

ФАРМАКОГНОЗИЯ И БОТАНИКА

УДК 631.425

DOI: <https://doi.org/10.52540/2074-9457.2024.4.44>

Г. Н. Бузук

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРОФНОСТИ ПОЧВ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМ МЕТОДОМ. СООБЩЕНИЕ 8. ПОЛЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ С КВАДРАТНОЙ УСТАНОВКОЙ

г. Витебск, Республика Беларусь

Целью настоящей работы явилась апробация и оптимизация техники измерений и расчетов удельного электрического сопротивления (УЭС) почвы при использовании квадратной установки в полевых условиях.

Установлено, что линейная зависимость между глубиной погружения электродов и УЭС при использовании квадратной установки и расчета геометрического коэффициента по формуле Венера (1) наблюдается только при полной влагоемкости самой почвы. При снижении объемной влажности почвы имеет место некоторое отклонение зависимости от линейной. В определенных пределах нелинейность может быть скорректирована корневым преобразованием глубины погружения электродов в почву.

Выявлены три типа зависимости УЭС от глубины погружения электродов в почву. Эти зависимости могут интерпретироваться как указание на различные характер и стадии почвообразовательного процесса в различных фитоценозах, что дает возможность их экспрессной оценки во времени и пространстве.

*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

Электропроводность (электросопротивление) почвы является ее фундаментальным свойством, которое, в свою очередь, зависит от многих факторов, в том числе влажности, пористости, гранулометрического состава, емкости катионного обмена, содержания в почве элементов минерального питания, органических веществ и др., определяющих трофность почвы [1–14].

Оценка трофности почв методами инструментального анализа возможна, однако связана со значительными временными и материальными затратами и трудоемкостью.

Другим способом оценки трофности может быть использование электрофизических методов, в основе которых лежит определение электропроводности (или электросопротивления) почвы *in situ*.

Привлекательной стороной электрофизических методов являются их недеструк-

тивность, экспрессность, малая стоимость, возможность проведения повторных измерений в одном и том же месте.

Ранее нами разработаны и уточнены новые способы обработки экспериментальных данных, полученных с помощью квадратной установки, в лабораторных условиях [15].

Целью настоящей работы явилась апробация и оптимизация техники измерений и расчетов электрических параметров почвы при использовании квадратной установки в полевых условиях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для измерения электрического сопротивления почвы использовали 4-электродную квадратную AMNB установку G. M. Nabberjam [16, 17].

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

Для измерения электрических параметров использовалось регистрирующее устройство, описанное в предыдущих работах [18–23], а также новое, усовершенствованное на основе *arduino Mega*, дополненное датчиком для определения объемной влажности почвы.

Геометрический коэффициент установки рассчитывали по формулам (2) и (3) [24–26]:

$$k1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{2 - \sqrt{2}}, \quad (1)$$

$$k2 = \frac{4\pi}{\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + 4z^2}} - \frac{1}{\sqrt{a^2 + z^2}}}, \quad (2)$$

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

В лабораторных опытах использовали песчаную почву, насыщенную водой до полной влагоемкости, а также высыхающую в течение 4–5 дней после ее насыщения водой до полной влагоемкости.

В полевых условиях измерения электрического сопротивления (УЭС) почвы выполнялись на вейниковом лугу на месте осушенного торфяного болота, 40–50-летних сосняке и ельнике зеленомошном, а также старовозрастном (более 150 лет) зеленомошном сосновом лесу, агрофито-

ценозе (поле под клевером) и 3–4 летней залежи.

В одной точке проводили измерение УЭС, 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 [18–23] замеряли с помощью линейки или лазерного дальномера.

Объемная влажность почв варьировала в пределах от 27 до 60% (при калибровке электронного влагомера в пределах 0 (воздух) и 100 (вода)). В связи с тем, что измерения для конкретного фитоценоза проводились в течение одного дня, корректировка УЭС в зависимости от влажности почвы не проводилась.

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

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные по влиянию заглубления неизолированных электродов в насыщенную до полной влагоемкости почву при использовании квадратной установки представлены графически на рисунке 1. Можно видеть нелинейный характер зависимости при геометрическом коэффициенте $k1$ и практически линейный – при геометрическом коэффициенте $k2$.

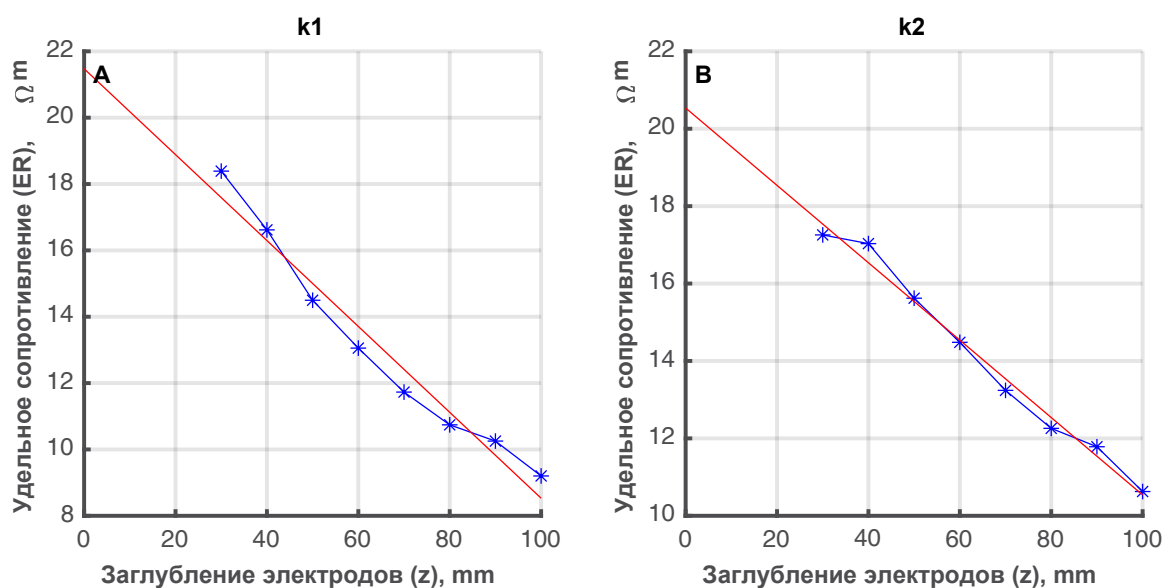


Рисунок 1. – Влияние заглубления электродов на УЭС почвы, насыщенной водой до полной влагоемкости (использование геометрических коэффициентов $k1$ и $k2$)

