

Ten. Izvestiia GGTU. Meditsina, farmatsiia. 2023;(4):44–53. doi: 10.51620/2687-1521-2023-4-16-44-53. (In Russ.)

6. Mukhametova IuR. Characteristics of the active principles and possible mechanisms of influence of polyphenols on metabolic processes. V: Motovilov OK, Denisov AS, Rudoi EV, Nitsievskaia KN, redaktery. Pishcha. Ekologiya. Kachestvo: trudy XIV mezhdunar nauch-prakt konf (Novosibirsk, 8–10 noiabria 2017 g). Novosibirsk, RF: Novosibirskii gos agrarnyi un-t; 2017. T. 2 (M-Ia). s.70–2. (In Russ.)

7. Shustov EB, Kashuro VA, Batotsyrenova EG, Zolotoverkhaia EA, Kim AE, Kostorova TA. Polyphenols as promising neuropharmacological agents. Biomeditsina. 2020;16(3):125–9. doi: 10.33647/2074-5982-16-3-125-129. (In Russ.)

8. Khidyrova NK, Van EV, Shakhidoyatov RKh, Mamatkulova NM, Shakhidoyatov KhM. Polyisoprenoids from the leaves of *Althaea armeniaca*. Chem Nat Compd. 2007;43(4):470–1. doi: 10.1007/s10600-007-0165-3

9. Van EV, Shakhidoyatov RKh, Khidyrova NK, Mukarramov NI, Shakhidoyatov KM. Polyphenols from *Althaea armeniaca* leaves. Chem Nat Compd. 2009;45(6):775–8. doi: 10.1007/s10600-010-9508-6

10. Tursunova NV, Klinnikova MG, Tornuev IuV, Lushnikova EL. Plant polyphenols as a promising class of compounds stimulating regenerative processes. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia. 2019;(4). URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=28977> (data obrashcheniia: 15.10.2025). (In Russ.)

11. Gudej J, Bieganowska ML. Chromatographic investigations of phenolic acids and coumarins in the leaves and flowers of some species of the genus *Althaea*. J Liq Chromatogr. 1990;13(20):4081–92. doi: 10.1080/01483919008049590

12. Komissarenko SN, Kovalev VN. Coumarins of *Althaea officinalis* and *A. armeniaca*. Chemistry of natural compounds. 1992;28(2):243–4. doi: 10.1007/bf00630189

13. Gudej J, Bieganowska ML. Chromatographic investigations of flavonoid compounds in the leaves and flowers of some species of the genus *Althaea*. Chromatographia; 1990;30(5-6):333–6

14. Sagdullaev BT, Shakhidoyatov RKh, Khodzhaeva MA, Chernenko TV, Turakhozhaev MT, Abduazimova MA. Lipids and carbohydrates from *Althaea nudiflora* and *A. armeniaca* roots. Chem Nat Compd. 2001;37(3):208–12. doi: 10.1023/A:1012597419237

15. Trineeva OV, Slivkin AI. Determination of simple sugars in medicinal plant materials by high-performance thin-layer chromatography (using sea buckthorn fruits and stinging nettle leaves as an example). Khimiia rastitel'nogo syr'ia. 2020;(1):215–22. doi: 10.14258/jcpm.2020015122. (In Russ.)

16. Korozhan NV. Polysaccharides of some species of succession of flora of the Republic of Belarus. V: Kotel'nikov GP, Shchukin IuV, Davydkin IL, Fedorina TA, Kuvshinova NIu, Kalinin VA, redaktery. Aspirantskie chteniia – 2015: materialy nauch-prakt konf s mezhdunar uchastiem «Molodye uchenye XXI veka – ot idei k praktike», posviashchennoi 85-letiiu Klinik SamGMU. Samara, RF: Aeroprint; 2015. s. 171–2. (In Russ.)

