

ФАРМАКОГНОЗИЯ И БОТАНИКА

УДК 631.413

DOI: <https://doi.org/10.52540/2074-9457.2024.2.31>

Г. Н. Бузук

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРОФНОСТИ ПОЧВ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМ МЕТОДОМ. СООБЩЕНИЕ 7. НОВОЕ В ТЕХНИКЕ ИЗМЕРЕНИЙ И РАСЧЕТОВ

г. Витебск, Республика Беларусь

Целью настоящей работы явилась оптимизация техники измерений и расчетов удельного электрического сопротивления (УЭС) почвы при использовании квадратной установки. Установлены существенные различия в результатах определения УЭС при использовании как голых (неизолированных), так и изолированных (точечных) электродов, а также влияние глубины погружения электродов в исследуемый субстрат.

Предложен способ расчета УЭС для нулевого заглубления электродов, основанного на измерении УЭС в одной точке при 2–4 последовательных заглублениях электродов.

Показана возможность линеаризации зависимости УЭС от объемной влажности почвы путем ее обратного преобразования ($(1 - \theta$ или θ^1). Установлена тесная связь между углом наклона регрессии для θ^1 – УЭС и содержанием в почве солей (электролитов) на фоне различного влагосодержания.

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

Биосинтез и накопление вторичных соединений, таких как алкалоиды, фенольные соединения и терпеноиды, обуславливающих лечебные свойства лекарственных растений, регулируется множеством факторов, в том числе трофностью почвы. Трофность почв по своей природе является комплексным фактором, который определяется содержанием в почве жизненно необходимых для роста и развития растений элементов минерального питания и их биодоступностью [1].

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

Однако большинство методов почвоведения основано на анализе отобранных и высушенных образцов, что существенно меняет оценку особенностей почвы и ее свойств, так как превращает почву со свойственной ей оригинальной структурой и биотой в «порошок» и, более того, практически «убивает» содержащуюся в ней биоту [2].

В силу этого и комплексности фактора трофности для его оценки достаточно широко применяются экологические шкалы. Преимуществом экологических шкал по сравнению с инструментальными методами является возможность быстрой и комплексной оценки экологии видов без отбора образцов. Однако их использование требует хорошего знания флоры [3–10].

Другим способом оценки трофности может быть использование электрофизических методов, в основе которых лежит определение электропроводности (или электросопротивления) почвы. В настоящее время в многочисленных исследованиях доказана связь электропроводности почвы с такими ее параметрами, как концентрация катионов и ионов в почвенном растворе, емкость катионного обмена, содержание в почве органического вещества и глинистых минералов и др., связанных с трофностью [11–21].

Имеется положительный опыт использования электропроводности почв в точном земледелии [22–26].

Привлекательной стороной электрофизических методов является их неdestructивность, экспрессность, малая стоимость,

возможность проведения повторных измерений в одном и том же месте.

Для измерения электропроводности

почв в геофизике, а также в почвоведении широко применяется установка F. Wenner (рисунок 1) [27].

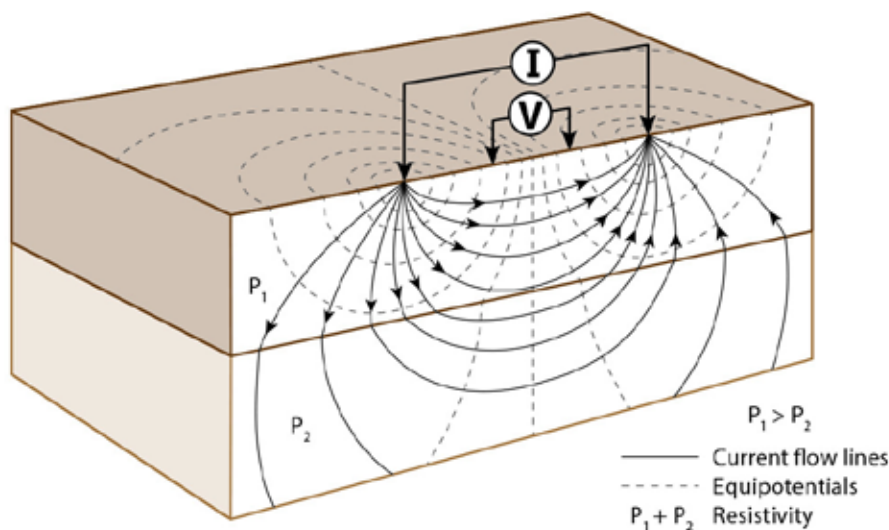


Рисунок 1. – Схема измерения электропроводности почвы четырехэлектродной установкой F. Wenner [27, 28]

В предыдущих работах нами было сконструировано устройство для измерения электропроводности (электросопротивления) почвы на основе метода F. Wenner. Были проведены многочисленные лабораторные эксперименты по изучению влияния конструкции электродов: неизолированных (голых) и изолированных (точечных), а также степени их заглубления в исследуемый субстрат (почва или почвенный экстракт) на показатели электросопротивления [29–32].