Зависимость приобретает прогрессирующий нелинейный характер при высыхании почвы (рисунок 2). Это может быть обусловлено появлением в почве пор, за-

полненных воздухом (изолятором), что, в итоге, уменьшает объем токопроводящей части почвы (водного раствора и поверхностной проводимости почвенных частиц).

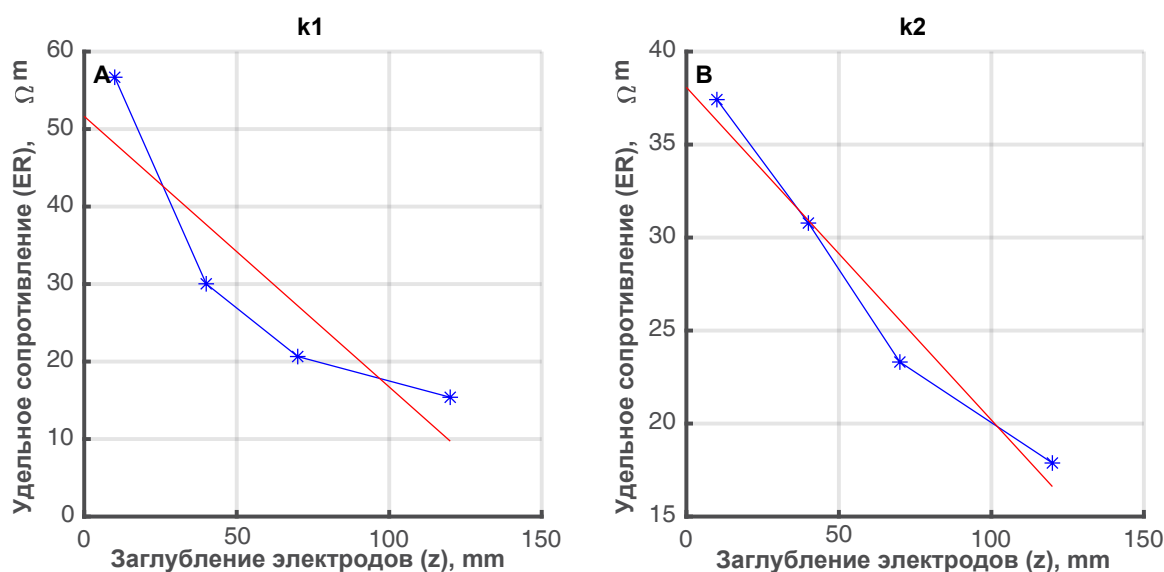


Рисунок 2. – Влияние заглубления электродов на УЭС почвы, первоначально насыщенной водой до полной влагоемкости, а затем высыхающей в течение 4–5 дней при комнатной температуре (использование геометрических коэффициентов k1 и k2)

Зависимость УЭС от заглубления электродов удалось в определенной степени линеаризовать путем применения дополнительного преобразования глубины погружения электродов в почву с использо-

ванием корневой функции ($\sqrt{z} = \text{sqrt}(z)$) (рисунки 3, 4).

Как мы установили ранее [15], наличие линейной зависимости между заглублением электродов в почву и удельным

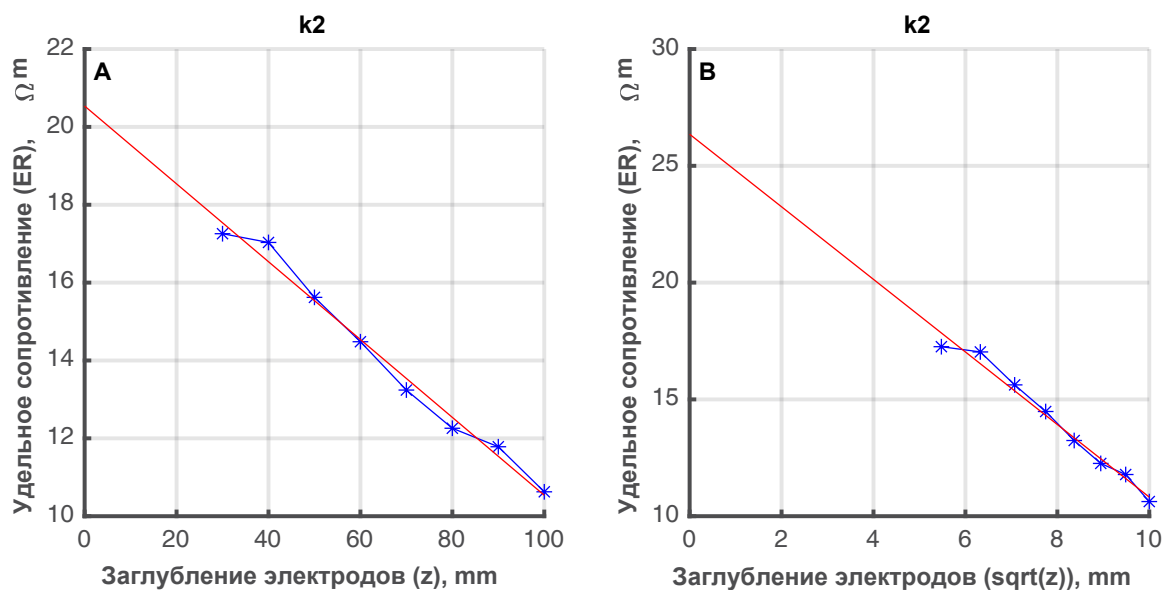


Рисунок 3. – Влияние заглубления электродов на УЭС почвы, насыщенной водой до полной влагоемкости (использование корневой функции)

