ФАРМАКОГНОЗИЯ И БОТАНИКА

УДК 631.4

DOI: https://doi.org/10.52540/2074-9457.2022.2.65

Г. Н. Бузук

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРОФНОСТИ ПОЧВ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМ МЕТОДОМ. СООБЩЕНИЕ 5. ПОЛЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ

г. Витебск, Республика Беларусь

В полевых условиях апробирована авторская установка для измерения удельного электрического сопротивления (УЭС) почвы. Подтверждена зависимость определяемого УЭС от степени заглубления неизолированных электродов в почву, обнаруженная нами в лабораторных опытах с водонасыщенной почвой и ее водными экстрактами. Зависимость УЭС от заглубления электродов в почву хорошо аппроксимируется, так же как и в лабораторных опытах, степенной функцией. В различных растительных сообществах с преобладанием в их составе лекарственных растений определены УЭС почвы. Рассчитаны плотность вероятности полученных векторов УЭС с использованием непараметрической (kernel) регрессии, а также плотность вероятности нормального распределения (распределение Гаусса). Отмечена высокая вариабельность полученных данных, которая может быть связана как с влиянием микрорельефа, так и корневых систем растений. Обнаружена различная окрашиваемость фракции песка (или ее отсутствие) из пахотного слоя и горизонтов А1 и В почвы катионным красителем метиленовым синим, которая обусловлена присутствием органического вещества почвы. Различная окраииваемость частиц фракции песка представляет существенный интерес для дальнейшего изучения этого явления относительно различных горизонтов разных типов почв, а также слоев геологических обнажений осадочных пород.

Ключевые слова: геофизические методы, электрофизика почв, установка Wenner, метиленовый синий, глины, песок.

ВВЕДЕНИЕ

Важной задачей в области растениеводства, в том числе лекарственного, а также различного ряда экологических и геоботанических исследований является оценка трофности почв с помощью экспрессных и малоинвазивных методов. Одним из претендентов на эту роль являются электрофизические методы. В многочисленных исследованиях показана тесная связь целого ряда параметров почвы, определяющих ее трофность, таких как содержание минеральных элементов, гранулометрический состав и др., с ее электропроводностью или электрическим сопротивлением [1-9]. На этой основе разработаны технические устройства для оценки качества почв, применяемые для создания почвенных карт в точном земледелии [10-15]. Однако использование электрофизических методов в природных условиях не получило должного распространения, что в значительной степени обусловлено множеством факторов, которые влияют на результаты измерений электропроводности или удельного электрического сопротивления (УЭС) почвы.

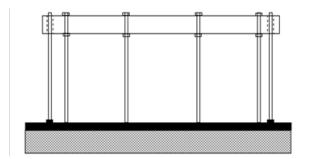
Целью настоящей работы явилась апробация в полевых условиях лабораторных методик измерения УЭС почвы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для полевых опытов применяли усовершенствованную **AMNB** установку F. Wenner [16-19] с измерителями заглубления по краям установки (рисунок 1). фиксации измерителей с помощью винтов или зажимов они выступают в качестве ограничителя погружения электродов в почву. Расстояние между электродами (а) - 20 см. Длина электродов в установке составляла 15 см, диаметр – 4 мм. Электроды вдавливались в почву на различную глубину (z), начиная с минерального слоя почвы (без или после снятия подстилки или лугового войлока).

Поскольку одинаковое погружение всех электродов в почву в полевых условиях получить трудно, в основном из-за ми-

крорельефа, то степень заглубления электродов (z) рассчитывалась как среднее между z1 и z2 (рисунок 1).



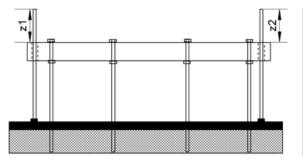


Рисунок 1. – Схема установки для определения УЭС почвы

При использовании точечных электродов от первоначальной изоляции электродов с помощью термоусадочного пластика [17] в лабораторных условиях в полевых опытах пришлось отказаться, так как почва действует как абразивный

материал и довольно быстро нарушает изоляционный слой. Поэтому были изготовлены новые электроды с изоляцией с помощью изоляционных втулок, которые оказались более устойчивыми к истиранию (рисунок 2).

