

# ФАРМАКОГНОЗИЯ И БОТАНИКА

УДК 631.425:53

DOI: <https://doi.org/10.52540/2074-9457.2025.1.58>

Г. Н. Бузук

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРОФНОСТИ ПОЧВ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМ МЕТОДОМ. СООБЩЕНИЕ 9. ОТ ЛИНЕАРИЗАЦИИ К ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЙ РЕГРЕССИИ И КОРРЕКТИРОВКЕ ВЛАЖНОСТИ

г. Витебск, Республика Беларусь

*Целью настоящей работы явилась апробация и оптимизация техники измерений и расчетов электрических параметров почвы при использовании экспоненциальной регрессии в лабораторных экспериментах и полевых условиях.*

*Установлена применимость экспоненциальной регрессии для расчета удельного сопротивления почвы ( $ER$ ) при использования квадратной установки и расчета геометрического коэффициента по формуле G. M. Habberjam (2) при различной объемной влажности ( $\Theta$ ) почвы. При этом необходимость каких-либо дополнительных преобразований или коррекции данных отсутствует. Для получения сопоставимых данных продолжено дальнейшее развитие способа расчета удельного электрического сопротивления почвы для «нулевого» заглубления электродов.*

*Подтверждено наличие трех типов зависимостей  $ER$  от глубины погружения электродов в почву. Эти зависимости могут интерпретироваться как указание на различные характер и стадии почвообразовательного процесса в фитоценозах. Предложено новое уравнение для корректировки влияния влажности на электросопротивление почвы ( $ER_w$ ). Квадратная установка может использоваться как в лабораторных, так и полевых определениях электросопротивления (электропроводности) почвы и почвенных экстрактов и позволяет работать с ненарушенными образцами почвы *in situ*. Методика может использоваться для косвенной оценки трофности почв в местах произрастания или выращивания лекарственных растений.*

**Ключевые слова:** геофизические методы, электрофизика почв, квадратная установка, электросопротивление, объемная влажность.

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач в лекарственном растениеводстве, а также в экологических и геоботанических исследованиях, является разработка и совершенствование методик определения трофности почв с использованием экспрессных и малоинвазивных методов. Перспективным инструментом в этой области являются электрофизические методы.

Многочисленные исследования подтверждают тесную связь между электропроводностью или удельным электрическим сопротивлением ( $ER$ ) почвы и ключевыми параметрами, определяющими ее трофность, такими как содержание минеральных элементов, органического вещества, гранулометрическим составом и другими [1–9].

На основе этих данных были разрабо-

таны технические устройства для оценки качества почв, которые находят применение при создании почвенных карт в системах точного земледелия [10–15].

Однако широкое применение электрофизических методов в природных условиях пока ограничено из-за влияния множества факторов, способных искажать результаты измерений электропроводности или электросопротивления почвы.

Ранее нами предложены новые способы обработки экспериментальных данных, полученных с помощью квадратной установки, в лабораторных и полевых условиях [16–17].

Целью настоящей работы явилась апробация и оптимизация техники измерений и расчетов электрических параметров почвы при использовании экспоненциальной регрессии без дополнительной линейаризации данных.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Для измерения электрического сопротивления почвы использовали 4-электродную квадратную AMNB установку G. M. Habberjam [18, 19].

Расстояние между электродами (а) составляло 35 мм. Общая длина электродов – 130 мм, диаметр – 3 мм.

Для измерения электрических параметров использовали новое, усовершенствованное устройство на основе arduino Mega 2560 на микроконтроллере ATmega 2560, для повышения точности дополненное внешним 16-битным аналого-цифровым преобразователем ADS1115.

Напряжение на токовых электродах А и В составляло 5 вольт. Ток в цепи оценивали по падению напряжения на шунтовом резисторе ( $R_{ш}$ ) в 330 ом. Измерение падения напряжения ( $U_{ш}$ ) на шунтовом резисторе ( $R_{ш}$ ) и индикаторных электродах М и N ( $R_{mn}$ ) проводили циклами по 50–70 отсчетов. Одновременно фиксировали суммарное время опроса электродов.

На основе сохраненных в массиве данных рассчитывали True RMS (True Root Mean Square – истинное среднеквадратичное значение) для падения напряжения на шунтовом резисторе и индикаторных электродах М и N, а также электрическое сопротивление почвы ( $R$ ).

Электрическое сопротивление почвы

рассчитывали по формуле (1):

$$R = \frac{U_{mn}}{U_{ш}} \cdot R_{ш}, \quad (1)$$

где  $U_{mn}$  – падение напряжения на индикаторных электродах М и N;

$U_{ш}$  – падение напряжения ( $U_{ш}$ ) на шунтовом резисторе ( $R_{ш}$ );

$R_{ш}$  – значение шунтового резистора, ( $R_{ш}$ ) в 330  $\Omega$ .

Для снижения поляризации электродов после проведения 50–70 считываний с помощью Н-моста (DRV8833) в установке меняли направление тока на противоположное в течение зафиксированного интервала времени. Затем цикл измерений электрического сопротивления повторяли.

Экспериментально установлено, что значения сопротивления почвы ( $R$ ) достигают стабильности уже после второго цикла измерений (рисунок 1). В дальнейшем регистрацию результатов проводили на 3-м цикле измерений.

Для определения объемной влажности почвы использовали емкостной датчик (рисунок 2). Калибровку датчика проводили простейшим способом: воздух – 0%, вода – 100% влажность. Для сокращения времени отклика датчика на изменения влажности почвы между сигнальным раз-

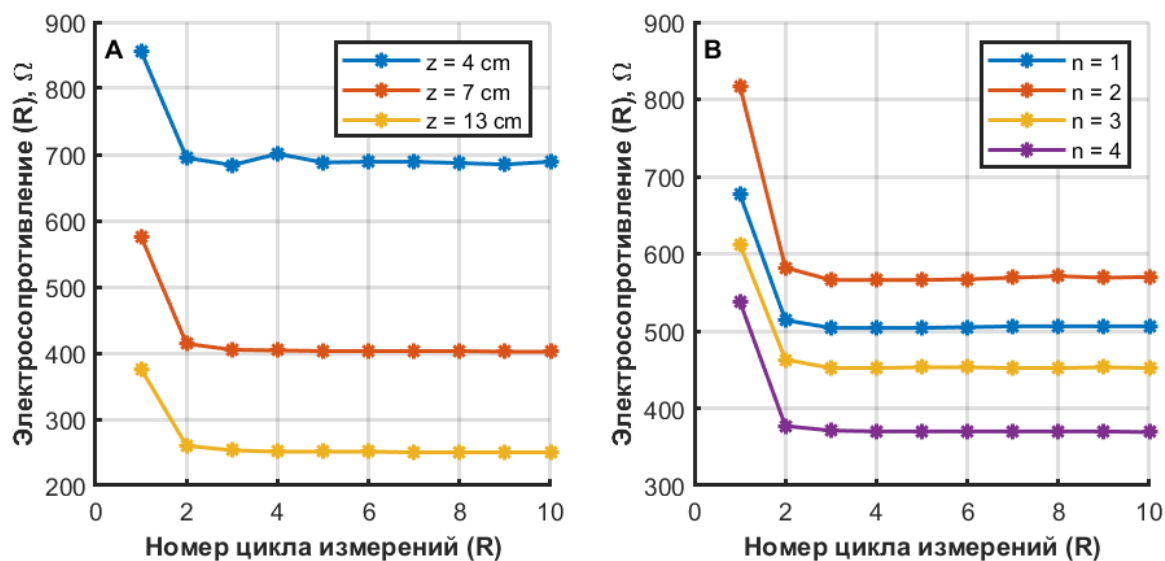


Рисунок 1. – Влияние количества циклов измерения на электросопротивление почвы при различных глубинах (z) погружения электродов (А) и при глубине 7 см в различных точках (n) фитоценоза (В)



Рисунок 2. – Датчик для измерения влажности почвы

емом датчика и землей был дополнительно установлен резистор номиналом 1 МΩ. Влажность почвы рассчитывали как среднее из 10 измерений датчиком влажности в течение одного измерительного цикла.