Адрес для корреспонденции:

210009, Республика Беларусь,
г. Витебск, пр. Фрунзе, 27,
УО «Витебский государственный ордена
Дружбы народов медицинский университет»,
кафедра фармакогнозии и ботаники,
e-mail: gnozia20vgmu@mail.ru,
Осипова А. А.

Поступила 18.12.2025 г.

УДК 633.88:631.42

DOI: <https://doi.org/10.52540/2074-9457.2025.4.42>

Г. Н. Бузук

МНОГОЧАСТОТНЫЙ ИМПЕДАНСНЫЙ АНАЛИЗ ПОЧВ В ЛЕКАРСТВЕННОМ РАСТЕНИЕВОДСТВЕ: МЕТОДОЛОГИЯ

г. Витебск, Республика Беларусь

В статье предложена новая электрофизическая методика оценки гранулометрического состава и минералогической активности почв. В основу метода положен анализ комплексного сопротивления (импеданса) почв и почвенных экстрактов в диапазоне частот 1–100 кГц с предварительной ультразвуковой обработкой пробы. Введены и обоснованы расчетные индексы: коэффициент частотной дисперсии (k_{fd}), отражающий

количественное содержание физической глины, и индекс коллоидности (CI), характеризующий качественную активность двойного электрического слоя. Авторами предложен коэффициент удельной активности $K_{ac} = CI / k_{fd}$, позволяющий дифференцировать минеральную и органическую составляющие коллоидного комплекса.

Ключевые слова: электрофизика почв, импедансная спектроскопия, двойной электрический слой, ультразвуковая дезагрегация, коэффициент дисперсии, индекс коллоидности, текстура почвы, лекарственные растения.

ВВЕДЕНИЕ

Определение гранулометрического (текстурного) состава и оценка активности коллоидного (органоминерального) комплекса являются фундаментальными задачами почвоведения, поскольку именно эти параметры определяют водно-физические, поглотительные и структурные свойства почв [1–3]. Традиционные методы анализа, такие как пипеточный метод Качинского или ареометрический метод [4], характеризуются высокой трудоемкостью, длительностью процедур седиментации и необходимостью использования химических диспергаторов, что затрудняет их применение для экспресс-мониторинга.

Электрофизические методы анализа почв широко применяются в агрохимии, геофизике и экологии благодаря их неразрушающему характеру, высокой чувствительности и возможности экспресс-оценки свойств среды. Удельная электрическая проводимость (σ) является одним из наиболее информативных параметров, отражающих минерализацию, содержание растворенных солей, структуру порового пространства и степень увлажнения почвы [5–6].

Высокочастотные методы импедансной спектроскопии позволяют дополнительно оценивать свойства коллоидной фракции, органического вещества и двойного электрического слоя (ДЭС), что делает их перспективными для диагностики текстуры и активности почвенной матрицы [7–8]. Фазовые и частотные характеристики импеданса чувствительны к поляризационным процессам, связанным с глинистыми минералами, органикой и структурой пор [9].

В последние десятилетия в качестве альтернативы активно развиваются электрофизические методы, в частности спектрально-вызванная поляризация (SIP) и импедансная спектроскопия [10–11]. Физическая основа данных методов заключается в способности почвенных частиц, об-

ладающих двойным электрическим слоем (ДЭС), поляризоваться под воздействием внешнего переменного электрического поля.

Особое значение в электрофизике почв имеет диапазон частот от 1 кГц до 100 кГц. В этом интервале наблюдается максвелл-вагнеровская поляризация, интенсивность которой напрямую коррелирует с удельной поверхностью твердой фазы и концентрацией мелкодисперсных (коллоидных) частиц [12–13]. Однако прямая интерпретация электрофизических параметров осложняется агрегированностью почв. Существование водоустойчивых макро- и микроагрегатов «маскирует» истинную поверхность глинистых минералов, что ведет к недооценке содержания физической глины при измерениях [14].