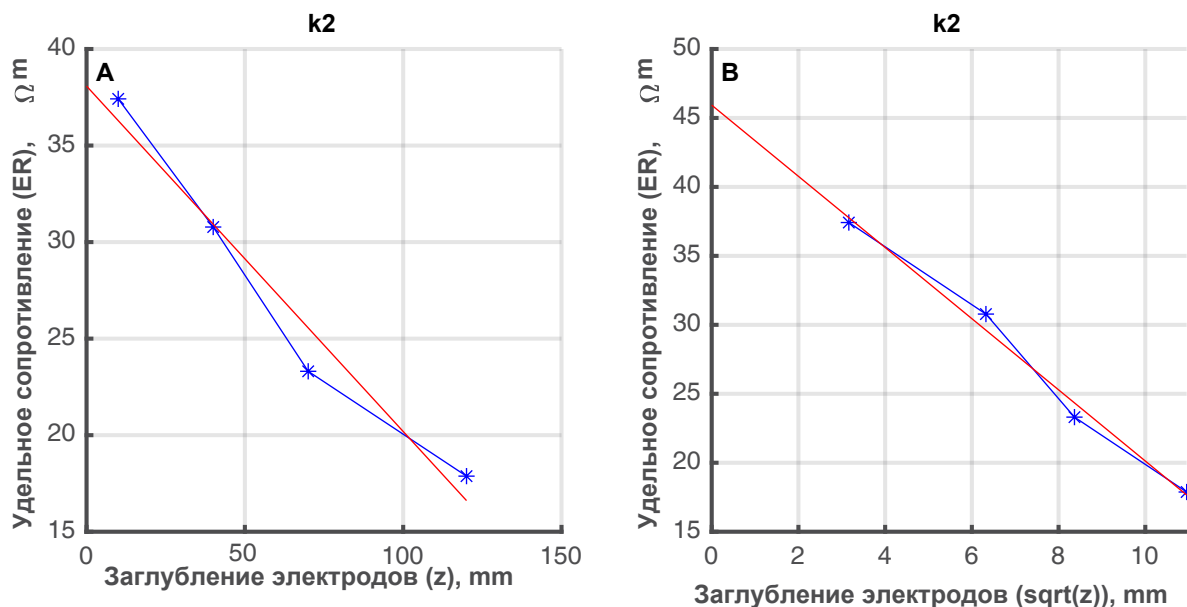


Рисунок 4. – Влияние заглубления электродов на УЭС почвы, первоначально насыщенной водой до полной влагоемкости, а затем высыхающей в течение 4–5 дней при комнатной температуре (использование корневой функции)

электрическим сопротивлением (УЭС) при использовании геометрического коэффициента k_2 позволяет рассчитать УЭС при «нулевом» заглублении. Это дает возможность устранить вариабельность УЭС, вызванную различной степенью заглубления электродов, и тем самым стандартизировать измерения УЭС.

Данные по УЭС почвы на вейниковом лугу до и после линейаризации представлены на рисунке 5. При использовании для расчетов геометрического коэффициента

k_2 зависимость УЭС от $\sqrt{z}$ достаточно хорошо аппроксимировалась линейной функцией $y = a + bx$.

Далее результаты измерений УЭС при различном заглублении электродов в различных точках на вейниковом лугу (после аппроксимации линейной функцией $y = a + bx$ (a – intercept, b – slope)) были обработаны с использованием непараметрической (kernel) регрессии. Полученные результаты представлены на рисунке 6.