Выявленные зависимости были подтверждены в полевых опытах [33].

Проведенные опыты выявили высо-

кую вариабельность результатов измерений, которая отчасти могла быть обусловлена влиянием микро- и нанорельефа почвы. Одним из вариантов снижения влияния микро- и нанорельефа на результаты измерения УЭС может быть уменьшение размеров установки, теоретически, вплоть до точки. В дальнейшей работе нами была использована квадратная установка G. M. Habberjam (рисунок 2) [34].

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

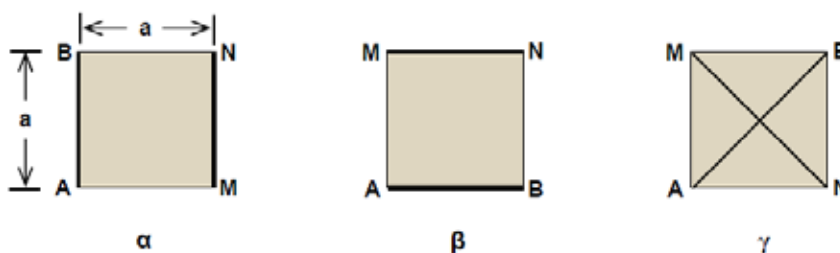


Рисунок 2. – Схема квадратной установки G. M. Habberjam

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для измерения электрического сопротивления почвы использовали 4-электродную линейную AMNB установку F. Wenner [27] и квадратную AMNB установку G. M. Habberjam [35, 36]. Расстояние

между электродами (a) составляло 20 мм для линейной установки и 15,35 мм – для квадратной установки. Общая длина электродов составляла от 90 до 130 мм, диаметр – 2–3 мм.

Для измерения электрических параметров использовалось регистрирующее

устройство, описанное в предыдущих работах [29–34], а также новое, усовершенствованное на основе *arduino Mega*, дополненное датчиками для определения объемной влажности почвы, температуры и влажности воздуха, а также освещенности.

Глубину погружения электродов в водный экстракт почвы и почвенную пасту [29–34] замеряли с помощью линейки или лазерного дальномера.

Геометрический коэффициент установки рассчитывали по формулам (1) и (2) [27, 37, 38]:

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

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

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

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

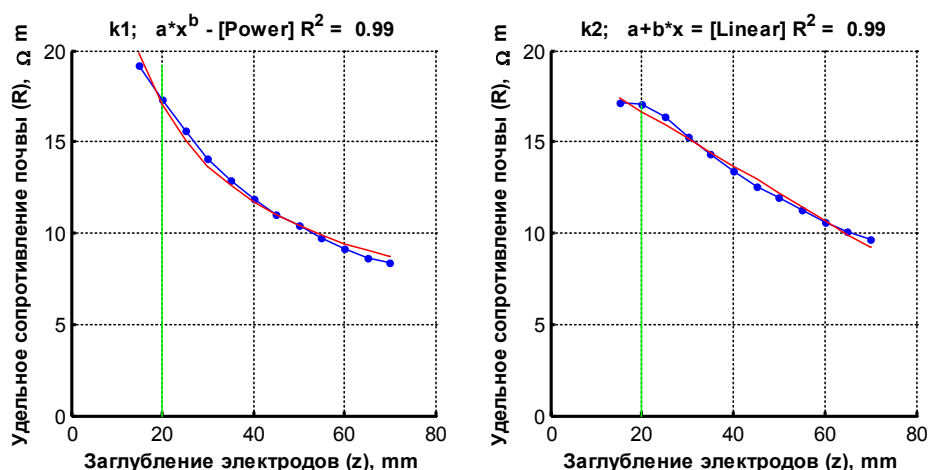
РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные по влиянию заглубления неизолированных электродов

в водный экстракт почвы при использовании линейной и квадратной установок представлены графически на рисунках 3 и 4. Можно видеть однотипный характер зависимостей для обеих установок: нелинейной при геометрическом коэффициенте $k1$ и линейной при $k2$.

Наличие линейной зависимости между заглублением голого электрода и УЭС при использовании в расчетах геометрического коэффициента $k2$ имеет принципиальное значение, так как при экстраполяции позволяет рассчитать УЭС при нулевом заглублении. Заметим, кстати, что в теории электропроводности почвы рассматривается вариант с размещением электродов исключительно на поверхности почвы. Однако на практике такое неосуществимо, так как при всех прочих условиях необходимо обеспечить хороший контакт электродов с почвой. Это возможно лишь при их заглублении на 3–5 см. Выходом из этой ситуации является получение измерений электросопротивления почвы в одной и той же точке при 2–3 различных заглублениях электродов с последующим расчетом УЭС для нулевого заглубления. Это позволяет избавиться от вариабельности УЭС, вносимой различной степенью заглубления электродов.

Аналогичные результаты были получены и в лабораторных опытах с почвой (рисунок 5). При использовании для расчетов геометрического коэффициента $k2$ зависимость УЭС от заглубления электродов z хорошо аппроксимировалась линейной функцией $y = a + bx$.