Для решения этой проблемы необходимо использование методов принудительной дезагрегации. Ультразвуковая (УЗ) обработка признана одним из наиболее эффективных способов разрушения почвенной структуры без изменения химического состава минеральной основы [15–16]. Кавитационные процессы в УЗ-поле позволяют полностью высвободить коллоидный пул, что делает электрофизический отклик максимально информативным [17].

Несмотря на наличие теоретической базы, в современной литературе недостаточно освещены вопросы разделения количественных и качественных характеристик коллоидов в рамках одного экспресс-измерения. Кроме того, существенным фактором, влияющим на точность, остается температура пробы, требующая строгого математического учета для стандартизации результатов [6].

Особую актуальность разработка экспресс-методов оценки почвенной среды приобретает в области культивирования лекарственных растений. Качество лекарственного сырья и концентрация действующих веществ (вторичных метаболитов) критически зависят от водно-воздушного режима и минералогического состава почвы

[18]. Так, для многих видов лекарственных трав содержание активных компонентов связано с гранулометрическим составом и поглотительной способностью почв, определяющей доступность микроэлементов [19]. Быстрая диагностика почвенного поглощающего комплекса позволяет оперативно корректировать условия произрастания для оптимизации выхода биологически активных соединений [20–21].

Целью настоящей работы является разработка методики классификации текстуры и оценки активности почвенных коллоидов на основе многочастотного анализа импеданса в сочетании с контролируемой ультразвуковой дезагрегацией. В работе вводится комплекс индексов ($k_{\text{га}}$, $СI$ и K_{ac}), позволяющих дифференцировать содержание физической глины и ее минералогическую активность.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Аппаратное обеспечение

Для измерения электрического сопротивления почвы использовали 4-электродную квадратную AMNB установку G. M. Habberjam [22–23] (рисунок 1). Расстояние между электродами (а) составляло 15 мм. Общая длина электродов составляла от 90 до 130 мм, диаметр – 2–3 мм.

Измерения выполняли в пластиковых

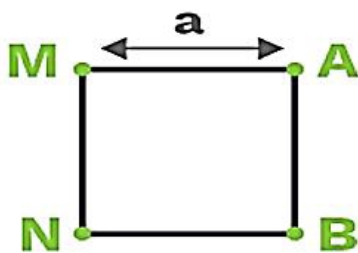


Рисунок 1. – Схема квадратной установки G. M. Habberjam (а – межэлектродное расстояние)

контейнерах диаметром 20–40 мм и объемом 50–100 мл.

Для измерений использовали прецизионный LCR-метр (например, FNIRSI LC1020E или аналоги), поддерживающий частоты 1, 10 и 100 кГц, а также специально сконструированную установку, позволяющую точно контролировать глубину погружения электродов в почву или раствор (рисунок 2). Достоинством LCR-

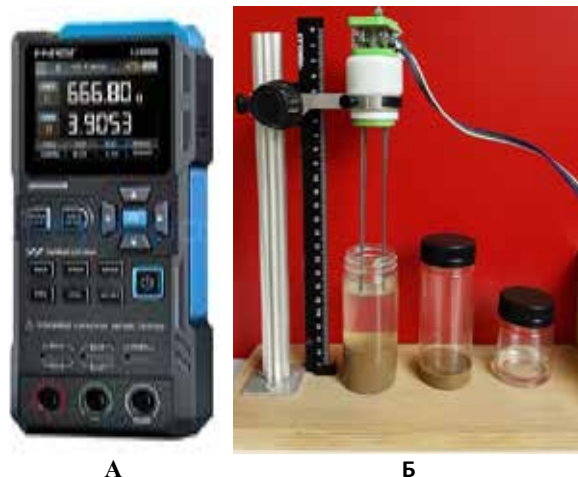


Рисунок 2. – LCR-метр FNIRSI LC1020E (А) и устройство для контролируемого погружения электродов (Б) в исследуемые субстраты (почву, водные растворы и суспензии почвы)

метра FNIRSI LC1020E является портативность и возможность использовать в полевых условиях.