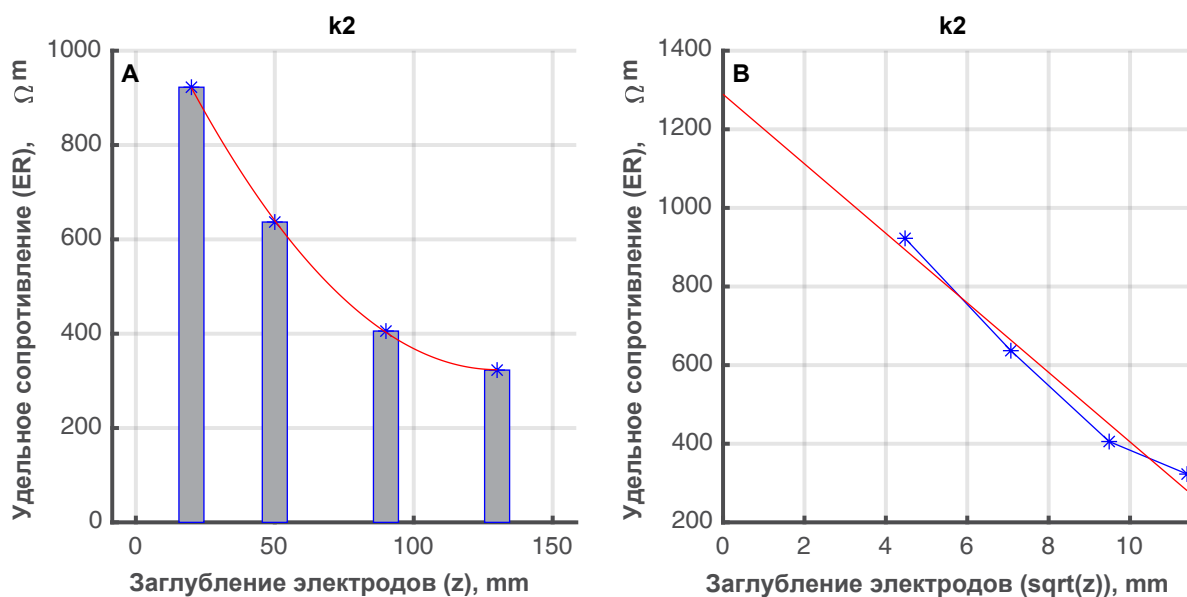


Рисунок 5. – Влияние заглубления электродов на УЭС почвы вейникового луга

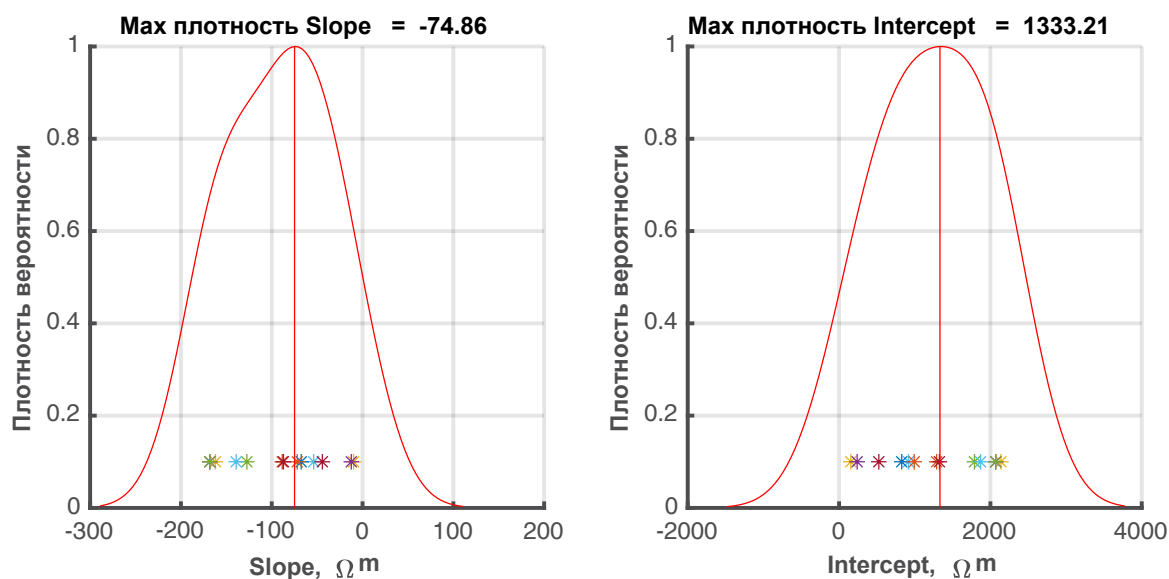


Рисунок 6. – Плотность вероятности распределения коэффициентов a (intercept) и b (slope) после аппроксимации линейной функцией данных с вейникового луга

Из рисунка 6 видно, что распределение значений a (intercept, соответствует УЭС при «нулевом» заглублении) и b (slope, индикатор содержания солей в почве [15]) имеет колоколообразную форму и близко к нормальному распределению.

Зависимости, аналогичные полученным на вейниковом лугу, наблюдались также для точек молодого сосняка с ельником зеленомошным, а также агрофитоценоза и залежи.

Однако данные по УЭС в старовоз-

растном сосняке зеленомошном принципиально отличаются от рассмотренных выше (рисунок 7). Наблюдается разворот линии регрессии в противоположную сторону. По мере погружения электродов в почву вместо наблюдаемого ранее снижения УЭС имеет место его рост. Данный факт указывает на наличие в почве слоя (горизонта) с высоким электрическим сопротивлением. Наиболее вероятно им является подзолистый горизонт, который

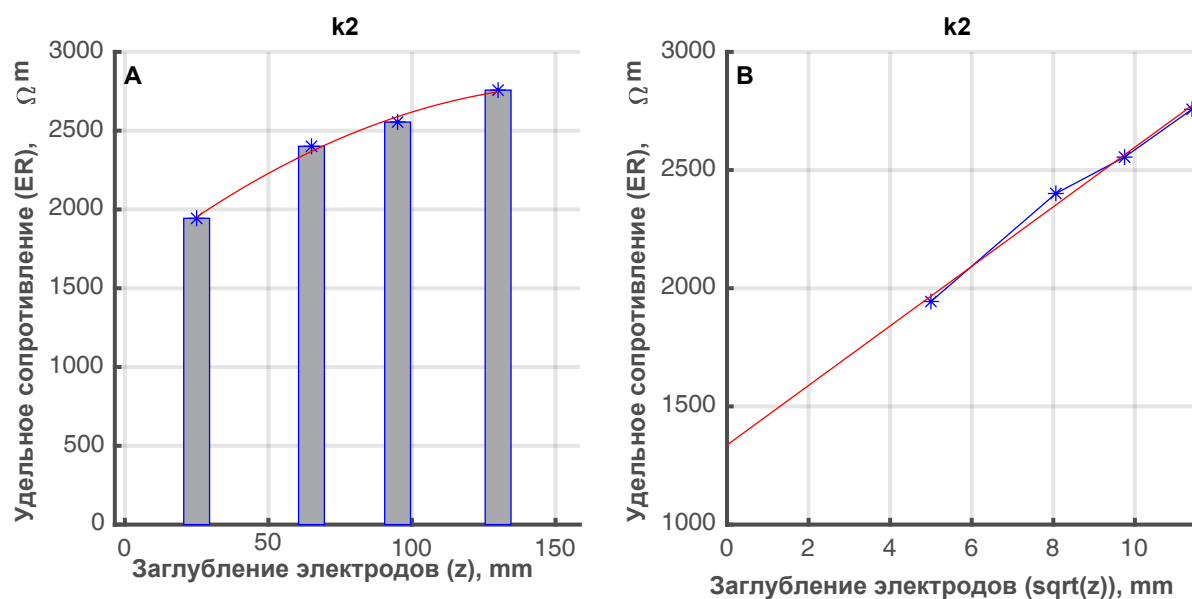


Рисунок 7. – Влияние заглубления электродов на УЭС почвы старовозрастного сосняка зеленомошного

формируется на поздних стадиях (более 90 лет) постагрогенного восстановления экосистем сосновых лесов [27].