В лабораторных опытах использовали почву, насыщенную водой до полной влагоемкости, а также почву с объемной влажностью 75% (0,75 в долях единицы).

В полевых условиях измерение электрического сопротивления ( $R$ ) почвы проводили на вейниковом лугу, расположенном на месте осушенного торфяного болота, в 40–50-летних сосняке и зеленомошном ельнике, в старовозрастном (более 150 лет) сосняке зеленомошном, а также на территориях различных агрофитоценозов и залежей. При наличии подстилки или лугового войлока перед измерением электросопротивления их удаляли до минерального слоя почвы, который перед измерением слегка уплотняли.

В одной точке проводили измерение электрического сопротивления почвы ( $R$ ), постепенно вдавливая электроды в почву, при четырех возрастающих глубинах, вплоть до полного погружения измерительных электродов в почву (130 мм). Глубину погружения голых электродов в почву [16, 17, 20–25] замеряли с помощью линейки.

Геометрический коэффициент установки рассчитывали по формуле (18, 19, 26):

$$k = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{2 - \sqrt{2}}, \quad (2)$$

где  $a$  – расстояние между электродами;  
 $\pi$  – 3,1415.

Для определения электрического сопротивления при «нулевом» заглублении электродов ( $R_0$ ) на основании полученных четырех измерений электросопротивления ( $R$ ) при четырех заглублениях электродов ( $z$ ) были рассчитаны коэффициенты ( $a, b$ ) экс-

поненциальной регрессии ( $y = a \cdot \exp(b \cdot x)$ ) и коэффициент детерминации ( $R^2$ ). Значение  $R_0$  соответствует коэффициенту  $a$  экспоненциальной регрессии ( $R_0 = a$ ).

Удельное электрическое сопротивление почвы ( $ER$ ) рассчитывали по формуле (3):

$$ER = R_0 \cdot k, \quad (3)$$

где  $R_0$  – электрическое сопротивление почвы при «нулевом» заглублении электродов, Ω;

$k$  – геометрический коэффициент установки,  $m$ ;

$ER$  – удельное электрическое сопротивление почвы, Ω ·  $m$ .

Отличие предложенного в настоящей работе способа расчета электрического сопротивления почвы при «нулевом» заглублении электродов от примененного в предыдущих работах [16, 17] заключается в том, что в качестве зависимой переменной при аппроксимации линейной функцией использовалось не электросопротивление почвы ( $R$ ), а удельное электросопротивление ( $ER$ ), т. е.  $ER = R \cdot k$ .

Электросопротивление почвы практически линейно зависит от температуры. Повышение температуры на 1 °C вызывает при прочих равных условиях изменение удельной электропроводимости почвы приблизительно на 2–3%, и наоборот [27–30]. В связи с этим для получения сопоставимых данных требуется корректировка влияния температуры (приведение к стандартной равной 25 °C).

Корректирующий температурный фактор  $ft$  (для 25 °C) рассчитывали по формуле (4) [31]:

$$ft = 0,4470 + 1,4034 \cdot \exp(-T/26,815), \quad (4)$$

где  $T$  – текущая температура, °C.

Скорректированное электросопротивление почвы при температуре 25 °С рассчитывали по формуле (5):

$$ER_{25} = f_t \cdot ER, \quad (5)$$

где  $ER$  – текущее электросопротивление почвы при объемной влажности  $\Theta_1$  и температуре  $T$ ;

$ER_{25}$  – скорректированное электросопротивление почвы при объемной влажности  $\Theta_1$  и температуре 25 °С.

Визуализацию и анализ данных осуществляли средствами Матлаб, включая собственное программное обеспечение на основе Матлаб.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Установленная нами ранее нелинейная зависимость электрического сопротивления почвы от глубины погружения в почву электродов установки является новым фактором, оказывающим существенное влияние на получаемые результаты [16, 17, 20–25]. Было обнаружено, что с увеличением заглубления электродов в почву фиксируемая электропроводность почвы снижается и меняется по степенному закону. Такого рода явление наблюдалось как с водными экстрактами почвы, так и в лабораторных и полевых опытах с различными типами почв и в разные периоды вегетационного сезона. Это создавало высокую вариабельность получаемых результатов. Промежуточное решение этой проблемы удалось получить при обнаружении возможности линеаризации зависимости удельного электрического сопротивления почвы от глубины погружения электродов в почву при использовании в расчетах геометрического коэффициента ( $k_2$ ), предложенного Веннером (6) [32, 33]:

$$k_2 = \frac{4\pi}{\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + 4z^2}} - \frac{1}{\sqrt{a^2 + z^2}}}, \quad (6)$$

где  $a$  – расстояние между электродами;  
 $z$  – глубина погружения электрода в исследуемый субстрат,  
 $\pi$  – 3,1415.

Было предложено использовать свободный член линейной регрессии для расчета  $ER$  при «нулевом» заглублении электродов.

Это позволило устранить вариабельность электросопротивления почвы, вызванную различной степенью заглубления электродов, и тем самым стандартизировать измерения  $ER$ . Однако при переходе от водных экстрактов почвы и почвы, насыщенной водой до полной влагоемкости к почве с меньшей влажностью в целом ряде случаев была обнаружена некоторая нелинейность зависимости, которую удалось уменьшить, но не до конца устранить применением квадратного преобразования глубины погружения электродов в почву ( $\sqrt{z}$ ) [16, 17].

В ходе дальнейших исследований нами было предложено использовать для аппроксимации зависимости между электрическим сопротивлением почвы и глубиной погружения электродов вместо линейной экспоненциальную функцию  $y = a \cdot \exp(b \cdot x)$ . В экспоненциальной функции коэффициент  $a$  дает начальное условие для значения  $x = 0$ , т. е. то же, что и свободный член линейной регрессии. Это позволило значение начального условия (коэффициента  $a$  экспоненциальной функции) использовать для расчета электрического сопротивления почвы для «нулевого» заглубления электродов и отказаться от линеаризации априорно нелинейной зависимости.