Для исключения влияния переходного сопротивления контактов и эффекта электродной поляризации в области низких частот (1–10 кГц), стандартная двухэлектродная ячейка была модернизирована в четырехэлектродный датчик (щуп Кельвина). Разделение токовых и потенциальных электродов позволило прецизионно измерять падение напряжения непосредственно на исследуемом объеме водонасыщенных почв, почвенной суспензии или экстрактов. С этой целью у щупа Кельвина удаляли концевые зажимы, а высвободившиеся контакты напрямую подключали к электродам четырехэлектродной установки.

FNIRSI LC1020E имеет 5-контактный интерфейс (4 контакта для четырехпроводного подключения и дополнительный общий – заземление). Контакты **Hcur** и **Lcur** (токовые) подключали к электродам **A** и **B** квадратной установки, **Hpot** и **Lpot** к **M** и **N** соответственно (рисунок 1). Напряжение на электродах устанавливали максимальное (0,6 V).

Подготовка прибора и датчика

Перед началом серии замеров промывают электроды в воде очищенной и протирают безворсовой салфеткой. Жировые загрязнения или остатки предыдущей пробы могут создать паразитную емкость,

которая может исказить фазовый угол ϕ . Электроды должны быть не погнуты, и квадрат со стороной 15 мм должен сохранять форму. Даже небольшое отклонение в 0,5–1 мм изменяет геометрический коэффициент k .

На FNIRSI LC1020E выбирают режим измерения импеданса (LCR), где видны R и X . R (Active Resistance) – активное (реальное) сопротивление. Оно связано с движением свободных ионов в почвенном растворе и по поверхности глинистых частиц. X (Reactive Resistance) – реактивное (мнимое) сопротивление. В почве оно почти всегда носит емкостный характер (X_c). Оно возникает из-за того, что двойной электрический слой (ДЭС) вокруг коллоидов работает как микроконденсатор, накапливая заряд.

Подготовка проб

Используют почву, насыщенную водой очищенной, или готовят суспензии в соотношении почва – вода 1 : 2 – 1 : 8 (например, 6 г почвы на 30 мл воды очищенной). Сначала встряхивают смесь почвы и воды в течение 3–5 минут вручную (или используют мешалку). Дают крупным частицам песка осесть в течение 1–2 минут до образования сравнительно стойкой взвеси глинисто-гумусового (органоминерального) комплекса, а затем измеряют R и X .

Озвучивание проб осуществляют в УЗ-ванне в течение 5–15 минут при мощности 30–50 Вт для разрушения почвенных агрегатов и перевода ионов в свободное состояние. Под действием ультразвука происходит диспергирование почвенных агрегатов до первичных частиц (глинистых минералов, гумусовых веществ), размер которых может достигать коллоидного уровня (менее 1 мкм).

С поверхности минеральных частиц снимаются пленки оксидов железа и марганца, а также органики, обнажая активные центры. Эффективность УЗ-дезинтеграции подтверждается визуальным изменением цвета песчаной фракции: переход от темно-серых оттенков к серебристо-белому цвету кварцевых зерен свидетельствует о полной десорбции органоминеральных пленок и их переходе в коллоидную фазу. Это может служить индикатором полного диспергирования. Время, необходимое для такой очистки частиц каркасных минералов (кварц), является прямой мерой энер-

гии связи органики с минеральной частью.

Под действием ультразвука ионы, удерживавшие частицы вместе (например, мостики из кальция Ca^{2+}), переходят в раствор, а сами частицы приобретают мощную гидратную оболочку. Ультразвуковое озвучивание выполняет «принудительную» экстракцию – ионы (K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}), закрытые внутри почвенных агрегатов, выходят в раствор.