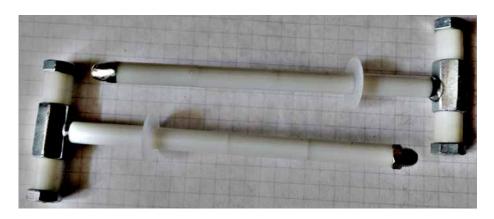


Рисунок 2. – Точечные электроды для определения УЭС почвы

Также было усовершенствовано устройство для малоинвазивного отбора проб почвы [19] – добавлена спица для предотвращения вращения приемника в рыхлой почве, как это имеет место в варианте устройства [20]. Отработанный порядок сверления был следующим. Сначала почва высверливалась на глубину 3-4 см, сверло вынималось, его режущая часть очищалась от корней и стеблей растений, особенно злаков, которые заминались на режущей части. Затем процесс сверления повторяли, вынимая сверло через каждые 5-8 см глубины для извлечения (вытряхивания) почвы из шнеков сверла. После достижения требуемой глубины измеряли глубину скважины. При необходимости могут быть собраны фракции из разной

глубины и даже горизонтов, поскольку последние различаются по цвету.

Глубина взятия образца определяется целями исследования и, как правило, лежит в пределах корнеобитаемого слоя исследуемого яруса растений (например, травяно-кустарничкового) или пахотного горизонта.

Почву собирали в пластиковый мешок с защелкой, который взвешивали на электронных весах для расчета в последующем полевой весовой влажности почвы.

Объем колонки высверленной почвы (V) определяется по формуле (1):

$$V = \pi \cdot (d/2)^2 \cdot h, \tag{1}$$

где d – диаметр сверла (скважины) – 20 или 30 мм;

h – глубина скважины (высота колонки высверленной почвы).

На основании объема колонки высверленной почвы и массы сухой почвы рассчитывается такая фундаментальная величина, как плотность почвы, и ее производные (объемная и весовая влажность, пористость, степень насыщения почвы водой и др.) [21].

Геометрические коэффициенты установки (k1) и (k2) рассчитывали по формулам (2) и (3) [17]:

$$k1 = \pi \cdot (AM*AN)/MN = 2 \cdot \pi \cdot MN = 2 \cdot \pi \cdot a$$
, (2)

$$k2 = \frac{4\pi}{1/a + \frac{2}{\sqrt{a^2 + 4z^2}} - \frac{1}{\sqrt{a^2 + z^2}}}$$
 (3)

После целого ряда попыток был выбран следующий порядок проведения измерений. В пределах интересующего фитоценоза закладывали учетные площадки $(У\Pi)$ размером 5–10 × 5–10 м, на которых проводили полное геоботаническое описание. При выборе мест заложения УП отдавали предпочтение местам с преобладанием в травостое того или иного вида лекарственного растения. Затем, располагая 9–16 точек измерения в пределах УП в шахматном порядке, проводили замер УЭС и объемной влажности почвы с помощью устройства, описанного нами ранее [16-18]. Одновременно с помощью электронного термометра в 3-4 местах измеряли температуру почвы на глубине 5-7 см и отбирали образцы почвы (см. выше).

Корректирующий температурный фактор ft (для 25 °C) рассчитывали по формуле (4) [22]:

ft =
$$0.4470+1.4034 \cdot \exp(-t/26.815)$$
 (4)

Затем для скорректированного по температуре вектора значений УЭС рассчитывали плотность вероятности, используя непараметрическую (kernel) регрессию, а также плотность вероятности нормального распределения (распределение Гаусса).

Для расчета УЭС почвенного раствора (Rw) и почвенной матрицы (Rm) при

объемной влажности (θ) и пористости (ϕ) почвы использовали предложенные нами уравнения (5) и (6) [18–19]:

$$Rw = Rx \cdot \theta^b / \varphi^{-b}, \qquad (5)$$

$$Rm = Rx \cdot \theta^b / (1-\varphi)^{-b}, \qquad (6)$$

где Rx — измеренное электрическое сопротивление $(\Omega \cdot m)$ при объемной влажности (θ) и пористости (ϕ) почвы в пределах 0—1;

 $Rx \cdot \theta^b$ — скорректированное с учетом объемной влажности УЭС (УЭС водонасыщенной почвы $\theta = 1$ или 100%);

 $1 - \phi$ – объем фракции твердых частиц; b – коэффициент (степень функции) в пределах 1,5–2,3 (по умолчанию равно 2);

 $Rx \cdot \theta^b$ — скорректированное с учетом объемной влажности УЭС (УЭС водонасыщенной почвы).