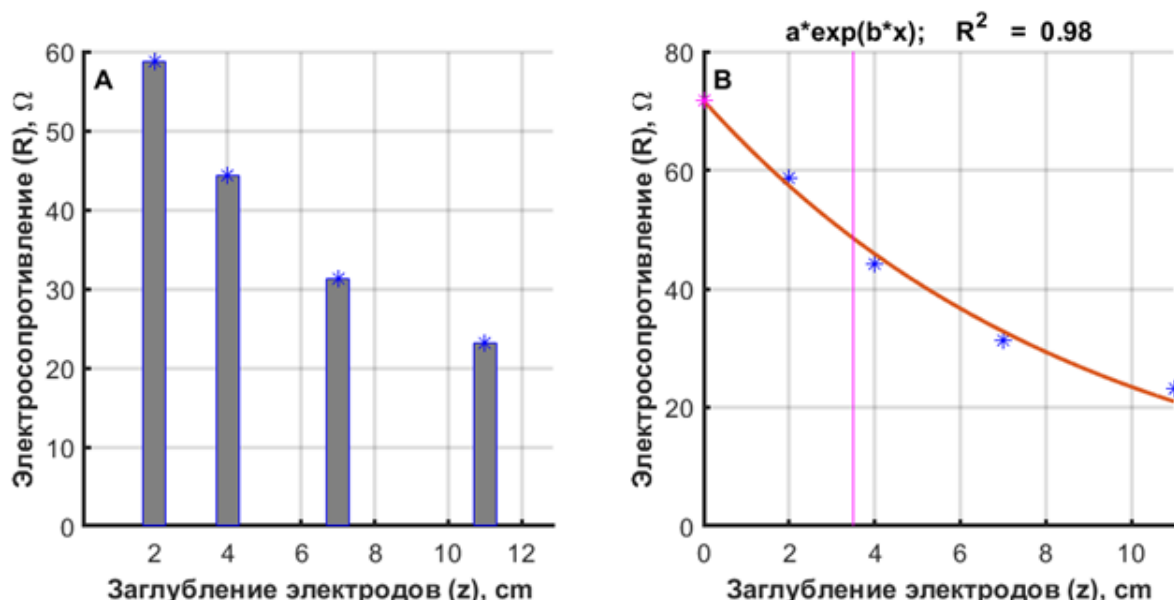
Полученные данные в лабораторных опытах по влиянию заглубления неизолированных (голых) электродов в насыщенную до полной влагоемкости почву и почву с объемной влажностью 75% представлены графически на рисунках 3 и 4 соответственно.

Как можно видеть из рисунков 3 и 4, зависимость электросопротивления почвы от глубины погружения электродов носит нелинейный характер. Степень нелинейности, как это можно судить по величине коэффициента  $b$ , увеличивается при снижении влажности почвы. Ожидается увеличение электросопротивления почвы при снижении ее объемной влажности (с 26,9 до 63,5 %).

В дальнейшей работе с использованием экспоненциальной регрессии были пересчитаны заново данные, полученные в полевых условиях ранее, а также новые данные.

Результаты расчетов представлены графически на рисунках 5–7. Подтверждено наличие трех типов зависимостей.

Первый тип зависимости наблюдался в большинстве опытов и проявлялся в мо-



Обозначения: вертикальная линия означает заглубление электродов, равное расстоянию между ними ( $a = z$ ).

Рисунок 3. – Влияние заглубления электродов на электросопротивление песчаной почвы при полной влагонасыщенности – лабораторный эксперимент (объемная влажность принята за 100%):  $a = 71,69933$ ,  $b = -0,11166$ ,  $R^2 = 0,98$ ,  $ER = 26,9$ ,  $k = 0,375412$

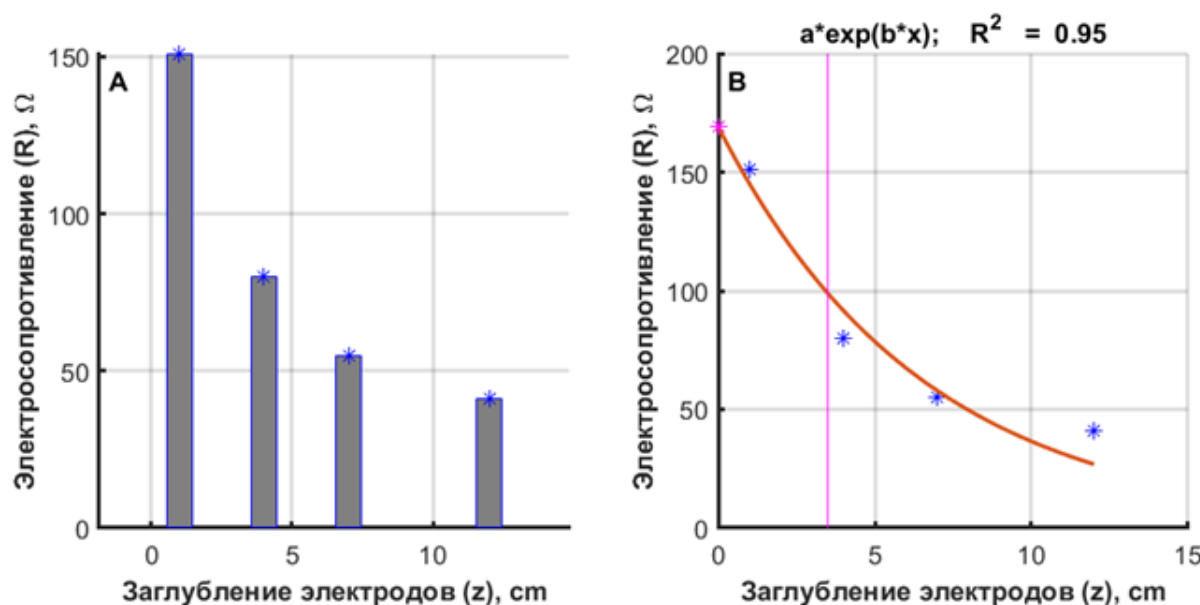


Рисунок 4. – Влияние заглубления электродов на электросопротивление песчаной почвы при объемной влажности 75% – лабораторный эксперимент:  $a = 169,2098$ ,  $b = -0,15337$ ,  $R^2 = 0,95$ ,  $ER = 63,5$ ,  $k = 0,375412$

нотонном нелинейном снижении электрического сопротивления почвы с увеличением заглубления электродов (рисунок 5). Такого рода зависимости наблюдались для большинства исследованных агрофитоценозов, залежей, а также вторичных лесов, возникших в ходе зарастания или лесопосадок почв, выведенных из сельскохозяй-

ственного оборота.

В старовозрастном сосновом лесу наблюдали второй тип зависимости электросопротивления почвы от глубины погружения электродов, когда вместо ожидаемого снижения наблюдалось прогрессирующее повышение электрического сопротивления почвы (рисунок 6).

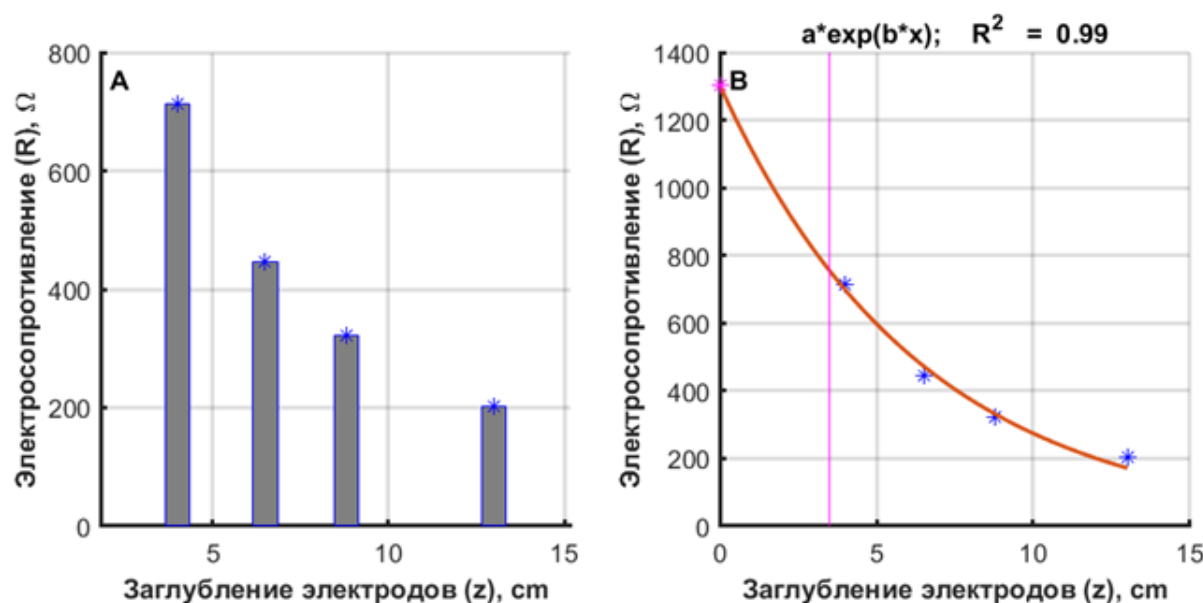


Рисунок 5. – Влияние заглубления электродов на электросопротивление почвы агрофитоценозе (поле под клевером):