Контейнеры с почвой помещали в боковом положении в УЗ-ванну для увеличения площади поверхности, на которую воздействует акустическая волна, и уменьшается высота слоя почвы, что ускоряет кавитационное диспергирование. После оседания песка электроды 4-электродной установки оказываются погруженными в коллоидную фазу (органоминеральный) гель.

После озвучивания встряхивают суспензию в течение 1–2 мин, а затем, после осаждения грубодисперсных фракций (песка) в течение 1–2 минут, измеряют R и X .

Для получения почвенного экстракта, не содержащего почвенных частиц, суспензию дополнительно центрифугируют при 3–5000 об/мин или отстаивают в течение 13–16 часов. А затем замеряют R и X прозрачного надосадочного слоя после отстаивания или центрифугирования.

Калибровка (раз в день или при смене температуры)

Для калибровки использовали 0,001 М водный раствор калия хлорида (таблица 1). Калибровка сводилась к определению зависимости электросопротивления от глубины погружения электродов в исследуемый субстрат и последующего расчета геометрического коэффициента для каждого заглубления.

Сначала рассчитывался геометрический коэффициент (k) по формуле (1):

$$k = ER_{st} / R_{st}, \quad (1)$$

где ER_{st} – удельное электросопротивление стандартного 0,001 М раствора калия хлорида при температуре 20 °С (таблица 1);

R_{st} – электросопротивление стандартного 0,001 М раствора калия хлорида при различных заглублениях электродов (z).

На основании полученных данных были рассчитаны уравнения регрессии, аппроксимирующие зависимость геоме-

Таблица 1. – Электропроводность/электросопротивление водного раствора калия хлорида при различных температурах и концентрациях (адаптировано из [24])

T °C	0,01 M мкСм/см	0,01 M мСм/см	0,01 M См/м	0,01 M Ом·м	0,001 M мкСм/см	0,001 M мСм/см	0,001 M См/м	0,001 M Ом·м
0	822	0,82	8,22	12,17	82,1	0,08	0,82	121,80
5	941	0,94	9,41	10,63	93,9	0,09	0,94	106,50
10	1060	1,06	10,6	9,43	106,4	0,11	1,06	93,98
15	1189	1,19	11,89	8,41	119,7	0,12	1,20	83,54
20	1319	1,32	13,19	7,58	133,3	0,13	1,33	75,02
25	1450	1,45	14,5	6,90	147,1	0,15	1,47	68,03
30	1581	1,58	15,81	6,33	160,9	0,16	1,61	62,15
35	1713	1,71	17,13	5,84	175,1	0,18	1,75	57,11
40	1846	1,85	18,46	5,42	189,5	0,19	1,90	52,77
45	1980	1,98	19,8	5,05	204,1	0,20	2,04	49,02
50	2114	2,11	21,14	4,73	218,5	0,22	2,19	45,77

трического коэффициента k от величины заглубления электродов z [25]. В отличие от предыдущего исследования [25], лучшая аппроксимация была достигнута при

использовании степенной функции (формула 2, рисунок 3).