Обозначения: вертикальная линия означает заглубление электродов, равное расстоянию между ними ($a = z$). $k1$ и $k2$ означает геометрический коэффициент установки, рассчитанный по формулам (1) и (2) соответственно.

Рисунок 3. – Зависимость УЭС от глубины погружения неизолированных электродов в водный экстракт почвы (линейная установка)

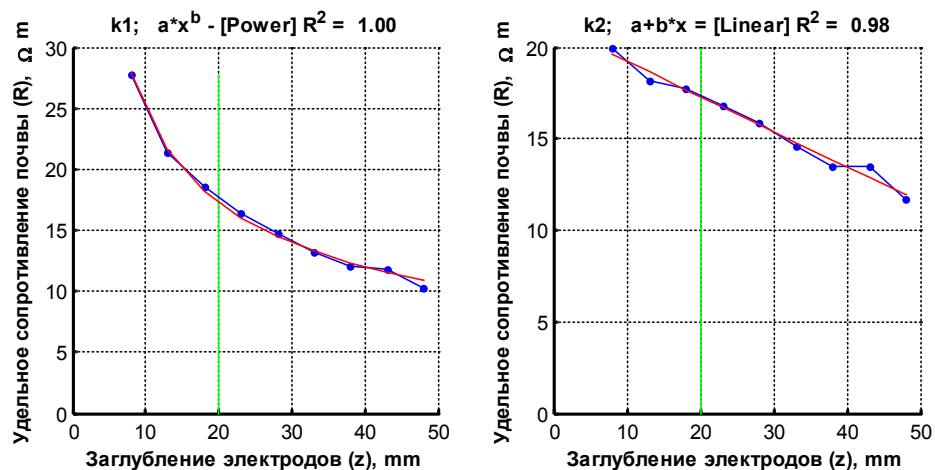


Рисунок 4. – Зависимость УЭС от глубины погружения неизолированных электродов в водный экстракт почвы (квадратная установка)

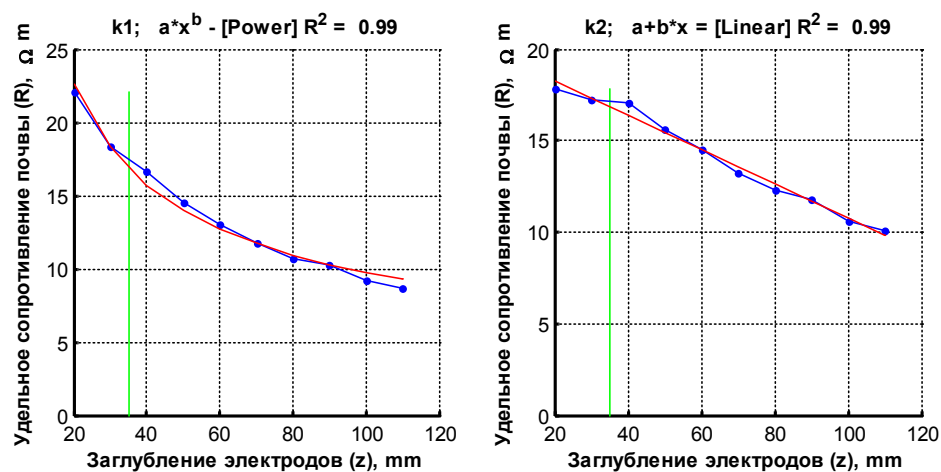


Рисунок 5. – Зависимость УЭС от глубины погружения неизолированных электродов в почву (квадратная установка)

Отрицательным моментом при определении УЭС в полевых условиях является его сильная нелинейная зависимость от

объемной влажности почвы, которая хорошо аппроксимируется степенной функцией (рисунок 6). Это значительно услож-

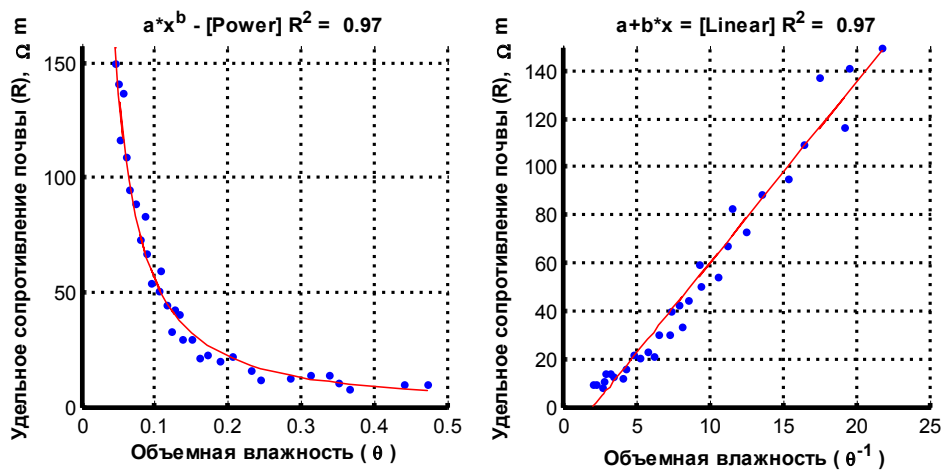


Рисунок 6. – Зависимость УЭС от объемной влажности почвы (по материалам работ [19])