$$a = 1304,038, b = -0,156, R^2 = 0,99, ER = 489,6, k = 0,375412$$

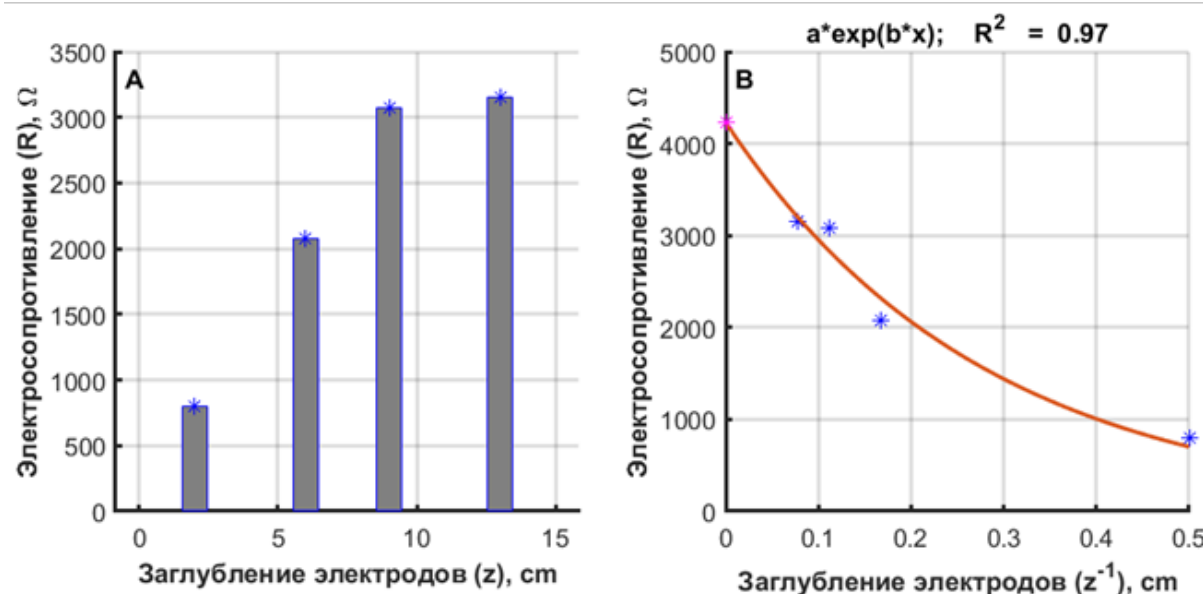


Рисунок 6. – Влияние заглубления электродов на электросопротивление почвы в старовозрастном сосняке зеленомошном:

$$a = 4230,646, b = -3,59223, R^2 = 0,97, ER = 1588,2, k = 0,375412$$

Данный факт указывает на наличие в почве слоя (горизонта) с высоким электрическим сопротивлением. Наиболее вероятно, что им является подзолистый горизонт, который формируется на поздних стадиях (более 90 лет) постагрогенного восстановления экосистем сосновых лесов [34]. В условиях переменного застойно-промывного водного режима почв имеет место ин-

тенсивный вынос не только железа и марганца, но и кальция, магния и алюминия, происходит отчетливое накопление кварца и потеря ила. Интенсивный вынос элементов из горизонта и накопление в нем непроводящего электрический ток минерала кварца ведет к снижению электропроводности, соответственно, увеличению электрического сопротивления [27, 35–39].

Для такого случая расчет электросопротивления почвы при «нулевом» заглублении электродов проводили с применением предложенного ранее обратного преобразования ( $z^{-1} = 1/z$ ) [16, 17].

Третий тип зависимости наблюдался в ограниченном числе случаев. С глубиной погружения электродов в почву сначала наблюдалось увеличение электрического

сопротивления почвы, а после достижения максимума – ее снижение (рисунок 7). Такая динамика электрического сопротивления, вероятнее всего, является следствием «прокалывания» электродами тонкого слоя почвы с высоким сопротивлением (предположительно, подзолистого горизонта) [40] до слоя с более низким сопротивлением.

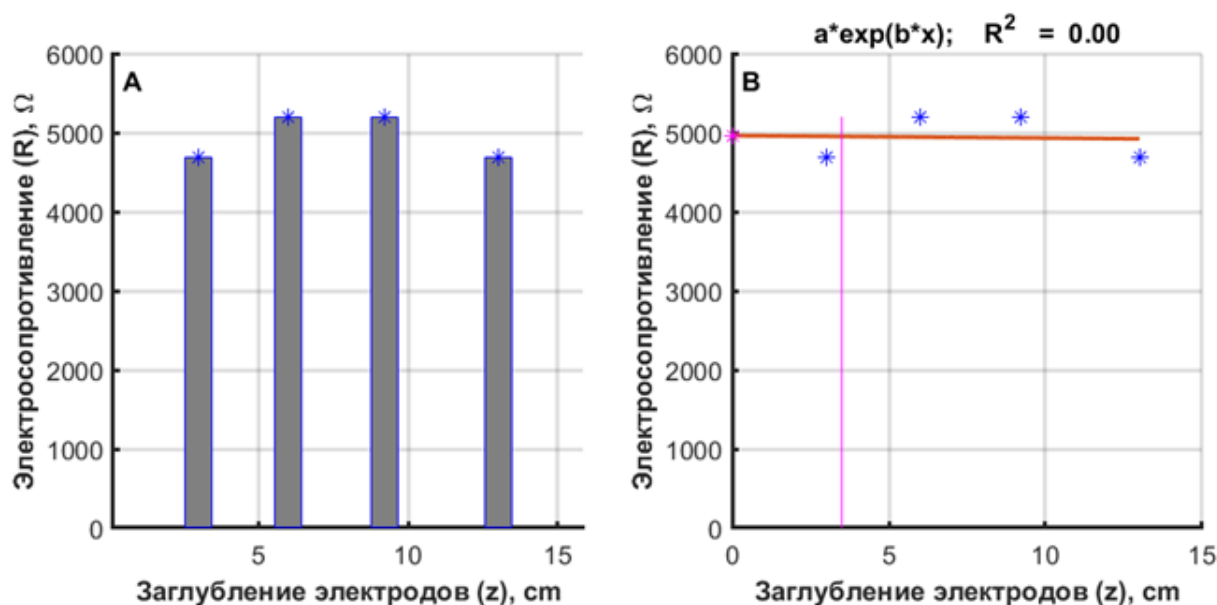


Рисунок 7. – Влияние заглубления электродов на электросопротивление почвы в старовозрастном сосняке зеленомошном:  $a = 4962,067$ ,  $b = -0,00064$ ,  $R^2 = 0,002$ ,  $ER = 1862,8$ ,  $k = 0,375412$

В этом случае коэффициент детерминации ( $R^2$ ) экспоненциальной регрессии приближается к нулю, а коэффициент  $a$  характеризует среднее сопротивление горизонта с высоким сопротивлением (рисунок 7).