$$k(z) = a_i \cdot z^b \tag{2}$$

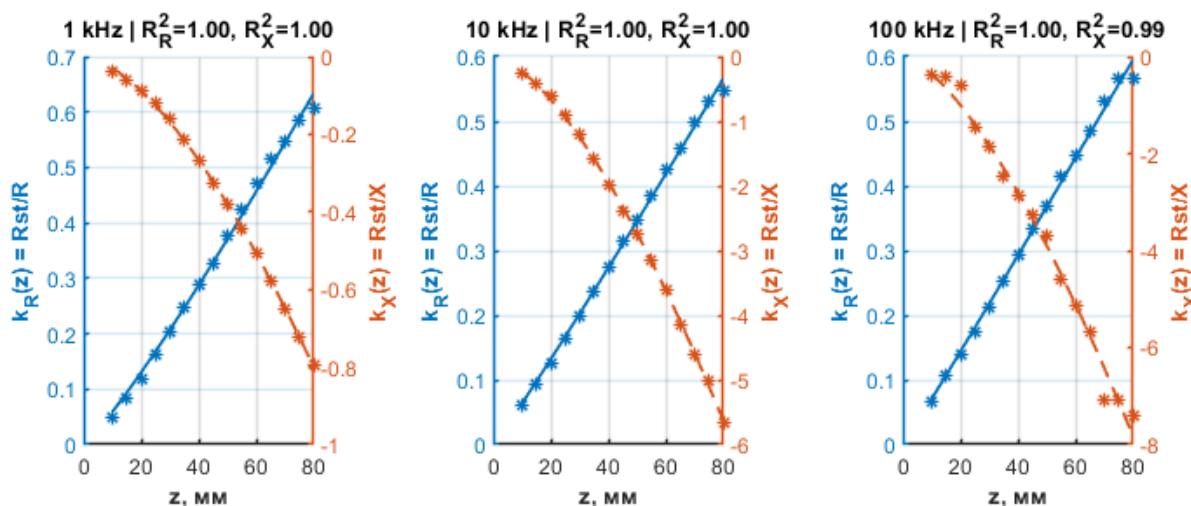


Рисунок 3. – Зависимость геометрического коэффициента (k_R и k_X) от глубины погружения (z) неизолированных электродов в стандартный раствор калия хлорида

Далее, подставляя в уравнение заглубление (z_{test}) для опытных почв или водного экстракта из нее, получали текущий геометрический коэффициент (k_{test}) для данного заглубления z_{test} . Затем рассчитывали удельные сопротивления ER_x , используя формулу (3):

$$ER_x = k_{test} \cdot R_x \tag{3}$$

где R_x – электросопротивление (R или X) опытных почв или экстрактов (Ω);

k_{test} – текущий геометрический коэффициент.

Алгоритм измерений

Погружают датчик в почву (влажную или насыщенную водой), водный раствор или почвенную суспензию на глубину z_{test} (например, по метке на электроде или уровню жидкости в контейнере). Для каждого образца регистрируются следующие параметры:

R_{100k}, X_{100k} (на частоте 100 кГц) – для расчета базового содержания солей.

R_{10k}, X_{10k} (на частоте 10 кГц) – для оценки фазового сдвига.

R_{1k}, X_{1k} (на частоте 1 кГц) – для расчета коэффициента частотной дисперсии.

Температура пробы T ($^{\circ}C$) для приве-

дения данных к стандарту 25 °С.

Для простого определения электропроводности с последующим расчетом электропроводности достаточно измерений на частоте 100 кГц. Это связано с максимальным устранением эффекта поляризации электродов. Даже в четырехэлектродной схеме на поверхности электродов возникают электрохимические процессы. На частоте 100 кГц ионы не успевают накапливаться у поверхности электрода (эффект ДЭС), что сводит реактивное сопротивление X к минимуму. Это делает измерения R максимально близкими к истинному объемному сопротивлению раствора.

Вторая причина связана с эффектом прошивания органических мембран. В растительных экстрактах и почвенных вытяжках могут присутствовать микроскопические фрагменты клеток или коллоидные частицы. На 10 кГц ток в основном обтекает эти частицы, воспринимая их как диэлектрические препятствия.

На 100 кГц проявляется эффект емкостного пробоя органических частиц, и ток проходит «сквозь» них. Это дает более объективную картину общей ионной проводимости всей пробы.