няет сравнение данных, полученных в разное время, вплоть до их невозможности. Влажность почвы является высоко лабильным параметром и сильно варьирует. Нами установлено, что нелинейная зависимость УЭС от объемной влажности почвы может быть линеаризована обратным преобразованием объемной влажности ($1 - \theta$ или θ^{-1}). На практике для его расчета необходимо измерить УЭС в одном и том же месте при различной влажности почвы, например, весной, в начале и в конце лета. Объемная влажность почвы для гумидной зоны максимальна весной, после таяния снега, и минимальна в конце лета.

Для выяснения связи коэффициентов регрессии θ^{-1} – УЭС с содержанием солей использованы литературные данные по электросопротивлению почвы на фоне различных концентраций добавленных в них солей, весовой влажности и степени насыщения почвы солевыми растворами [39].

В результате проведенных расчетов обнаружена близкая к функциональной ($R^2 = 0,98-1,00$) связь между углом наклона линии регрессии и концентрацией солей в почве. Для свободного члена регрессии эта зависимость была значительно слабее и колебалась в пределах ($R^2 = 0,38-0,76$).

Таким образом, наклон линии регрессии для зависимости θ^{-1} – УЭС может служить индикатором содержания солей (электролитов) в почве, т. е. фактически трофности. Данные рассуждения подходят для гумидной зоны, в которой характерен промывной режим почв. При этом избыток солей, не

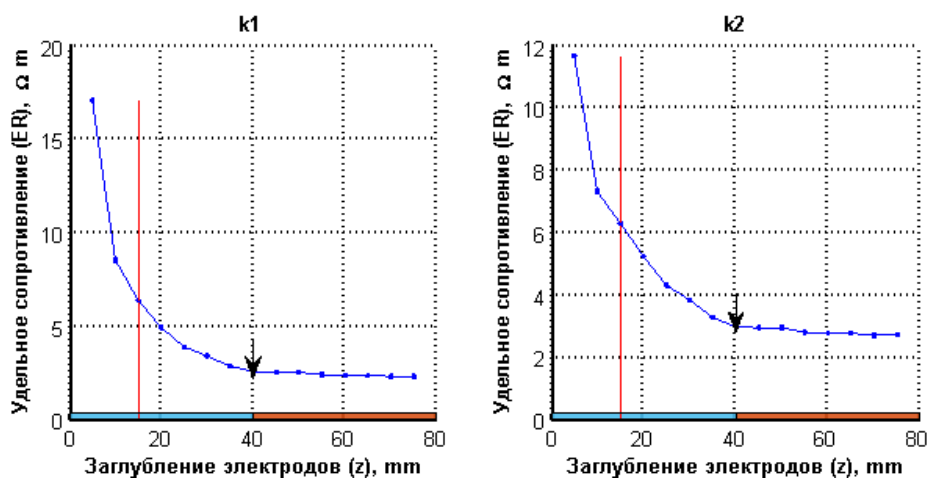
связанных поглощающим комплексом почвы, вымывается в почвенные воды и выходит из оборота. Они не подходят для других зон с непромывным, десуктивно-выпотным или выпотным режимом почв с различной степенью засоления из-за выкристаллизовывания некоторой части солей (их переходом из раствора в твердое состояние, практически не проводящее электрический ток).

Вместе с тем, обнаруженная нами линейная зависимость θ^{-1} – УЭС почвы (рисунок 6) требует дальнейшего изучения с привлечением большого объема лабораторных и полевых экспериментальных данных. Особенно это касается установления минимального градиента объемной влажности, временных рамок для его определения, а также роли биоты.

Еще одним способом оценки электропроводности почв является использование почвенных пасты и экстрактов (1:1; 1:2; 1:5) [40–45], которое связано с отбором в полевых условиях образцов и их последующем анализе в лабораторных условиях.

Нами была изучена возможность применения квадратной установки для измерения электросопротивления почвенных экстрактов без их фильтрации или центрифугирования (после отстаивания в течение суток). Особенность измерений такого рода заключается в одновременном присутствии жидкой (почвенный экстракт) и твердой фаз (собственно почва).

В экспериментах использовались как голые, так и точечные электроды. Полученные данные представлены на рисунках 7 и 8.



Обозначения: вертикальная линия означает заглубление электродов, равное расстоянию между ними ($a = z$). k1 и k2 означает геометрический коэффициент установки, рассчитанный по формулам (2) и (3) соответственно. Стрелка фиксирует место перехода водной фазы в почву.