Для удаления органического вещества из почвы применяли двукратную обработку 35% водорода пероксидом [23]. С этой целью помещали около 3 г сухой почвы в чашку Петри диаметром 7 мм, смачивали 4–5 мл 35% раствора пероксида водорода и выдерживали в течение суток до полного высыхания содержимого. Затем процедуру обработки повторяли и снова высушивали, дополнительно выдерживая в течение светового дня на прямом солнечном свету. Затем пробу измельчали и использовали для определения содержания глины методом окрашивания 0,02% водным раствором метиленового синего [19].

По разности масс навесок почвы до и после обработки водорода пероксидом можно рассчитать содержание органического вещества. Например, при навеске почвы в 3000 мг и содержании 1% органического вещества такая разность составит 30 мг.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

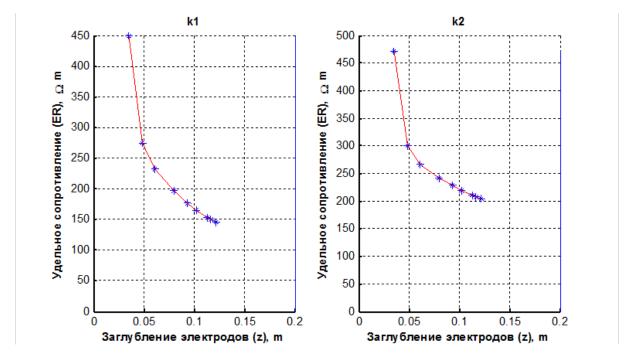
Для определения влияния степени заглубления электродов на результаты определения УЭС были избраны почвы с пахотным горизонтом (залежь и агрофитоценоз), который при вспашке и обработке почвы перемешивается и, таким образом, является достаточно гомогенным. В противном случае могло иметь место влияние различных горизонтов почвы.

Из приведенных на рисунках 3–4 результатов видно, что по мере заглубления электродов в почву определяемое УЭС резко (в 2–3 раза) снижается, особенно сильно вначале при минимальных заглублени-

ях электродов в почву. Зависимости между заглублением электродов и УЭС, как и в предыдущих лабораторных исследованиях [16–17], хорошо аппроксимируются степенной функцией $\mathbf{v} = \mathbf{a} \cdot \mathbf{x}^{\mathbf{b}}$ (таблица 1).

Таблица 1. – Коэффициенты степенной функции и коэффициент детерминации при различных способах расчета геометрического коэффициента (рисунки 2–3)

Геометрический коэффициент	a	b	R ²
	Многолетняя залежь		
k1	24,386	-0,83506	0,9680
k2	57,129	-0,89079	0,9081
	Агрофитоценоз		
k1	33,499	-0,89079	0,8951
k2	91,435	-0,57736	0,7537



Обозначения: вертикальная линия означает заглубление электродов, равное расстоянию между ними (a = z). k1 и k2 означают расчет геометрического коэффициента установки по формулам (1) и (2) соответственно.

Рисунок 3. — Зависимость УЭС от глубины погружения неизолированных электродов в почву (многолетняя залежь)

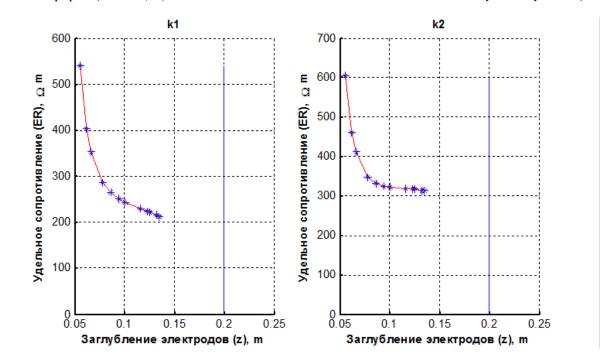
Таким образом, результаты полевых исследований полностью совпадают с полученными нами ранее лабораторными данными [16–19] и свидетельствуют о достаточно сильной зависимости результатов определения УЭС от степени заглубления электродов, что следует учитывать при проведении работ такого плана.