Наличие суспензии глины в растворе коренным образом меняет его электрическое поведение. В отличие от растворов чистых солей, глина вносит поверхностную проводимость и мощный емкостный эффект. Частицы глины имеют отрицательный заряд на поверхности, который притягивает облако катионов из раствора, образуя двойной электрический слой (ДЭС). Частотная зависимость – на низких частотах (1 кГц) ДЭС частиц глины поляризуется, создавая значительное реактивное сопротивление X . На высоких частотах (100 кГц) этот эффект как бы «срезается», измеряется только реальное движение ионов, т. е. R). Кроме того, если в суспензии присутствует глина, то наблюдается дисперсия сопротивления. Значение R на 10 кГц существенно выше, чем на 100 кГц. Чем больше глины, тем больше этот разрыв. Наблюдается высокий фазовый угол ϕ . В чистой соли на 100 кГц $\phi \sim 0^\circ$. В суспензии глины он может достигать $-10^\circ \dots -20^\circ$ даже на высоких частотах.

Математический аппарат и обработка данных

Для стандартизации результатов и

исключения влияния внешних факторов (температура, геометрия датчика) первичные данные импеданса подвергались математической обработке по следующим этапам.

1. Температурная коррекция проводимости

Удельная электрическая проводимость (УЭП) почвенных суспензий и водных растворов сильно зависит от вязкости воды и подвижности ионов, изменяется в среднем на 2% на каждый градус Цельсия [6]. Для сопоставимости результатов все измеренные значения сопротивления (R_t) приводились к стандартной температуре $T = 25^\circ\text{C}$ с использованием температурного коэффициента коррекции f_t :

$$f_t = 1 + \alpha \cdot (t - 25), \quad (4)$$

$$R_{25} = R_t / f_t, \quad (5)$$

где t – фактическая температура пробы, °С;

α – температурный коэффициент (принят равным 0,021);

f_t – температурный коэффициент коррекции.

2. Расчет частотных индексов

Для количественной и качественной оценки органо-минерального комплекса использовались относительные безразмерные величины, что позволяет нивелировать влияние общей минерализации раствора.

Коэффициент частотной дисперсии (k_{fd}), характеризующий общую массу мелкодисперсных фракций (количество физической глины), рассчитывался в широком диапазоне (1–100 кГц):

$$k_{fd} = \frac{R_{1k} - R_{100k}}{R_{100k}} \cdot 100\% . \quad (6)$$

Коэффициент частотной дисперсии (k_{fd}) отражает относительное изменение активного сопротивления при переходе от низкой частоты к высокой и отражает объемную долю частиц, обладающих развитым двойным электрическим слоем (ДЭС) [26]. Физически это связано с явлением мембранной и межфазной поляризации. На низких частотах (1 кГц) ионы в двойном электрическом слое (ДЭС)

успевают смещаться и накапливаться у границ раздела фаз, создавая дополнительное «сопротивление преграды». На высоких частотах (100 кГц) ионы лишь совершают колебания на месте, и система ведет себя как обычный проводник. Чем больше площадь поверхности раздела (т. е. чем больше глины), тем выше эта разница и, следовательно, выше k_{fd} . Согласно ряду исследований [1, 12], рост k_{fd} в частотном диапазоне 1–100 кГц напрямую коррелирует с увеличением содержания физической глины (частицы < 0,01 мм), что обусловлено высокой удельной поверхностью данной фракции и ее способностью к поверхностной поляризации [27–29].

Математическое выражение коэффициента дисперсии k_{fd} как отношения разности активных сопротивлений на частотах 1 и 100 кГц к высокочастотному пределу согласуется с теоретическими моделями Максвелла-Вагнера [30, 11]. Использование частоты 100 кГц в качестве реперной точки позволяет минимизировать вклад межфазной поляризации, фиксируя «чистую» проводимость порового раствора [31].

Коэффициент частотной дисперсии (k_{fd}) может рассматриваться как достаточно надежный суррогатный показатель содержания физической глины. Физический смысл данной замены заключается в прямой зависимости интенсивности поляризации от удельной поверхности системы, основным носителем которой в почвах являются частицы размером менее 0,01 мм [32–34]. Это позволяет использовать k_{fd} для экспресс-оценки текстурного состава почвы, особенно в задачах прецизионного растениеводства лекарственных культур, где критически важна оценка активной поверхности почвенных коллоидов.