Рисунок 7. – Зависимость УЭС от глубины погружения неизолированных электродов в двухфазную систему вода – песчаная почва (квадратная установка)

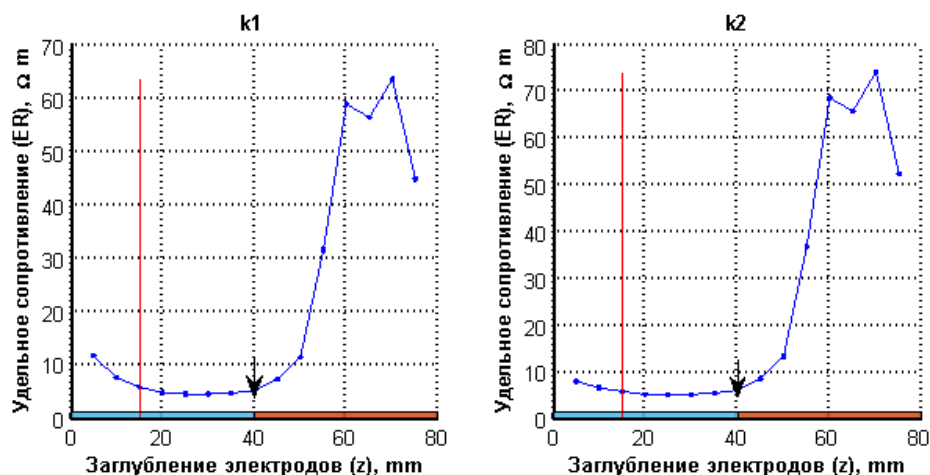


Рисунок 8. – Зависимость УЭС от глубины погружения точечных электродов в двухфазную систему вода – песчаная почва (квадратная установка)

Как можно видеть из представленных данных, при использовании голых электродов их переход (проникновение) из жидкой фазы в твердую фазу (почва) не фиксируется. Однако при использовании точечных электродов различие проявляется совершенно отчетливо. С момента вхождения электродов в почвенный слой резко увеличивается УЭС. Рекомендации, которые можно сделать из полученных результатов, заключаются в следующем.

Измерение УЭС в двухфазной системе вода – почва необходимо проводить только при использовании точечных электродов при их погружении в экстракт примерно на удвоенную величину межэлектродного расстояния (a). При этом способ расчета геометрического фактора k_1 и k_2 не является существенным. Допускаются оба варианта.

С другой стороны, квадратная установка с точечными электродами может быть полезным инструментом для изучения слоистости (микрогоризонтов) почвенного покрова. Слои (микрогоризонты) почвы с различной УЭС при постепенном вдавлении электродов в почву будут проявляться в форме пиков на графике зависимости УЭС от z (рисунок 8).

Голые электроды малочувствительны к слоистости почвы (рисунок 7) и больше подходят для оценки общей УЭС почвы в пределах глубинности установки [46, 47].

В конечном итоге методика измерения УЭС почвы с помощью квадратной установки может быть следующей. В интересующей области (пашня, луговой или лес-

ной фитоценоз) намечают точки или сеть точек. В каждой точке после удаления подстилки или лугового войлока вдавливают электроды квадратной установки на $1/3$, $1/2$, $2/3$ и полную длину электродов и определяют УЭС. Одновременно измеряют объемную влажность почвы с помощью емкостного датчика и температуру электронным термометром (для введения температурной поправки [33]). По полученным результатам измерений рассчитывают линейную регрессию ($z - \text{УЭС}$). Свободный член регрессии представляет УЭС для нулевого заглубления данной точки.

Аналогичным образом определяют УЭС в различные интервалы времени для нулевого заглубления 2–3 раза, ориентируясь на периоды с различной естественной объемной влажностью почвы, которую определяют емкостным датчиком. Снова строят линейную регрессию для θ^{-1} и УЭС нулевого заглубления. Находят свободный член и угол наклона линейной регрессии для каждой точки. Угол наклона регрессии служит индикатором содержания солей (трофности) почвы.

Оптимизация определения трофности почвы имеет важное значение, так как почвы обеспечивают механическое закрепление растений, в том числе лекарственных, обеспечивают их водоснабжение и минеральное питание.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований нами проведена оптимизация техники из-

мерений электросопротивления почвы квадратной установкой, позволяющая учесть влияние степени заглубления электродов в субстрат, а также объемной влажности почвы. Методика основана на проведении повторяющихся измерений УЭС в одной точке при постепенном увеличении заглубления электродов и последующем расчете УЭС для нулевого заглубления регрессионным способом. Постепенное заглубление электродов с промежуточными измерениями за счет трения электродов о частицы почвы способствует удалению поляризационной «корки», возникающей при прохождении тока.

Для компенсации влияния влажности почвы определяют УЭС для нулевого заглубления в различное время (вегетационный сезон) на фоне естественного градиента влажности почвы. Далее регрессионным способом находят свободный член и угол наклона для зависимости θ^{-1} – УЭС. Угол наклона, как показано выше, практически функционально связан с содержанием солей (электролитов) и может служить индикатором трофности почвы. Актуальным является определение минимального временного и влажностного градиента, достаточного для определения угла наклона регрессии.