Более точно его толщина может быть оценена при большей детализации измерений электрического сопротивления с глубиной погружения электродов в почву и использовании изолированных (точечных) электродов [16].

Дополнительные характеристики электросопротивления почвы с горизонтом высокого сопротивления могут быть получены также при увеличении общей длины электродов. Работа такого рода в перспективе.

Электрическое сопротивление почвы существенно зависит от ее влажности [27–30, 41]. Обычно снижение влажности сопровождается достаточно резким увеличением сопротивления, которое хорошо аппроксимируется степенной или экспоненциальной функцией (рисунок 8) [41].

Поэтому для получения корректных сравнительных данных необходимо учитывать влияние влажности. Ранее нами было установлено, что обратное преобразование объемной влажности ( $\Theta^{-1}$ ) позволяет привести нелинейную зависимость (степенную или экспоненциальную) электросопротивления почвы от объемной влажности к линейной (рисунок 8) [16, 17].

Это наблюдение позволило нам в дальнейшем предложить простую формулу для корректировки влияния влажности на электрическое сопротивление почвы, основанную на использовании обратно преобразованных значений объемной влажности ( $\Theta^{-1} = 1/\Theta$ ) и исходного удельного электросопротивления  $ER$ :

$$ER_w = (\Theta_2^{-1} \cdot ER) / (\Theta_1^{-1}) = (1 / \Theta_2 \cdot ER) / (1 / \Theta_1), \quad (7)$$

где  $ER$  – текущее электросопротивление

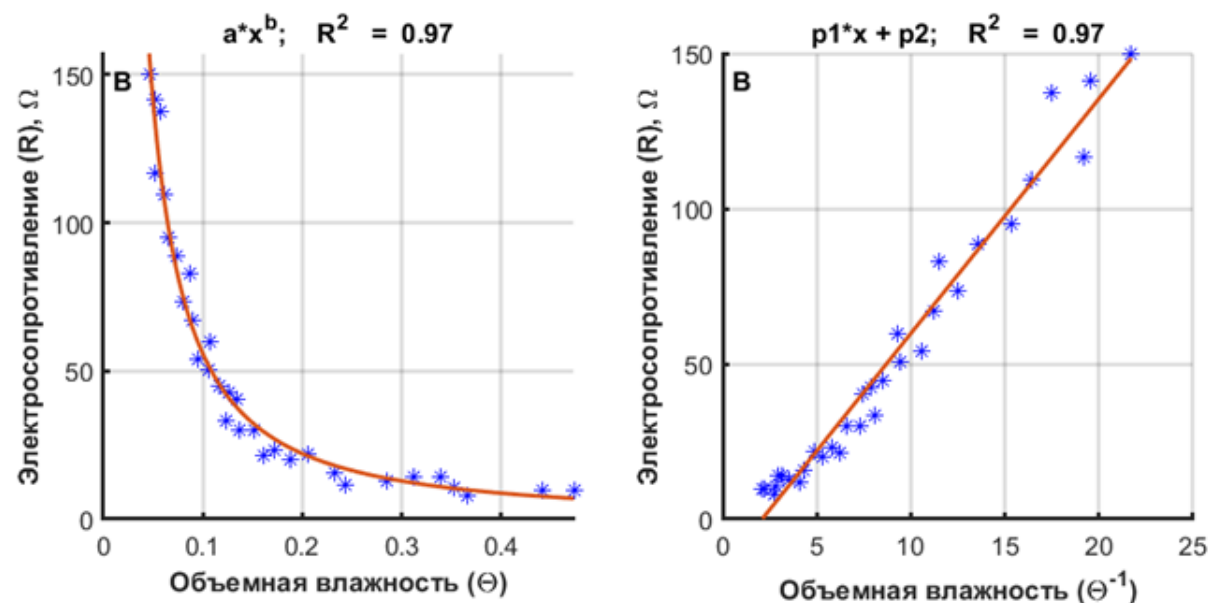


Рисунок 8. – Зависимость электросопротивления почвы от объемной влажности почвы (по материалам работ [41])

ние почвы при объемной влажности  $\Theta_1$ ;

$ER_w$  – скорректированное электросопротивление почвы для объемной влажности  $\Theta_2$ .

Это позволяет сравнивать электрическое сопротивление почвы с различных мест, полученных при разной текущей объемной влажности почвы, приводя их к конкретной, например 75% или иной другой влажности, по необходимости.

Определенный интерес представляет отношение  $b = ER / \Theta^{-1}$ , которое по сути является наклоном линии регрессии в конкретной точке. Наклон линии регрессии зависимости электросопротивления почвы (ER) от преобразованной объемной влажности ( $\Theta^{-1}$ ), как нами ранее было показано [16, 17], практически функционально зависит от содержания солей в почве (на основании данных лабораторных опытов [42]). Таким образом, коэффициент  $b$  может служить индикатором содержания солей в почве, а возможно, и в почвенном растворе. Однако для подтверждения выдвинутого предположения нужны дополнительные исследования.

При необходимости может быть проведена калибровка квадратной установки с помощью тестовых растворов солей натрия хлорида (585 мг/л – 9,34 Ω м) или калия хлорида (745,6 мг/л – 7,81 Ω м) [43].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполненных исследований доказана возможность применения экспоненциальной регрессии при расчете электросопротивления почвы при разной глубине погружения электродов в почву и расчете удельной электропроводности почвы для «нулевого» заглубления электродов.

Подтверждено наличие трех типов связей электросопротивления от глубины погружения электродов в почву. При первом типе наблюдается монотонное снижение электросопротивления при увеличении глубины погружения электродов в почву. При втором типе, напротив, имеет место повышение сопротивления, при третьем – повышение с максимумом, а затем снижение. Наличие второго и третьего типа зависимостей интерпретируется присутствием подзолистого горизонта почвы. Предложен новый способ коррекции электросопротивления почвы при различной объемной влажности:

$$ER_w = (\Theta_2^{-1} \cdot ER) / (\Theta_1^{-1}) = (1 / \Theta_2 \cdot ER) / (1 / \Theta_1). \quad (8)$$

Коррекция электропроводности почвы в зависимости от температуры и объемной влажности может проводиться в следующей последовательности:

$$ER \rightarrow ER_{25} \rightarrow ER_w. \quad (9)$$

В целом же квадратная установка может в равной степени использоваться как в лабораторных, так и полевых определениях электросопротивления (электропроводности) почвы и почвенных экстрактов и позволяет работать с ненарушенными образцами почвы *in situ*, в том числе в местах произрастания лекарственных растений.

### SUMMARY

G. N. Buzuk

#### DETERMINATION OF SOIL TROPHICITY USING ELECTROPHYSICAL METHODS.

##### REPORT 8. FROM LINEARIZATION TO EXPONENTIAL REGRESSION AND MOISTURE ADJUSTMENT

The purpose of this study was to test and optimize techniques for measuring and calculating electrical soil parameters using exponential regression in laboratory experiments and field conditions.

Applicability of exponential regression for calculating soil resistivity (ER) was established when using a square device and calculating the geometric factor based on the G. M. Habberjam formula (2) for different soil volumetric moisture ( $\Theta$ ). In this case, no additional data transformations or corrections were necessary. The method for calculating the specific electrical resistivity of soil at "zero" electrode depth was further developed to ensure comparable data.