Полученные данные по распределению плотности вероятности УЭС для некоторых растительных сообществ с преобладанием в травяном покрове приведенных ниже видов в основном лекарствен-

ных растений приведены на рисунке 5. Из представленных графически результатов измерений УЭС следует, что практически во всех случаях данные подчиняются нормальному закону распределения.

Максимум, найденный по плотности вероятности, практически совпадает с медианой полученного вектора УЭС.

Однако для УЭС местообитаний исследованных видов характерна высокая вариабельность: коэффициент вариации колеблется в пределах от 14 до 75. Причиной такой высокой вариабельности мо-



Обозначения те же, что и на рисунке 3. Рисунок 4. – Зависимость УЭС от глубины погружения неизолированных электродов в почву (агрофитоценоз)

гут быть влияние микрорельефа, а также подстилки и лугового войлока (измерения проводились их прокалыванием на глубину до 10 см). Подстилка же, уплотняясь, препятствовала погружению электродов в почву точно на 10 см, что, в свете приведенных выше данных, вносило довольно существенную ошибку. Кроме того, никак нельзя устранить влияние микрорельефа, так как электроды погружались на разную глубину в почву из-за их жесткого крепления в установке. Изменялась площадь электродов, соответственно и сила тока и падение напряжения. А выбрать идеально ровное место не всегда возможно. Кроме того, неучтенным и неконтролируемым фактором остается объемная плотность корней растений, которая, как свидетельствуют литературные данные, оказывает довольно сильное влияние на результаты измерений УЭС [24-26]. Однако учесть или скорректировать влияние этого фактора на УЭС почвы в настоящее время пока не представляется возможным.

Поэтому в дальнейшем предполагается использование точечных электродов без жесткого крепления на раме установки (рисунок 2).

Основываясь на результатах окрашивания глин 0,02% водным раствором метиленового синего, также предположили,

что в электропроводности почвы основная роль принадлежит минералам фракции глины. В связи с этим, по аналогии с уравнениями 5 и 6 для определения УЭС почвенного раствора и почвенной матрицы соответственно, в уравнение для определения УЭС (Rg) почвенной матрицы (фактически матрицы глины) был введен коэффициент глинистости (g), равный доле глины в составе твердой фазы породы или почвы [19]:

$$Rg = Rx \cdot \theta^b / ((1-\varphi) \cdot g)^{-b}, \tag{7}$$

где Rx — измеренное электрическое сопротивление (Ω ·m) при объемной влажности (θ) и пористости (ϕ) почвы в пределах 0—1;

 $1-\phi$ – объем фракции твердых частиц; b – коэффициент (степень функции) в пределах 1,5–2,3 (по умолчанию равно 2);

g – глинистость почвы в пределах 0-1; Rg – матричная проводимость почвы, обусловленная глиной.

Однако при анализе проб почв, в том числе пахотного горизонта, было обнаружено, что, кроме фракции глины, в части проб в большей или меньшей степени окрашивается также и фракция песка (рисунок 6).