В условиях пульсирующего застойно-промывного водного режима постагрогенных почв имеет место интенсивный 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 непроницающего мине-

рала кварца ведет к снижению электропроводности, соответственно, увеличению УЭС [1, 28–32].

При аппроксимации непараметрической (kernel) регрессией результатов определения УЭС в старовозрастном сосняке зеленомошном (a = intercept), b = slope), как и в предыдущем случае с вейниковым лугом, зависимость носит колоколообразный характер и близка к нормальному распределению (рисунок 8).

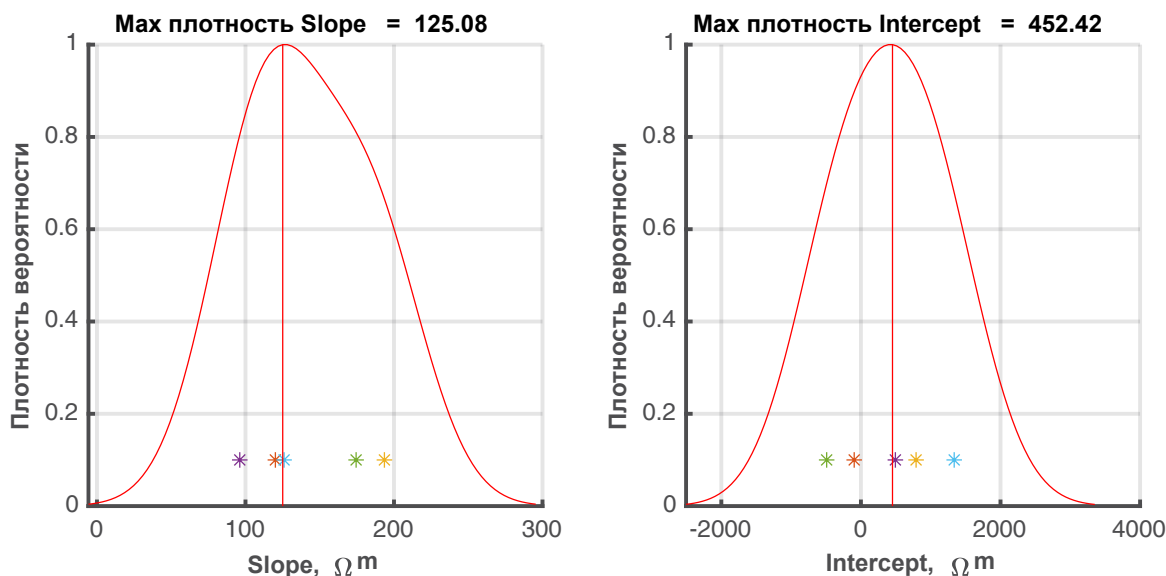


Рисунок 8. – Плотность вероятности распределения коэффициентов a (intercept) и b (slope) после аппроксимации линейной функцией данных старовозрастного сосняка зеленомошного

Для расчета УЭС для «нулевого» заглубления электродов для старовозрастного сосняка зеленомошного, как вариант, может быть использована инверсия линейной регрессии (замена $\sqrt{z}$ на $\sqrt{z^{-1}}$) (рисунок 9).

В ходе обработки результатов измерений несколько точек выпали из наблюдаемых зависимостей. Вместо монотонного увеличения или уменьшения УЭС с глубиной сначала увеличивалось, а после достижения максимума снижалось (рисунок 10). Такая динамика УЭС, вероятнее всего, является следствием «прокалывания» электродами тонкого слоя почвы с высоким сопротивлением (предположительно, подзолистого горизонта) из-за особенностей и интенсивности локального протекания почвообразовательных процессов [33].

Точнее его толщина может быть оценена при большей детализации измерений

УЭС с глубиной погружения электродов в почву.

Таким образом, в ходе выполненных полевых исследований в различных фитоценозах подтверждена возможность расчета УЭС для «нулевого» заглубления электродов в почву с помощью линейной регрессии при полной влагоемкости почвы.

Некоторую нелинейность зависимости при ненасыщенности почвы водой в лабораторных и полевых условиях удалось скорректировать корневым преобразованием глубины погружения электродов в почву.

Обнаружены по крайней мере три типа зависимостей УЭС от глубины погружения электродов в почву.