Three types of ER dependencies from electrode penetration depth were confirmed. These dependencies can be interpreted as an indicator of different characteristics and stages of soil formation processes in phytocoenoses.

A new equation for adjusting moisture effect on soil resistivity (ER<sub>w</sub>) was proposed.

The square device can be used for both laboratory and field measurements of soil resistivity (electrical conductivity) and soil extracts, allowing for *in situ* work with undisturbed soil samples. The methodology can be used to indirectly assess soil trophicity in the places of medicinal plants growth or cultivation.

Keywords: geophysical methods, soil electrophysics, square device, resistivity, volumetric moisture.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Relationship between apparent electrical conductivity and soil physical properties in a Malaysian paddy field / A. Gholizadeh, M. S. M Amin, A. R. Anuar, A. Wayayok // Archives of agronomy

and soil science. – 2012. – Vol. 58, N 2. – P. 155–168. – DOI: 10.1080/03650340.2010.509132.

2. Molin, J. P. Establishing management zones using soil electrical conductivity and other soil properties by the fuzzy clustering technique / J. P. Molin, C. N. Castro // Scientia agricola. – 2008. – Vol. 65, N 6. – P. 567–573. – DOI: 10.1590/S0103-90162008000600001.

3. Moral, F. J. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques / F. J. Moral, J. M. Terrón, J. R. M. Da Silva // Soil and tillage research. – 2010. – Vol. 106, N 2. – P. 335–343. – DOI: 10.1016/j.still.2009.12.002.

4. Yan, L. Delineation of site-specific management zones based on temporal and spatial variability of soil electrical conductivity / L. Yan, S. Zhou, L. Feng // Pedosphere. – 2007. – Vol. 17, N 2. – P. 156–164.

5. Morari, F. Application of multivariate geostatistics in delineating management zones within a gravelly vineyard using geo-electrical sensors / F. Morari, A. Castrignanò, C. Pagliarin // Computers and electronics in agriculture. – 2009. – Vol. 68, N 1. – P. 97–107. – DOI: 10.1016/j.compag.2009.05.003.

6. Scale dependent variability of soil electrical conductivity by indirect measures of soil properties / A. Bekele, W. H. Hudnall, J. J. Daigle [et al.] // Journal of terramechanics. – 2005. – Vol. 42, N 3/4. – P. 339–351. – DOI: 10.1016/j.jterra.2004.12.004.

7. Soil management zones delineated by electrical conductivity to characterize spatial and temporal variations in potato yield and in soil properties / A. N. Cambouris, M. C. Nolin, B. J. Zebarth, M. R. Laverdiere // American journal of potato research. – 2006. – Vol. 83, N 5. – P. 381–395. – DOI: 10.1007/BF02872015.

8. McBride, R. A. Estimating forest soil quality from terrain measurements of apparent electrical conductivity / R. A. McBride, S. C. Shrive, A. M. Gordon // Soil Science Society of America journal. – 1990. – Vol. 54, N 1. – P. 290–293. – DOI: 10.2136/sssaj1990.03615995005400010047x.

9. Corwin, D. L. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity: Part II. Case study / D. L. Corwin, S. M. Lesch // Computers and electronics in agriculture. – 2005. – Vol. 46, N 1/3. – P. 135–152. – DOI: 10.1016/j.compag.2004.11.003.

10. Lund, E. D. Practical applications of soil electrical conductivity mapping / E. D. Lund, C. D. Christy, P. E. Drummond // Precision agriculture '99 : proceedings of the 2nd European Conference on Precision Agriculture / ed. J. V. Stafford. – Sheffield: Sheffield Academic Press, 1999. – P. 771–779.

11. Soil sensors and plant wearables for smart and precision agriculture / H. Yin, Y. Cao, B. Marelli [et al.] // Advanced materials. – 2021. – Vol. 33, N 20. – P. e2007764. – DOI: 10.1002/adma.202007764.

12. Imaging the electrical conductivity of the soil profile and its relationships to soil water patterns and drainage characteristics / A. G. El-Naggar, C. B. Hedley, P. Roudier [et al.] // *Precision agriculture*. – 2021. – Vol. 22, N 4. – P. 1045–1066. – DOI: 10.1007/s11119-020-09763-x.
13. Monteiro, A. Precision agriculture for crop and livestock farming–Brief review / A. Monteiro, S. Santos, P. Gonçalves // *Animals*. – 2021. – Vol. 11, N 8. – P. 2345. – DOI: 10.3390/ani11082345.
14. Heiniger, R. W. Using soil electrical conductivity to improve nutrient management / R. W. Heiniger, R. G. McBride, D. E. Clay // *Agronomy journal*. – 2003. – Vol. 95, N 3. – P. 508–519. – DOI: 10.2134/agronj2003.0508.
15. Якушев, В. В. Точное земледелие: теория и практика / В. В. Якушев. – Санкт-Петербург: Агрофизический науч.-исслед. ин-т, 2016. – 364 с.
16. Бузук, Г. Н. Определение трофности почв электрофизическим методом. Сообщение 7. Новое в технике измерений и расчетов / Г. Н. Бузук // *Вестник фармации*. – 2024. – № 2. – С. 31–41. – DOI: 10.52540/2074-9457.2024.2.31.
17. Бузук, Г. Н. Определение трофности почв электрофизическим методом. Сообщение 8. Полевые испытания с квадратной установкой / Г. Н. Бузук // *Вестник фармации*. – 2024. – № 4. – С. 44–54.
18. Habberjam, G. M. The use of a square configuration in resistivity prospecting / G. M. Habberjam, G. E. Watkins // *Geophysical prospecting*. – 1967. – Vol. 15, N 3. – P. 445–467. – DOI: 10.1111/j.1365-2478.1967.tb01798.x.
19. Habberjam, G. M. The effects of anisotropy on square array resistivity measurements / G. M. Habberjam // *Geophysical prospecting*. – 1972. – Vol. 20, N 2. – P. 249–266.
20. Бузук, Г. Н. Определение трофности почв электрофизическим методом. Сообщение 1. Устройство и лабораторная методика // *Вестник фармации*. – 2021. – № 3. – С. 32–40. – DOI: 10.52540/2074-9457.2021.3.32.
21. Бузук, Г. Н. Определение трофности почв электрофизическим методом. Сообщение 2. Конструкция электродов и способ расчета геометрического коэффициента / Г. Н. Бузук // *Вестник фармации*. – 2021. – № 4. – С. 46–52. – DOI: 10.52540/2074-9457.2021.4.46.
22. Бузук, Г. Н. Определение трофности почв электрофизическим методом. Сообщение 3. Корректировка влияния влажности / Г. Н. Бузук // *Вестник фармации*. – 2021. – № 4. – С. 74–84. – DOI: 10.52540/2074-9457.2021.4.74.
23. Бузук, Г. Н. Определение трофности почв электрофизическим методом. Сообщение 4. Почвенная матрица / Г. Н. Бузук // *Вестник фармации*. – 2022. – № 1. – С. 56–62. – DOI: 10.52540/2074-9457.2022.1.56.
24. Бузук, Г. Н. Определение трофности почв электрофизическим методом. Сообщение 5. Полевые испытания / Г. Н. Бузук // *Вестник фармации*. – 2022. – № 2. – С. 65–76. – DOI: 10.52540/2074-9457.2022.2.65.
25. Бузук, Г. Н. Определение трофности почв электрофизическим методом. Сообщение 6. Квадратная установка, конструкция электродов и способ расчета геометрического коэффициента / Г. Н. Бузук // *Вестник фармации*. – 2022. – № 3. – С. 23–29. – DOI: 10.52540/2074-9457.2022.3.23.
26. Merlanti, F. Some considerations on the use of the geoelectric «square» array / F. Merlanti, M. Pavan // *Annals of geophysics*. – 1996. – Vol. 39, N 1. – P. 141–157. – DOI: 10.4401/ag-3958.
27. Поздняков, А. И. Электрофизика почв / А. И. Поздняков, А. Д. Позднякова. – Москва-Дмитров: Московский гос. ун-т, 2004. – 48 с.
28. Поздняков, А. И. Электрофизические свойства некоторых почв / А. И. Поздняков, Ч. Г. Гюлалыев. – Москва-Баку: Адильоглы, 2004. – 240 с.
29. Поздняков, А. И. Полевая электрофизика в почвоведении, мелиорации и земледелии / А. И. Поздняков, Н. Г. Ковалев, А. Д. Позднякова. – Тверь: Чудо, 2002. – 257 с.
30. Гюлалыев, Ч. Г. Зависимость удельной электропроводимости почвы от температуры / Ч. Г. Гюлалыев // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки*. – 2010. – № 4. – С. 43–45.
31. Comparing temperature correction models for soil electrical conductivity measurement / R. Ma, A. McBratney, B. Whelan [et al.] // *Precision agriculture*. – 2011. – Vol. 12, N 1. – P. 55–66. – DOI: 10.1007/s11119-009-9156-7.
32. Wenner, F. A method of measuring earth resistivity / F. Wenner // *Bulletin of the Bureau of Standards*. – Washington: Government Printing Office, 1916. – Vol. 12. – P. 469–478.
33. Comparison of three small-scale devices for the investigation of the electrical conductivity/resistivity of swelling and other clays / S. Kaufhold, C. Grisseman, R. Dohrmann R [et al.] // *Clays and clay minerals*. – 2014. – Vol. 62, N 1. – P. 1–12. – DOI: 10.1346/CCMN.2014.0620101.
34. Стадии постарогенного восстановления компонентов экосистем сосновых лесов национального парка «Смоленское Поозерье» / О. В. Шопина, А. П. Гераськина, А. И. Кузнецова [и др.] // *Почвоведение*. – 2023. – № 1. – С. 20–34. – DOI: 10.31857/S0032180X22600706.
35. Попов, А. И. Лабораторное моделирование условий перераспределения железа по профилю лесных песчаных почв / А. И. Попов, А. В. Русаков // *Грунтоведение*. – 2019. – № 2. – С. 57–62.
36. Зайдельман, Ф. Р. Причины образования светлых кислых элювиальных горизонтов в профиле почв / Ф. Р. Зайдельман // *Почвоведение*. – 2007. – № 10. – С. 1155–1167.
37. Зайдельман, Ф. Р. Деградирующая по-