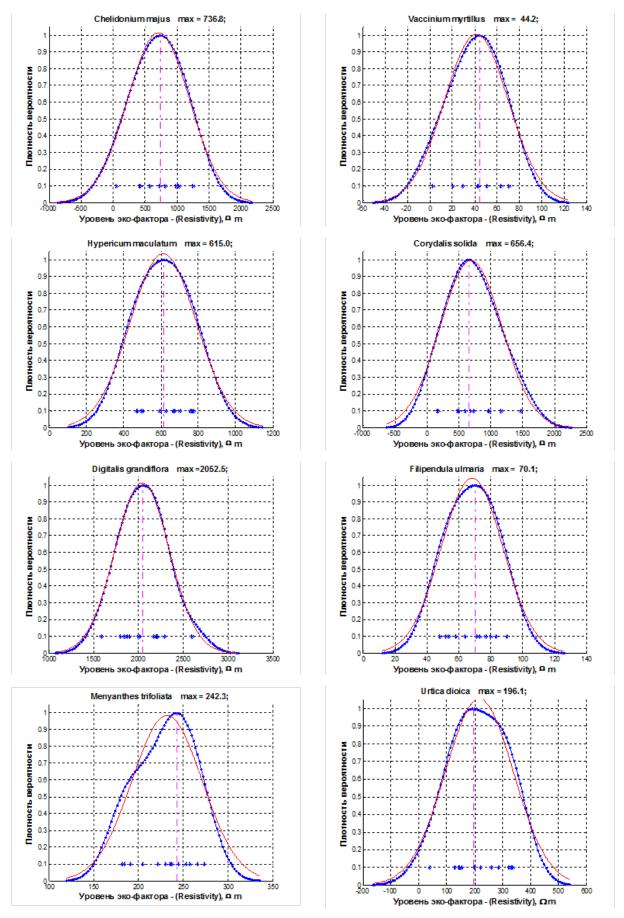


Рисунок 5. – Плотность вероятности УЭС для некоторых видов лекарственных растений



Рисунок 6. — Результаты окраски водным раствором метиленового синего легкого суглинка из горизонта В (слева) и горизонта А1 (справа)

Для выяснения причин такого расхождения с полученными ранее данными был повторно обследован почвенный разрез, где был взят образец легкого суглинка — верхняя часть флювиогляциальных отложений (лат. «флювиос» — река, «гляциас» — лед) оза ледниковой морены. Озы представляют собой ледниковую форму рельефа, линейно вытянутые, узкие грунтовые валы высотой до нескольких десятков метров, шириной от 100–200 м, длиной до десятков километров (с небольшими перерывами).

Почвенный покров оза по строению представляет собой луговую дерновую почву. Растительность исключительно разнотравно-злаковая. Под дерниной Ау, состоящей из подземных частей живых травянистых растений и почвенного мелкозема, интенсивно окрашенной темным гумусом, располагается гумусово-аккумулятивный горизонт А1 сероватого цвета. Подзолистый горизонт А2 отсутствует. Ниже находится иллювиальный горизонт В, представленный супесью рыхлой, жёлтой с красноватым оттенком, бесструктурной, с небольшими охристыми пятнами. Образец

для определения содержания глины [19] как раз и был взят из середины горизонта В. Различие между ними состоит в присутствии в горизонте А1 органического вещества. На это указывали его сероватый цвет, темная окраска щелочного извлечения, а также почернение пробы при прокаливании в кварцевом тигле.

Окраска песчаных частиц из горизонта A1 с метиленовым синим достаточно устойчива и сохраняется после отмучивания фракции глины и многократного промывания окрашенной песчаной фракции волой.

Нами было выдвинуто предположение о том, что окраска почвенных частиц фракции песка обусловлена адсорбированным на них органическим веществом почвы.

Как свидетельствуют литературные данные, органические вещества, источником которых является подстилка (луговой войлок, моховой очес), способны сорбироваться на поверхности твердых частиц почвы (песка) в форме пленки [27], придавая им отрицательный заряд [28]. Как следствие этого создается высокая емкость катионного обмена частиц [28] и способность связывать/окрашиваться катионными красителями. До 60% емкости катионного обмена (ЕКО) почвы может быть обусловлено вариабельностью содержания органического вещества почвы [28].

Для того чтобы подтвердить или опровергнуть связь окраски частиц фракции песка с адсорбированным на них органическим веществом почвы было выполнено удаление органического вещества двукратным окислением 35% перекисью водорода в течение суток при комнатной температуре [23]. Было обнаружено, что после удаления органического вещества почвенные частицы фракции песка практически полностью теряют способность окрашиваться метиленовым синим (рисунок 7).

Таким образом, электропроводность твердой фазы почвы (почвенной матрицы) обусловлена как глинистыми минералами, так и адсорбированным на непроводящих частицах песка органическим веществом почвы. Данные результаты хорошо согласуются с электронно-микроскопической картиной почвы (рисунок 8).