Первый тип, при котором с увеличением глубины погружения электродов в почву УЭС линейно снижается. Данный тип, вероятнее всего, характерен для агрогенных и постагрогенных почв без выражен-

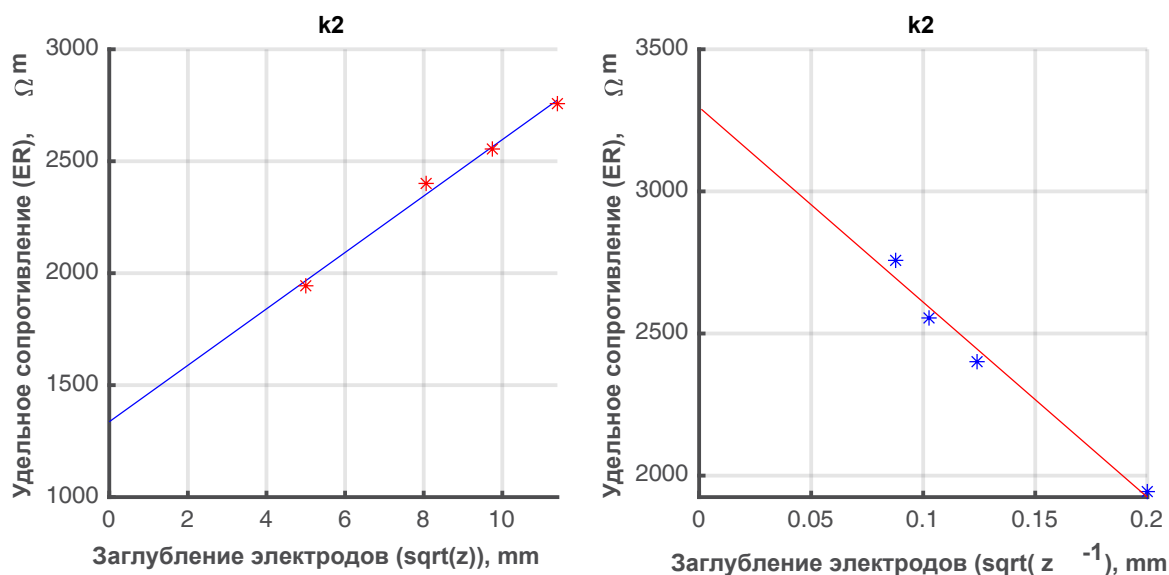


Рисунок 9. – Старовозрастной сосняк зеленомошный, инверсия линейной регрессии

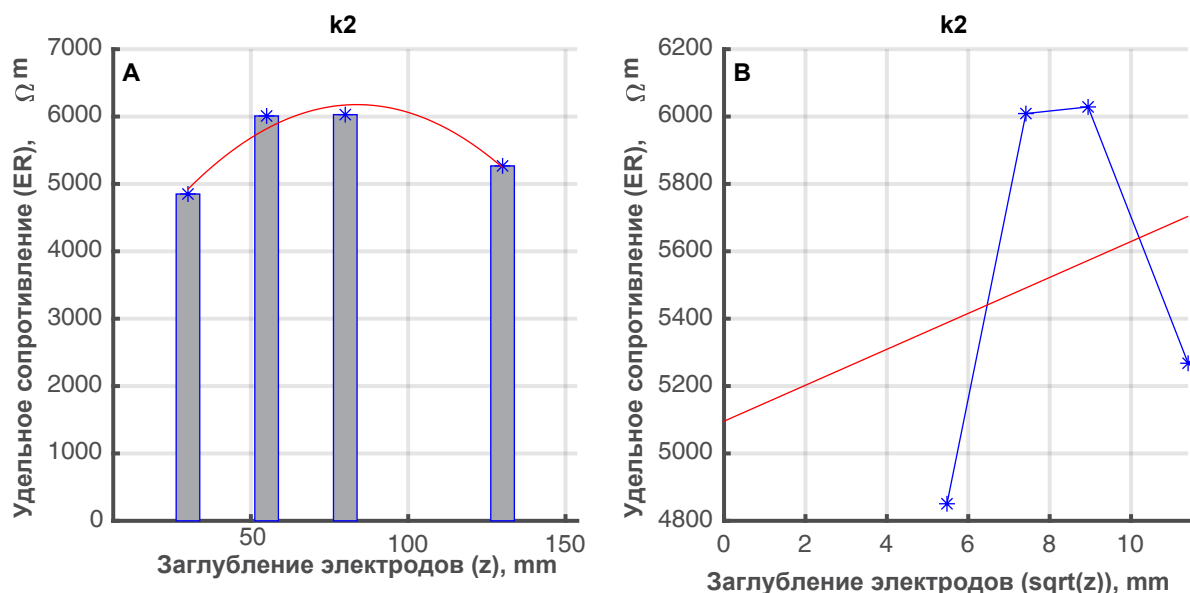


Рисунок 10. – Влияние заглубления электродов на УЭС почвы старовозрастного сосняка зеленомошного при «прокалывании» слоя с высоким сопротивлением

ной дифференциации на слои (горизонты).

Второй тип, когда УЭС увеличивается с глубиной погружения электродов, выявлен для почвы в старовозрастном сосняке зеленомошном с горизонтом с высоким УЭС, вероятнее всего, подзолистым.

Третий тип промежуточный, он обусловлен тонким слоем высокого сопротивления (вероятнее всего, подзолистым), который формируется в некоторых точках фитоценоза как следствие неоднородности почвенного покрова.

В целом же выявленные особенности

УЭС для различных фитоценозов, помимо оценки почвы элементами минерального питания (трофности), могут также служить для отслеживания некоторых почвообразовательных процессов, например, оподзоливания, используя неdestructивную и экспрессную методику.

Однако для внесения окончательной ясности в ее возможности требуются дополнительные исследования в этом направлении с привлечением классических почвенных методик для подтверждения выдвинутых нами предположений.

Низкая обеспеченность подзолистого горизонта элементами минерального питания при их умеренном дефиците может способствовать накоплению в растениях вторичных соединений, таких как фенольные соединения и алкалоиды [34–39].

Наличие и выраженность подзолистого горизонта в почве могут служить косвенным индикатором накопления вторичных соединений в продуцирующих их растениях, в том числе лекарственных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Линейная зависимость между глубиной погружения электродов и УЭС при использовании квадратной установки и расчета геометрического коэффициента по формуле Венера (2) наблюдается только для водных экстрактов почвы и при полной влагоемкости самой почвы.