SUMMARY

G. N. Buzuk DETERMINATION OF SOIL TROPHIC STATE BY ELECTROPHYSICAL METHOD. REPORT 7. NOVELTIES IN MEASUREMENT AND CALCULATION TECHNIQUES

The aim of this work was to optimize measurement and calculation techniques of specific electrical resistance (SER) of the soil using a square installation. Significant differences were established in the SER determination results when using both bare (uninsulated) and insulated (pointed) electrodes as well as the effect of electrode immersion depth into the substrate studied.

A method for calculating SER for zero electrode embedding was proposed based on measuring the SER at one point with 2-4 successive electrode embeddings.

Possibility of linearizing the SER dependence on soil volumetric moisture by its inverse transformation ($(1 - \theta$ or $\theta^{-1})$ was shown. Close relationship between the slope

of the regression for θ^{-1} - SER and the salt (electrolyte) content in the soil against various moisture content was established.

The methodology can be used for indirect assessment of soil trophic state in the areas of medicinal plants growth or cultivation.

Keywords: geophysical methods, soil electrophysics, square installation, electrical resistance, volumetric moisture.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аветов, Н. А. Понятие трофности в связи с антропогенной эвтрофикацией верховых болот Ханты-Мансийского Приобья / Н. А. Аветов, Е. А. Шишконокова // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. – 2013. – № 71. – С. 36–51.
2. Поздняков, А. И. Электрические параметры почв и почвообразование / А. И. Поздняков // Почвоведение. – 2008. – № 10. – С. 1188–1197.
3. Бузук, Г. Н. 2D непараметрическая (kernel) регрессия в анализе растительных сообществ с помощью экологических шкал Н. Ellenberg / Г. Н. Бузук // Вестн. фармации. – 2023. – № 3. – С. 19–30.
4. Бузук, Г. Н. Определение экологического пространства растительных сообществ методом идеального индикатора с помощью объединенных европейских экологических шкал Н. Ellenberg / Г. Н. Бузук // Вестн. фармации. – 2023. – № 2. – С. 72–81.
5. Экологическая оценка кормовых угодий по растительному покрову / Л. Г. Раменский [и др.]. – Москва: Гос. изд-во сельхоз. лит-ры, 1956. – 472 с.
6. Цыганов, Д. Н. Фитоиндикация экологических режимов в подзоне хвойно-широколиственных лесов / Д. Н. Цыганов. – Москва: Наука, 1983. – 196 с.
7. Didukh, Ya. P. The ecological scales for the species of Ukrainian flora and their use in synphytoindication / Ya. P. Didukh. – Kyiv: Phytosociocentre, 2011. – 176 p.
8. Indicator values of vascular plants / H. Ellenberg [et al.] // Indicator Values of Plants in Central Europe (German). – Göttingen: Erich Goltze, 2001. – P. 9–166.
9. Flora Indicativa: Ecological indicator Values and Biological Traits of the Flora of Swiss and the Alps / ed. E. Landolt. – Bern: Haupt, 2010. – 230 s.
10. Ellenberg type indicator values for European vascular plant species / L. Tichý [et al.] // J. of vegetation science. – 2023. – Vol. 34, N 1. – P. 1–13.
11. Поздняков, А. И. Электрофизика почв / А. И. Поздняков, А. Д. Позднякова. – Москва-Дмитров: Изд-во Московского гос. ун-

та, 2004. – 48 с.

12. Поздняков, А. И. Электрофизические свойства некоторых почв / А. И. Поздняков, Ч. Г. Гюлалыев. – Москва-Баку: Адильоглы, 2004. – 240 с.

13. Поздняков, А. И. Полевая электрофизика в почвоведении, мелиорации и земледелии / А. И. Поздняков, Н. Г. Ковалев, А. Д. Позднякова. – Тверь: ЧуДо, 2002. – 257 с.

14. Вадюнина, А. Ф. Методы исследования физических свойств почв / А. Ф. Вадюнина, З. А. Корчагина. – Москва: Агропромиздат, 1986. – 416 с.

15. Relationship between apparent electrical conductivity and soil physical properties in a Malaysian paddy field / A. Gholizadeh [et al.] // Archives of agronomy and soil science. – 2012. – Vol. 58, N 2. – P. 155–168.

16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. Electrical resistivity survey in soil science: a review / A. Samouëlian [et al.] // Soil and Tillage research. – 2005. – Vol. 83, N 2. – P. 173–193.

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

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

22. 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.

23. Soil sensors and plant wearables for smart and precision agriculture / H. Yin [et al.] // Advanced materials. – 2021. – Vol. 33, N 20. – P. e2007764.

24. 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.

25. Heiniger, R. W. Using soil electrical conductivity to improve nutrient management / R. W. Heiniger, R. G. McBride, D. E. Clay // Agronomy. –

2003. – Vol. 95, N 3. – P. 508–519.