чва. Можно ли этого избежать? / Ф. Р. Зайдельман // Вестник Российской академии наук. – 2007. – Т. 77, № 11. – С. 991–998.

38. Зайдельман, Ф. Р. Формы кислотного гидролиза и глееобразования и их роль в возникновении светлых кислых элювиальных (подзолистых) горизонтов / Ф. Р. Зайдельман // Почвоведение. – 2010. – № 4. – С. 387–398.

39. Зайдельман, Ф. Р. Роль глееобразования в формировании и деградации почв / Ф. Р. Зайдельман // Вестник Российской академии наук. – 2016. – Т. 86, № 4. – С. 342–351. – DOI: 10.7868/S086958731604023X.

40. Локальное протекание почвообразовательных процессов как фактор корректировки моделей плодородия почв / В. Савич, В. Наумов, М. Котенко [и др.] // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2017. – № 1. – С. 49–53.

41. Electrical resistivity survey in soil science: a review / A. Samouëlian, I. Cousin, A. Tabbagh [et al.] // Soil and tillage research. – 2005. – Vol. 83, N 2. – P. 173–193. – DOI: 10.1016/j.still.2004.10.004.

42. Laboratory evaluation of soil geotechnical properties via electrical conductivity / F. Zohra-Hadjadj, N. Laredj, M. Maliki [et al.] // Revista Facultad de Ingeniería. – 2019. – N 90. – P. 101–112. – DOI: 10.17533/udea.redin.n90a11.

43. Berkold, A. Elektrische Leitfähigkeit von Lösungen reiner Salze und von natürlichen Wässern / A. Berkold // LANDOLT-BÖRNSTEIN: Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaft und Technik : Neue Serie : Gruppe V: Geophysik und Weltraumforschung : Bd. 1: / Hrsg.: G. Angenheister. – Berlin: Springer, 1982. – S. 262–275.

## REFERENCES

1. Gholizadeh A, Amin MSM, Anuar AR, Wayayok A. Relationship between apparent electrical conductivity and soil physical properties in a Malaysian paddy field. Arch Agron Soil Sci. 2012;58(2):155–68. doi: 10.1080/03650340.2010.509132

2. Molin JP, Castro CN. Establishing management zones using soil electrical conductivity and other soil properties by the fuzzy clustering technique. Sci Agric. 2008;65(6):567–73. doi: 10.1590/S0103-90162008000600001

3. Moral FJ, Terrón JM, Da Silva JRM. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. Soil Tillage Res. 2010;106(2):335–43. doi: 10.1016/j.still.2009.12.002

4. Yan L, Zhou S, Feng L. Delineation of site-specific management zones based on temporal and spatial variability of soil electrical conductivity. Pedosphere. 2007;17(2):156–64

5. Morari F, Castrignanò A, Pagliarin C. Application of multivariate geostatistics in delineat-

ing management zones within a gravelly vineyard using geo-electrical sensors. Comput Electron Agric. 2009;68(1):97–107. doi: 10.1016/j.compag.2009.05.003

6. Bekele A, Hudnall WH, Daigle JJ, Prudente JA, Wolcott M. Scale dependent variability of soil electrical conductivity by indirect measures of soil properties. J Terramech. 2005;42(3-4):339–51. doi: 10.1016/j.jterra.2004.12.004

7. Cambouris AN, Nolin MC, Zebarth BJ, Laverdiere MR. Soil management zones delineated by electrical conductivity to characterize spatial and temporal variations in potato yield and in soil properties. Am J Potato Res. 2006;83(5):381–95. doi: 10.1007/BF02872015

8. McBride RA, Shrive SC, Gordon AM. Estimating forest soil quality from terrain measurements of apparent electrical conductivity. Soil Sci Soc Am J. 1990;54(1):290–3. doi: 10.2136/sssaj1990.03615995005400010047x

9. Corwin DL, Lesch SM. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity: Part II. Case study. Comput Electron Agric. 2005;46(1-3):135–52. doi: 10.1016/j.compag.2004.11.003

10. Lund ED, Christy CD, Drummond PE. Practical applications of soil electrical conductivity mapping. In: Stafford JV, editor. Precision agriculture : proceedings of the 2nd European Conference on Precision Agriculture. Sheffield, Great Britain: Sheffield Academic Press; 1999. p. 771–9

11. Yin H, Cao Y, Marelli B, Zeng X, Mason AJ, Cao C. Soil sensors and plant wearables for smart and precision agriculture. Adv Mater. 2021;33(20):e2007764. doi: 10.1002/adma.202007764

12. El-Naggar AG, Hedley CB, Roudier P, Horne D, Clothier BE. Imaging the electrical conductivity of the soil profile and its relationships to soil water patterns and drainage characteristics. Precis Agric. 2021;22(4):1045–66. doi: 10.1007/s11119-020-09763-x

13. Monteiro A, Santos S, Gonçalves P. Precision agriculture for crop and livestock farming—Brief review. Animals (Basel). 2021;11(8):2345. doi: 10.3390/ani11082345

14. Heiniger RW, McBride RG, Clay DE. Using soil electrical conductivity to improve nutrient management. Agron J. 2003;95(3):508–19. doi: 10.2134/agronj2003.0508

15. Iakushev VV. Precision farming: theory and practice. Sankt-Peterburg, RF: Agrofizicheskii nauch-issled in-t; 2016. 364 s. (In Russ.)