При снижении объемной влажности почвы имеет место некоторое отклонение зависимости от линейной. В определенных пределах нелинейность может быть скорректирована корневым преобразованием глубины погружения электродов в почву.

Выявлены три типа зависимости УЭС от глубины погружения электродов в почву. Эти зависимости могут интерпретироваться как указание на различные характер и стадии почвообразовательного процесса в фитоценозах, что дает возможность их экспрессной оценки во времени и пространстве.

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*.

SUMMARY

G. N. Buzuk

SOIL TROPHICITY DETERMINATION BY ELECTROPHYSICAL METHOD. MESSAGE 8. FIELD TESTS USING SQUARE UNIT

The aim of this work was to test and optimize the measurement and calculation techniques of specific electrical resistance (SER) of soil using a square unit in field conditions.

It was stated that linear relationship between the depth of electrode immersion and

SER when using the square unit and calculating the geometric coefficient according to the Wenner formula (2) is observed only at full moisture capacity (FMC) of the soil itself. When the volumetric soil moisture decreases a deviation from linearity occurs. Within certain limits this non-linearity can be corrected by a root transformation of the electrode immersion depth into the soil.

Three types of SER dependence from the electrode immersion depth into the soil were identified. These dependencies can be interpreted as an indication of different characteristics and stages of the soil formation process in various phytocenoses allowing their rapid assessment over time and space.

The square unit can be used for both laboratory and field determinations of electric resistance (electrical conductivity) of soil and soil extracts and it allows working with undisturbed soil samples *in situ*. The technique can be used for indirect assessment of soil trophicity in the areas of medicinal plants growth or cultivation.

Keywords: geophysical methods, soil electrophysics, square unit, electric resistance, volumetric moisture.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поздняков, А. И. Электрофизика почв / А. И. Поздняков, А. Д. Позднякова. – Москва-Дмитров: Изд-во Московского гос. ун-та, 2004. – 48 с.
2. Поздняков, А. И. Электрофизические свойства некоторых почв / А. И. Поздняков, Ч. Г. Гюлаев. – Москва-Баку: Адильоглы, 2004. – 240 с.
3. Поздняков, А. И. Полевая электрофизика в почвоведении, мелиорации и земледелии / А. И. Поздняков, Н. Г. Ковалев, А. Д. Позднякова. – Тверь: ЧуДо, 2002. – 257 с.
4. Вадюнина, А. Ф. Методы исследования физических свойств почв / А. Ф. Вадюнина, З. А. Корчагина. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Агропромиздат, 1986. – 416 с.
5. 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.
6. 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.
7. Lund, E. D. Practical applications of soil

electrical conductivity mapping / E. D. Lund, C. D. Christy, P. E. Drummond // Precision agriculture / ed. J. V. Stafford. – Sheffield: Sheffield Academic Press, 1999. – P. 771–779.

8. Friedman, S. P. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review / S. P. Friedman // Computers and electronics in agriculture. – 2005. – Vol. 46, N 1/3. – P. 45–70.

9. 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.

10. Reynolds, J. M. An introduction to applied and environmental geophysics / J. M. Reynolds. – Chichester: John Wiley & Sons, 2011. – 696 p.

11. The geophysical toolbox applied to forest ecosystems—A review / B. Loiseau, S. D. Carrière, D. Jougnot [et al.] // Science of the total environment. – 2023. – Vol. 899. – P. 165503.

12. Handbook of agricultural geophysics / ed.: B. J. Allred, J. J. Daniels, M. R. Ehsani. – Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2008. – 410 p.

13. Corwin, D. L. Past, present, and future trends of soil electrical conductivity measurement using geophysical methods / D. L. Corwin // Handbook of Agricultural Geophysics / ed.: B. J. Allred, J. J. Daniels, M. R. Ehsani. – New York: CRC Press, 2008. – P. 17–44.

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.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. Бузук, Г. Н. Определение трофности почв электрофизическим методом. Сообщение 1. Устройство и лабораторная методика / Г. Н. Бузук // Вестник фармации. – 2021. – № 3. – С. 32–40.

19. 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.

20. Бузук, Г. Н. Определение трофности почв электрофизическим методом. Сообщение 3. Корректировка влияния влажности / Г. Н. Бузук // Вестник фармации. – 2021. – № 4. – С. 74–84.

21. Бузук, Г. Н. Определение трофности почв электрофизическим методом. Сообщение 4. Почвенная матрица / Г. Н. Бузук // Вестник фармации. – 2022. – № 1. – С. 56–62.

22. Бузук, Г. Н. Определение трофности почв электрофизическим методом. Сообщение 5. Полевые испытания / Г. Н. Бузук // Вестник фармации. – 2022. – № 2. – С. 65–76.

23. 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.

24. 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.

25. Moreira, S. S. A comparative evaluation of vertical fractures using different azimuthal electrical resistivity survey arrays / S. S. Moreira, L. A. P. Bacellar, P. R. A. Aranha // Near Surface Geophysics. – 2019. – Vol. 17, N 4. – P. 345–357.

26. Comparison of three small-scale devices for the investigation of the electrical conductivity/resistivity of swelling and other clays / S. Kaufhold, C. Grisseemann, R. Dohrmann [et al.] // Clays and clay minerals. – 2014. – Vol. 62. – P. 1–12.

27. Стадии постагрогенного 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.

28. 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.

29. Зайдельман, Ф. Р. Причины образования светлых кислых элювиальных горизонтов в профиле почв / Ф. Р. Зайдельман // Почвоведение. – 2007. – № 10. – С. 1155–1167.

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

31. 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.

