1999, pp. 771–779.
21. Medeiros W., Queiroz D., Valente D., Pinto F., Melo C. The temporal stability of the variability in apparent soil electrical conductivity, *Bioscience Journal*, 2016, Vol. 32, pp. 150–159, DOI: [10.14393/BJ-v32n1a2016-26287](https://doi.org/10.14393/BJ-v32n1a2016-26287).
22. Panissod C., Dabas M., Jolivet A., Tabbagh A., A novel mobile multipole system (MUCEP) for shallow (0–3 m) geoelectrical investigation: the “Vol-de-canards” array, *Geophysical Prospecting*, 1997, Vol. 45 (6), pp. 983–1002, DOI: [10.1046/j.1365-2478.1997.650303.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.1997.650303.x).

23. Singh G., Williard K.W.J., Schoonover J.E., Spatial Relation of Apparent Soil Electrical Conductivity with Crop Yields and Soil Properties at Different Topographic Positions in a Small Agricultural Watershed, *Agronomy*, 2016, Vol. 6 (4), 57 p., DOI: [10.3390/agronomy6040057](https://doi.org/10.3390/agronomy6040057).

24. Stadler A., Rudolph S., Kupisch M., Langensiepen M., van der Kruk J., Ewert F., Quantifying the effects of soil variability on crop growth using apparent soil electrical conductivity measurements, *European Journal of Agronomy*, 2015, Vol. 64, pp. 8–20, DOI: [10.1016/j.eja.2014.12.004](https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.12.004).