16. Buzuk GN. Determination of soil trophicity by electrophysical method. Message 7. New in measurement and calculation techniques. Vestnik farmatsii. 2024;(2):31–41. doi: 10.52540/2074-9457.2024.2.31. (In Russ.)

17. Buzuk GN. Determination of soil trophicity by electrophysical method. Message 8. Field testing with square setup. Vestnik farmatsii. 2024;(4):44–54. (In Russ.)

18. Habberjam GM, Watkins GE. The use

of a square configuration in resistivity prospecting. *Geophys Prospect.* 1967;15(3):445–67. doi: 10.1111/j.1365-2478.1967.tb01798.x

19. Habberjam GM. The effects of anisotropy on square array resistivity measurements. *Geophys Prospect.* 1972;20(2):249–66. doi: 10.1111/j.1365-2478.1972.tb00631.x

20. Buzuk GN. Buzuk GN. Determination of soil trophicity by electrophysical method. Message 1. Device and laboratory technique. *Vestnik farmatsii.* 2021;(3):32–40. doi: 10.52540/2074-9457.2021.3.32. (In Russ.)

21. Buzuk GN. Determination of soil trophicity by electrophysical method. Message 2. The design of the electrodes and the method of calculating the geometric coefficient. *Vestnik farmatsii.* 2021;(4):46–52. doi: 10.52540/2074-9457.2021.4.46. (In Russ.)

22. Buzuk GN. Determination of soil trophicity by electrophysical method. Message 3. Humidity correction. *Vestnik farmatsii.* 2021;(4):74–84. doi: 10.52540/2074-9457.2021.4.74. (In Russ.)

23. Buzuk GN. Determination of soil trophicity by electrophysical method. Message 4. Soil matrix. *Vestnik farmatsii.* 2022;(1):56–62. doi: 10.52540/2074-9457.2022.1.56. (In Russ.)

24. Buzuk GN. Determination of soil trophicity by electrophysical method. Message 5. Field tests. *Vestnik farmatsii.* 2022;(2):65–76. doi: 10.52540/2074-9457.2022.2.65. (In Russ.)

25. Buzuk GN. Determination of soil trophicity by electrophysical method. Message 6. Square installation, electrode design and method of calculating the geometric coefficient. *Vestnik farmatsii.* 2022;(3):23–9. doi: 10.52540/2074-9457.2022.3.23. (In Russ.)

26. Merlanti F, Pavan M. Some considerations on the use of the geoelectric «square» array. *Annals of Geophysics.* 1996;39(1):141–57. doi: 10.4401/ag-3958

27. Pozdniakov AI, Pozdniakova AD. Electrophysics of soils. Moskva–Dmitrov, RF: Moskovskii gos un-t; 2004. 48 s. (In Russ.)

28. Pozdniakov AI, Giulalyev ChG. Electrophysical properties of some soils. Moskva–Baku, RF, Azerbaidzhan: Adil'ogly; 2004. 240 s. (In Russ.)

29. Pozdniakov AI, Kovalev NG, Pozdniakova AD. Field electrophysics in soil science, melioration and agriculture. Tver', RF: ChuDo; 2002. 257 s. (In Russ.)

30. Giulalyev ChG. Dependence of specific electrical conductivity of soil on temperature. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Seriya: Estestvennye nauki.* 2010;(4):43–5. (In Russ.)

31. Ma R, McBratney A, Whelan B, Minasny B, Short M. Comparing temperature correction models for soil electrical conductivity measurement. *Precis Agric.* 2011;12(1):55–66. doi: 10.1007/s11119-009-9156-7

32. Wenner F. A method of measuring earth resistivity. In: *Bulletin of the Bureau of Standards.* Washington, USA: Government Printing Office;

1916. vol. 12. p. 469–78

33. Kaufhold S, Grisseman C, Dohrmann R, Klinkenberg M, Decher A. Comparison of three small-scale devices for the investigation of the electrical conductivity/resistivity of swelling and other clays. *Clays Clay Miner.* 2014;62(1):1–12. doi: 10.1346/CCMN.2014.0620101

34. Shopina OV, Geras'kina AP, Kuznetsova AI, Tikhonova EV, Titovets AV, Bavshin IM, i dr. Stages of post-agrogenic restoration of ecosystem components of pine forests of the Smolenskoye Poozerie National Park. *Pochvovedenie.* 2023;(1):20–34. doi: 10.31857/S0032180X22600706. (In Russ.)

35. Popov AI, Rusakov AV. Laboratory modeling of iron redistribution conditions along the profile of forest sandy soils. *Gruntovedenie.* 2019;(2):57–62. (In Russ.)

36. Zaidel'man FR. Causes of formation of light acidic eluvial horizons in the soil profile. *Pochvovedenie.* 2007;(10):1155–67. (In Russ.)

37. Zaidel'man FR. Degraded soil. Can it be avoided? *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk.* 2007;77(11):991–8. (In Russ.)

38. Zaidel'man FR. Forms of acid hydrolysis and gley formation and their role in the emergence of light acidic eluvial (podzolic) horizons. *Pochvovedenie.* 2010;(4):387–98. (In Russ.)

39. Zaidel'man FR. The role of gley formation in the formation and degradation of soils. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk.* 2016;86(4):342–51. doi: 10.7868/S086958731604023X. (In Russ.)

40. Savich V, Naumov V, Kotenko M, Gukalov V, Sedykh V. Local flow of soil-forming processes as a factor in adjusting soil fertility models. *Mezhdunarodnyi sel'skokhoziaistvennyi zhurnal.* 2017;(1):49–53. (In Russ.)

41. Samouëlian A, Cousin I, Tabbagh A, Brunand A, Richard G. Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil Tillage Res.* 2005;83(2):173–93. doi: 10.1016/j.still.2004.10.004

42. Zohra-Hadjadj F, Laredj N, Maliki M, Misoum H, Bendani K. Laboratory evaluation of soil geotechnical properties via electrical conductivity. *Revista Facultad de Ingenieria.* 2019;(90):101–12. doi: 10.17533/udea.redin.n90a11

43. Berkold A. Elektrische Leitfähigkeit von Lösungen reiner Salze und von natürlichen Wässern. In: Angenheister G, Herausgeber. *LANDOLT-BÖRNSTEIN: Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaft und Technik : Neue Serie : Gruppe V: Geophysik und Weltraumforschung : Bd. 1: Physikalische Eigenschaften der Gesteine.* Berlin, Germany: Springer; 1982. s. 262–75. (German)

#### Адрес для корреспонденции:

г. Витебск, Республика Беларусь,

тел. +375-29-715-08-38,

e-mail: buzukg@mail.ru,

профессор, доктор фармацевтических наук,

Бузук Г. Н.

Поступила 07.03.2025 г.