32. Зайдельман Ф. Р. Роль глееобразования в формировании и деградаций почв / Ф. Р. Зайдельман // Вестник Российской академии наук. – 2016. – Т. 86, № 4. – С. 342–351.

33. 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.

34. Бузук, Г. Н. Универсальный характер М-образной зависимости между основным и специализированным обменом у лекарственных растений / Г. Н. Бузук, М. Я. Ловкова, С. М. Соколова // Вестник фармации. – 2006. – № 1. – С. 23–33.

35. Isah, T. Stress and defense responses in plant secondary metabolites production / T. Isah // Biological research. – 2019. – Vol. 52, N 1. – P. 1–25.

36. Environmental stress and secondary metabolites in plants: an overview / M. A. Ashraf, M. Iqbal, R. Rasheed [et al.] // Plant metabolites and regulation under environmental stress / ed.: P. Ahmad [et al.]. – 2018. – P. 153–167.

37. Plant secondary metabolite biosynthesis and transcriptional regulation in response to biotic and abiotic stress conditions / R. Jan, S. Asaf, M. Numan [et al.] // Agronomy. – 2021. – Vol. 11, N 5. – P. 968.

38. Plant hormones and secondary metabolites under environmental stresses: Enlightening defense molecules / S. Kumari, F. Nazir, C. Maheshwari [et al.] // Plant physiology and biochemistry. – 2024. – Vol. 206. – P. 108238.

39. Jha, Y. Plant secondary metabolites as a tool to investigate biotic stress tolerance in plants: a review / Y. Jha, H. I. Mohamed // Gesunde Pflanzen. – 2022. – Vol. 74, N 4. – P. 771–790.

REFERENCES

1. Pozdniakov AI, Pozdniakova AD. Electrophysics of soils. Moskva-Dmitrov, RF: Izd-vo Moskovskogo gos un-ta; 2004. 48 s. (In Russ.)

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

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

4. Vadiunina AF, Korchagina ZA. Methods of studying the physical properties of soils. 3-e izd, pererab i dop. Moskva, RF: Agropromizdat; 1986. 416 s. (In Russ.)

5. 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

6. 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

7. Lund ED, Christy CD, Drummond PE.

Practical applications of soil electrical conductivity mapping. In: Stafford JV, editor. Precision agriculture. Sheffield, United Kingdom: Sheffield Academic Press; 1999. p. 771–9

8. Friedman SP. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. Comput Electron Agric. 2005;46(1-3):45–70. doi: 10.1016/j.compag.2004.11.001

9. Samouëlian A, Cousin I, Tabbagh A, Bruand 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

10. Reynolds JM. An introduction to applied and environmental geophysics. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons; 2011. 696 p

11. Loiseau B, Carrière SD, Jougnot D, Singha K, Mary B, Delpierre N et al. The geophysical toolbox applied to forest ecosystems—A review. Sci Total Environ. 2023;899:165503. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.165503

12. Allred BJ, Daniels JJ, Ehsani MR, editors. Handbook of agricultural geophysics. Boca Raton, USA: Taylor & Francis Group; 2008. 410 p

13. Corwin DL. Past, present, and future trends of soil electrical conductivity measurement using geophysical methods. In: Allred BJ, Daniels JJ, Ehsani MR, editors. Handbook of Agricultural Geophysics. New York, USA: CRC Press; 2008. p. 17–44

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. 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.)

16. 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

17. 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

18. 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.)

19. 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.)

20. Buzuk GN. Determination of soil trophicity by electrophysical method. Message 3. Correction of humidity influence. Vestnik far-

matsii. 2021;(4):74–84. doi: 10.52540/2074-9457.2021.4.74. (In Russ.)

21. 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.)

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

23. 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.)

24. Wenner F. A method of measuring earth resistivity. Bulletin of the Bureau of Standards. Washington, USA: Government Printing Office; 1916;12:469–78

25. Moreira SS, Bacellar LAP, Aranha PRA. A comparative evaluation of vertical fractures using different azimuthal electrical resistivity survey arrays. Near Surf Geophys. 2019;17(4):345–57. doi: 10.1002/nsg.12047

26. Kaufhold S, Grisseemann 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;62:1–12. doi: 10.1346/CCMN.2014.0620101

27. 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.)

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

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

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

31. 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.)

32. 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.)

33. 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.)

34. Buzuk GN, Lovkova Mla, Sokolova SM. Universal nature of the M-shaped relationship between the basic and specialized metabolism in medicinal plants. Vestnik farmatsii. 2006;(1):23–33. (In Russ.)

35. Isah T. Stress and defense responses in plant secondary metabolites production. Biol Res. 2019;52(1):1–25. doi: 10.1186/s40659-019-0246-3

36. Ashraf MA, Iqbal M, Rasheed R, Hussain I, Riaz M, Arif MS. Environmental stress and secondary metabolites in plants: an overview. In: Ahmad P, Ahanger MA, Singh VP, Tripathi DK, Alam P, Alyemeni MN, editors. Plant metabolites and regulation under environmental stress. 2018. p. 153–67

37. Jan R, Asaf S, Numan M, Lubna, Kim KM. Plant secondary metabolite biosynthesis and transcriptional regulation in response to biotic and abiotic stress conditions. Agronomy. 2021;11(5):968. doi: 10.3390/agronomy11050968

38. Kumari S, Nazir F, Maheshwari C, Kaur H, Gupta R, Siddique KHM et al. Plant hormones and secondary metabolites under environmental stresses: Enlightening defense molecules. Plant Physiol Biochem. 2024;206:108238. doi: 10.1016/j.plaphy.2023.108238

39. Jha Y, Mohamed HI. Plant secondary metabolites as a tool to investigate biotic stress tolerance in plants: a review. Gesunde Pflanz. 2022;74(4):771–90. doi: 10.1007/s10343-022-00669-4

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 20.11.2024 г.