Дополнительные данные в пользу выдвинутой нами гипотезы были получены при обследовании карьера для промышленной добычи глины. Были обнаружены



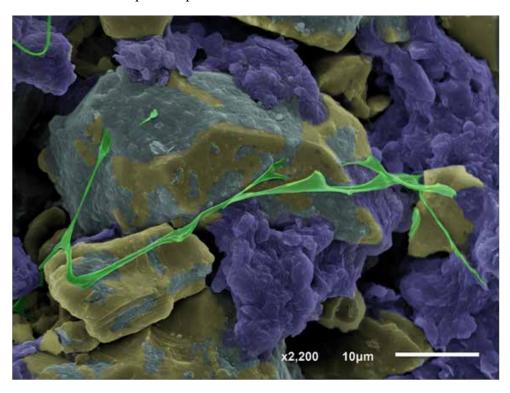
Рисунок 7. — Результаты окраски водным раствором метиленового синего легкого суглинка из горизонта A1 до (справа) и после (слева) удаления органического вещества с помощью водорода пероксида

слои, состоящие исключительно из песка или только из глины. При этом песок не взаимодействовал с катионными красителями, поскольку не содержал органического вещества. Используя глину и песок, мы получили смеси, которые хорошо разделялись на фракции при седиментации, и при этом окрашивалась исключительно фракция глины.

Обнаруженная нами различная окрашиваемость частиц фракций песка представляет существенный интерес для дальнейшего изучения этого явления относительно различных горизонтов разных типов почв, а также слоев геологических обнажений осадочных пород.

Таким образом, электропроводность твердой фазы почвы (почвенной матрицы) обусловлена как глинистыми минералами, так и органическим веществом почвы, частично локализованным на поверхности частиц фракции песка.

Для приведения результатов измерений к условиям насыщенной водой почвы и сравнения данных, полученных для почв различной влажности, предложен способ корректировки.



Минеральные зерна – песчинки (желтый) – связаны с пленками из смеси органических веществ (голубовато-зеленый) и глинистых минералов (синий) и тяжами из органических веществ (зеленый). Рисунок 8. – Сканирующая электронная микроскопия частичек почвы

Рисунок 8. — Сканирующая электронная микроскопия частичек почвы (https://biomolecula.ru/articles/gumus-istoriia-organicheskogo-veshchestva-pochvy)

Корректировка проводится согласно уравнению (8), которое, в свою очередь, является составной частью уравнений (5–7):

$$R = Rx \cdot \theta^b, \qquad (8)$$

где Rx — измеренное удельное электрическое сопротивление $(\Omega \cdot m)$ при объемной влажности (θ) ;

R — скорректированное удельное электрическое сопротивление (Ω ·m);

b – коэффициент (степень функции) в пределах 1,5–2,3 (по умолчанию равно 2).

Поскольку на этом этапе осуществляется измерение падения напряжения (U) и силы тока (I) на электродах и объемной влажности (θ) с помощью емкостного датчика, то метод определения УЭС сохраняет свою экспрессность и неинвазивность. В таком виде он может использоваться как косвенный способ оценки ЕКО почвы, с которой УЭС тесно связано [29], а также ее объемной влажности. Однако отличить увеличение ЕКО, обусловленное, например, повышением содержания в почве органического вещества или глинистых минералов, он не позволяет. Косвенные указания на причины увеличения ЕКО (индицируется по снижению УЭС) можно сделать другими методами, включая экспрессные полевые [30].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные нами полевые испытания подтвердили выявленное в лабораторных опытах существенное влияние глубины погружения электродов в почву на результаты измерения УЭС.

Предложен способ корректировки влияния влажности почвы на результаты измерения УЭС, который позволяет привести результаты измерений к условиям насыщенной водой почвы и, таким образом, проводить сравнение данных, полученных в разное время при различной полевой влажности почвы.

Предложены уравнения для расчета УЭС почвенного раствора (Rw) и почвенной матрицы (Rm), которые, однако, предполагают взятие почвенных образцов для определения плотности почвы (p_b) для последующего расчета ее пористости (ϕ), что существенно увеличивает временные и трудозатраты. Положительным моментом

является то, что отобранные малоинвазивным способом образцы почвы могут быть в дальнейшем проанализированы по другим параметрам, включая УЭС, в лабораторных условиях и сопоставлены с данными, получаемыми в полевых условиях. Кроме того, плотность и пористость почвы являются довольно стабильными параметрами и могут оцениваться однократно, в отличие от более изменчивых во времени показателей, таких как влажность, температура и УЭС.