26. Якушев, В. В. Точное земледелие: теория и практика / В. В. Якушев. – Санкт-Петербург: Агрофизический науч.-исслед. ин-т, 2016. – 364 с.

27. 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.

28. Soil Resistivity Information and Field Testing. – Mode of access: <https://www.easypower.com/resources/article/soil-resistivity-information-and-field-testing>. – Date of access: 10.06.2024.

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

30. Бузук, Г. Н. Определение трофности почв электрофизическим методом. Сообщение 2. Конструкция электродов и способ расчета геометрического коэффициента / Г. Н. Бузук // Вестн. фармации. – 2021. – № 4. – С. 46–52.

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

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

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

34. Бузук, Г. Н. Определение трофности почв электрофизическим методом. Сообщение 6. Квадратная установка, конструкция электродов и способ расчета геометрического коэффициента / Г. Н. Бузук // Вестн. фармации. – 2022. – № 3. – С. 23–29.

35. 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.

36. 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.

37. 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.

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

39. Laboratory evaluation of soil geotechnical properties via electrical conductivity / F. Zohra-Hadjadj [et al.] // Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. – 2019. – N 90. – P. 101–112.
 40. Correlation between electrical conductivity in saturated paste extracts and different diluted extracts (1/2.5, 1/5) of coarse-textured soils / D. Bakhti [et al.] // J. of agriculture and applied biology. – 2024. – Vol. 5, N 1. – P. 18–34.
 41. Kargas, G. The effect of soil texture on the conversion factor of 1: 5 soil/water extract electrical conductivity (EC 1: 5) to soil saturated paste extract electrical conductivity (ECe) / G. Kargas, P. Londra, K. Sotirakoglou // Water. – 2022. – Vol. 14, N 4. – P. 642.
 42. Smagin, A. EC conversion for 1: 5 extracts and standard saturated soil–water pastes in the assessment of arid land salinization: Classical methodologies revisited / A. Smagin, A. Kacimov, N. Sadovnikova // J. of the Saudi Soc. of Agr. Sciences. – 2024. – Vol. 23, N 4. – P. 277–288.
 43. Spiteri, K. Estimating the electrical conductivity of a saturated soil paste extract (ECe) from 1: 1 (EC1: 1), 1: 2 (EC1: 2) and 1: 5 (EC1: 5) soil: water suspension ratios, in calcareous soils from the Mediterranean Islands of Malta / K. Spiteri, A. T. Sacco // Communications in soil science and plant analysis. – 2024. – Vol. 55, N 9. – P. 1302–1312.
 44. Effects of equilibrium time on electrical conductivity measurements using soil–water extracts and soil saturated paste / B. S. Seo [et al.] // Korean j. of soil science and fertilizer. – 2021. – Vol. 54, N 2. – P. 257–263.
 45. Kargas, G. Comparison of soil EC values from methods based on 1: 1 and 1: 5 soil to water ratios and ECe from saturated paste extract based method / G. Kargas, P. Londra, A. Sgoubopoulou // Water. – 2020. – Vol. 12, N 4. – P. 1010.
 46. Edwards, L. S. A modified pseudosection for resistivity and IP / L. S. Edwards // Geophysics. – 1977. – Vol. 42, N 5. – P. 1020–1036.
 47. Szalai, S. Depth of investigation and vertical resolution of surface geoelectric arrays / S. Szalai, A. Novák, L. Szarka // J. of environmental & engineering geophysics. – 2009. – Vol. 14, N 1. – P. 15–23.
- ### REFERENCES
1. Avetov NA, Shishkonakova EA. The concept of trophicity in connection with anthropogenic eutrophication of raised bogs of the Khaty-Mansiysk Ob region. Biulleten' Pochvennogo instituta im. V. V. Dokuchaeva. 2013;(71):36–51. (In Russ.)
 2. Pozdniakov AI. Electrical parameters of soils and soil formation. Pochvovedenie. 2008;(10):1188–97. (In Russ.)
 3. Buzuk GN. 2D nonparametric (kernel) regression in the analysis of plant communities using ecological scales H. Ellenberg. Vestn farmatsii. 2023;(3):19–30. doi: 10.52540/2074-9457.2023.3.19. (In Russ.)
 4. Buzuk GN. Determination of the ecological space of plant communities by the ideal indicator method using the combined European ecological scales H. Ellenberg. Vestn farmatsii. 2023;(2):72–81. doi: 10.52540/2074-9457.2023.2.72. (In Russ.)
 5. Ramenskii LG, Tsatsenkin IA, Chizhikov ON, Antipin NA. Ecological assessment of forage lands by vegetation cover. Moskva, RF: Gos izd-vo sel'khoz lit-ry; 1956. 472 s. (In Russ.)
 6. Tsyganov DN. Phytoidication of ecological regimes in the subzone of coniferous-broad-leaf forests. Moskva, RF: Nauka; 1983. 196 s. (In Russ.)
 7. Didukh YaP. The ecological scales for the species of Ukrainian flora and their use in synphytoindication. Kyiv, Ukraine: Phytosociocentre; 2011. 176 p. (In English)
 8. Ellenberg H, Weber HE, Düll R, Wirth V, Werner W. Indicator values of vascular plants. In: Indicator Values of Plants in Central Europe (German). Göttingen, Germany: Erich Goltze; 2001. p. 9-166
 9. Landolt E, editor. Flora Indicativa: Ecological indicator Values and Biological Traits of the Flora of Swiss and the Alps. Bern, Germany: Haupt; 2010. 230 s
 10. Tichý L, Axmanova I, Dengler J, Guarino R, Jansen F, Midolo G et al. Ellenberg type indicator values for European vascular plant species. J Veg Sci. 2023;34(1):1–13. doi: 10.1111/jvs.13168
 11. Pozdniakov AI, Pozdniakova AD. Electrophysics of soils. Moskva-Dmitrov, RF: Izd-vo Moskovskogo gos un-ta; 2004. 48 s. (In Russ.)
 12. Pozdniakov AI, Giulalyev ChG. Electro-physical properties of some soils. Moskva-Baku, RF, Azerbaidzhan: Adil'ogly; 2004. 240 s. (In Russ.)
 13. Pozdniakov AI, Kovalev NG, Pozdniakova AD. Field electrophysics in soil science, melioration and agriculture. Tver', RF: ChuDo; 2002. 257 s. (In Russ.)
 14. Vadiunina AF, Korchagina ZA. Methods of studying the physical properties of soils. Moskva, RF: Agropromizdat; 1986. 416 s. (In Russ.)
 15. 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
 16. 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
 17. Lund ED, Christy CD, Drummond PE.