SUMMARY

G. N. Buzuk DETERMINATION OF SOIL TROPHICITY BY ELECTROPHYSICAL METHOD. MESSAGE 5. FIELD TESTS

The author's installation for measuring specific electrical resistance (UES) of the soil was tested in the field. Dependence of the determined UES on the degree of deepening of uninsulated electrodes into the soil which we determined in the laboratory experiments with water-saturated soil and its aqueous extracts was confirmed. Dependence of UES on the deepening of electrodes into the soil is well approximated as well as in laboratory experiments by a power function. In various phytocenoses with a predominance of medicinal plants in their composition soil UES are determined. Density of probable obtained UES vectors using nonparametric (kernel) regression as well as density of probable normal distribution (Gaussian distribution) is calculated. High variability of the data obtained which can be associated both with the influence of microrelief and root systems of plants was noted. Different coloring value of the sand fraction (or its absence) from topsoil and horizons A1 and B of the soil with the cationic dye methylene blue which is due to the presence of soil organic matter was found. Different coloring value of the sand fraction particles is of considerable interest for further study of this phenomenon with respect to different horizons of different types of soils as well as layers of geological outcrops of sedimentary rocks.

Keywords: geophysical methods, soil electrophysics, soil matrix, Wenner installation, methylene blue, clay, sand.

ЛИТЕРАТУРА

1. Relationship between apparent electri-

- cal conductivity and soil physical properties in a Malaysian paddy field / A. Gholizadeh [et al.] // Arch. of Agronomy and Soil Science. 2012. Vol. 58, N 2. P. 155–168.
- 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.
- 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. Marques Da Silva // Soil and Tillage Research. 2010. Vol. 106, N 2. P. 335–343.
- 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.
- 6. Scale dependent variability of soil electrical conductivity by indirect measures of soil properties / A. Bekele [et al.] // J. of Terramechanics. 2005. Vol. 42, N 3/4. P. 339–351.
- 7. Soil management zones delineated by electrical conductivity to characterize spatial and temporal variations in potato yield and in soil properties / A. N. Cambouris [et al.] //Amer. j. of potato research. 2006. Vol. 83, N 5. P. 381–395.
- 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 soc. of America j. 1990. Vol. 54, N 1. P. 290–293.
- 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.
- 10. 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.
- 11. Soil sensors and plant wearables for smart and precision agriculture / H. Yin [et al.] // Advanced Materials. 2021. Vol. 33, N 20. P. 2007764.
- 12. Imaging the electrical conductivity of the soil profile and its relationships to soil water patterns and drainage characteristics / A. G. El-Naggar [et al.] // Precision Agriculture. 2021. Vol. 22, N 4. P. 1045–1066.
- 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.
- 14. Heiniger, R. W. Using soil electrical conductivity to improve nutrient management / R. W. Heiniger, R. G. McBride, D. E. Clay // Agronomy j. 2003. Vol. 95, N 3. P. 508–519.
- 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 1. Устройство и лабораторная методика / Г. Н. Бузук // Вестн. фармации. -2021. -№ 3. C. 32-40.
- 17. 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.
- 18. Бузук, Г. Н. Определение трофности почв электрофизическим методом. Сообщение 3. Корректировка влияния влажности / Г. Н. Бузук // Вестн. фармации. 2021. № 4. С. 74–84.
- 19. Бузук, Г. Н. Определение трофности почв электрофизическим методом. Сообщение 4. Почвенная матрица / Г. Н. Бузук // Вестн. фармации. -2022. -№ 1. C. 56–62.
- 20. Бузук, Г. Н. Спиральный бур для взятия образцов почвы / Г. Н. Бузук // Вестн. фармации. -2018. -№ 3. -C. 33–35.
- 21. Шеин, Е. В. Агрофизика / Е. В. Шеин, В. М. Гончаров. Москва: Московский гос. ун-т им. М. В. Ломоносова, 2006. 194 с.
- 22. Comparing temperature correction models for soil electrical conductivity measurement / R. Ma [et al.] // Precision agriculture. 2011. Vol. 12, N 1. P. 55–66.
- 23. Organic matter removal from soils using hydrogen peroxide, sodium hypochlorite, and disodium peroxodisulfate / R. Mikutta [et al.] // Soil science soc. of America j. -2005. Vol. 69, N 1. P. 120-135.
- 24. Electrical resistivity tomography as a non-destructive method for mapping root biomass in an orchard / R. Rossi [et al.] // Europ. J. of Soil Science. 2011. Vol. 62, N 2. P. 206–215.
- 25. In situ detection of tree root distribution and biomass by multi-electrode resistivity imaging / M. Amato [et al.] // Tree physiology. 2008. Vol. 28, N 10. P. 1441–1448.
- 26. Paglis, C. M. Application of electrical resistivity tomography for detecting root biomass in coffee trees / C. M. Paglis // Intern. J. of Geophysics. 2013. Vol. 2013. P. 1–6.
- 27. Александрова, Л. Н. Органическое вещество почвы и процессы его трансформации / Л. Н. Александрова. Ленинград: Наука, 1980. 288 с
 - 28. Тейт, Р. Органическое вещество по-

чвы: биологические и экологические аспекты / Р. Тейт. – Москва: Мир, 1991. – 400 с.

- 29. Поздняков, А. И. Электрофизика почв / А. И. Поздняков, А. Д. Позднякова. Москва-Дмитров: Московский гос. ун-т, 2004. 48 с.
- 30. Вадюнина, А. Ф. Методы исследования физических свойств почв / А. Ф. Вадюнина, З. А. Корчагина. Москва: Агропромиздат, 1986. 416 с.

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, Marques Da Silva J. R. 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, S. 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 delineating 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/sssai1990.03615995005400010047x
- 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. 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):2007764. 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 1. Device and laboratory technique. Vestn farmatsii. 2021;(3):32–40. doi: 10.52540/2074-9457.2021.3.32. (In Russ.)
- 17. 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.)
- 18. Buzuk GN. Determination of soil trophicity by electrophysical method. Message 3. Humidity correction. Vestn farmatsii. 2021;(4):74–84. doi: 10.52540/2074-9457.2021.4.74. (In Russ.)
- 19. Buzuk GN. Determination of soil trophicity by electrophysical method. Message 4. Soil matrix. Vestn farmatsii. 2022;(1):56–62. (In Russ.)
- 20. Buzuk GN. Spiral drill for taking soil samples. Vestn farmatsii. 2018;(3):33–5. (In Russ.)
- 21. Shein EV, Goncharov VM. Agrophysics. Moskva, RF: Moskovskii gos un-t im MV Lomonosova; 2006. 194 s. (In Russ.)
- 22. 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
- 23. Mikutta R, Kleber M, Kaiser K, Jahn R. Organic matter removal from soils using hydrogen peroxide, sodium hypochlorite, and disodium peroxodisulfate. Soil Sci Soc Am J. 2005;69(1):120–35. doi: 10.2136/sssaj2005.0120

- 24. Rossi R, Amato M, Bitella G, Bochicchio R, Ferreira Gomes JJ, Lovelli S et al. Electrical resistivity tomography as a non-destructive method for mapping root biomass in an orchard. Eur J Soil Sci. 2011;62(2):206–15. doi: 10.1111/j.1365-2389.2010.01329.x
- 25. Amato M, Basso B, Celano G, Bitella G, Morelli G, Rossi R. In situ detection of tree root distribution and biomass by multi-electrode resistivity imaging. Tree Physiol. 2008;28(10):1441-8. doi: 10.1093/treephys/28.8.1441
- 26. Paglis CM. Application of electrical resistivity tomography for detecting root biomass in coffee trees. Intern J of Geophysics. 2013;2013:1–6. doi: 10.1155/2013/383261
- 27. Aleksandrova LN. Soil organic matter and processes of its transformation. Leningrad, RF: Nauka; 1980. 288 s. (In Russ.)

- 28. Teit R. Soil organic matter: biological and ecological aspects. Moskva, RF: Mir; 1991. 400 s. (In Russ.)
- 29. Pozdniakov AI, Pozdniakova AD. Electrophysics of soils. Moskva–Dmitrov, RF: Moskovskii gos un-t; 2004. 48 s. (In Russ.)
- 30. Vadiunina AF, Korchagina ZA. Methods for studying the physical properties of soils. Moskva, RF: Agropromizdat; 1986. 416 s. (In Russ.)

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 10.06.2022 г.