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

18. 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

19. 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

20. Reynolds JM. An introduction to applied and environmental geophysics. Chichester, UK: John Wiley & Sons; 2011. 696 s

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

22. 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

23. 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

24. 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

25. 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

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

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

28. Soil Resistivity Information and Field Testing. Mode of access: <https://www.easypower.com/resources/article/soil-resistivity-information-and-field-testing>. Date of access: 10.06.2024

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

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

31. Buzuk GN. Determination of soil trophic-

ity by electrophysical method. Message 3. Humidity correction. *Vestn farmatsii.* 2021;(4):74–84. doi: 10.52540/2074-9457.2021.4.74. (In Russ.)

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

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

34. Buzuk GN. Determination of soil trophicity by electrophysical method. Message 6. Square installation, electrode design and method of calculating the geometric coefficient. *Vestn farmatsii.* 2022;(3):23–29. doi: 10.52540/2074-9457.2022.3.23. (In Russ.)

35. 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

36. 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

37. 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

38. 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

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

40. Bakhti D, Halilat MT, Khadoumi A, Oustani M, Zemour H, Belhouadjeb FA. Correlation between electrical conductivity in saturated paste extracts and different diluted extracts (1/2.5, 1/5) of coarse-textured soils. *J of agriculture and applied biology.* 2024;5(1):18–34. doi: 10.11594/jaab.05.01.02

41. Kargas G, Londra P, Sotirakoglou K. The effect of soil texture on the conversion factor of 1: 5 soil/water extract electrical conductivity (EC 1: 5) to soil saturated paste extract electrical conductivity (ECe). *Water (Basel).* 2022;14(4):642. doi: 10.3390/w14040642

42. Smagin A, Kacimov A, Sadovnikova N. EC conversion for 1: 5 extracts and standard saturated soil–water pastes in the assessment of arid land salinization: Classical methodologies revisited. *J of the saudi society of agricultural sciences.* 2024;23(4):277–88. doi: 10.1016/j.js-

sas.2023.12.005

43. Spiteri K, Sacco AT. Estimating the electrical conductivity of a saturated soil paste extract (ECe) from 1: 1 (EC1: 1), 1: 2 (EC1: 2) and 1: 5 (EC1: 5) soil: water suspension ratios, in calcareous soils from the Mediterranean Islands of Malta. *Commun Soil Sci Plant Anal.* 2024;55(9):1302–12. doi: 10.1080/00103624.2024.2304636

44. Seo BS, Lee KS, Leong YJ, Choi WJ. Effects of equilibrium time on electrical conductivity measurements using soil-water extracts and soil saturated paste. *Korean j. of soil science and fertilizer.* 2021;54(2):257–63. doi: 10.7745/KJSSF.2021.54.2.257

45. Kargas G, Londra P, Sgoubopoulou A. Comparison of soil EC values from methods based on 1: 1 and 1: 5 soil to water ratios and ECe from

saturated paste extract based method. *Water (Basel).* 2020;12(4):1010. doi: 10.3390/w12041010

46. Edwards LS. A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics.* 1977;42(5):1020–36. doi: 10.1190/1.1440762

47. Szalai S, Novák A, Szarka L. Depth of investigation and vertical resolution of surface geoelectric arrays. *J Environ Eng Geophys.* 2009;14(1):15–23. doi: 10.2113/JEEG14.1.15

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 17.06.2024 г.