Связь между электрофизической дисперсией и содержанием физической глины (C_{clay} , %) чаще всего описывается степенной или логарифмической функцией, так как при высоких концентрациях глины наблюдается эффект «самонаслаивания» частиц, и рост дисперсии замедляется [12, 34–35].

Математическая модель суррогатного (косвенного) определения содержания глинистых частиц через электрофизические параметры базируется на теории поверхностной проводимости и межфазной

поляризации. В методике предложено эмпирическое уравнение, связывающее коэффициент частотной дисперсии (k_{fd}) с процентным содержанием физической глины (C_{clay}):

$$C_{clay} = A \cdot (k_{fd})^B, \quad (7)$$

где $A = 1,15$ и $B = 1,02$ – коэффициенты для калибровочных эталонов почв.

Суть модели заключается в том, что высокочастотное сопротивление (R_{100k}) отражает только общую минерализацию раствора, тогда как низкочастотное (R_{1k}) включает в себя сопротивление, обусловленное «заторможенными» ионами в двойном электрическом слое (ДЭС) на поверхности глины.

Глинистые минералы обладают колоссальной удельной поверхностью, которая на порядки выше, чем у песка или пыли. Величина k_{fd} пропорциональна количеству связанных ионов, которые могут участвовать в поляризации. Поскольку плотность заряда на поверхности большинства глинистых минералов (монтмориллонит, иллит) относительно стабильна для конкретного типа почв, k_{fd} становится прямой функцией от массы глинистых частиц в единице объема [34, 36].

Предложенное уравнение регрессии позволяет использовать электрофизические измерения для количественной оценки текстуры почв без проведения длительных процедур седиментации. Это особенно ценно для оперативного картирования угодий под лекарственные культуры, где требуется высокая плотность точек отбора проб.

Индекс коллоидности (Colloidal Index, CI) представляет собой расчетный параметр, характеризующий относительный вклад максвелл-вагнеровской поляризации в зоне (10–100 кГц) в общий импеданс системы [11, 37]. Коллоидные частицы (глина, гумус, белки) имеют электрический заряд на поверхности. При низких частотах (10 кГц) ток тратит энергию на поляризацию этой «шубы» из ионов вокруг частицы, что прибор фиксирует как повышенное сопротивление. На высоких частотах (100 кГц) ионы не успевают следовать за полем, и ток течет «насквозь», показывая только чистую проводимость раствора.

Расчет CI через нормированную разность активных сопротивлений на частотах 10 и 100 кГц позволяет нивелировать влияние общей минерализации раствора и выделить отклик, обусловленный концентрацией и электрохимической активностью мелкодисперсной фракции [13, 39]. Согласно модели Бернера [38], данный показатель прямо коррелирует с плотностью поверхностного заряда коллоидного комплекса, активированного в процессе ультразвуковой дезагрегации.

CI определяется как процентное отношение разности активных сопротивлений, измеренных на промежуточной (10 кГц) и высокой (100 кГц) частотах, к базовому сопротивлению на высокой частоте:

$$CI = \frac{R_{10k} - R_{100k}}{R_{100k}} \cdot 100\%. \quad (8)$$

CI отражает относительное содержание и активность мелкодисперсной (коллоидной) фракции в образце. После 5–15 минут озвучивания CI обычно растет. Это происходит потому, что ультразвук разбивает крупные агрегаты на многочисленные мелкие, вплоть до размеров коллоидов. Чем сильнее вырос CI после УЗ-ванны, тем выше была «структурность» исходной почвы (ее способность формировать прочные агрегаты).

Коэффициент удельной активности (K_{ac})

Для финальной диагностики текстурного типа и разделения минеральных и органических коллоидов вычислялось их соотношение:

$$K_{ac} = \frac{CI}{k_{fd}}. \quad (9)$$

Данный коэффициент нормирует высокочастотный отклик («качество») на общую дисперсию («количество»), позволяя выделить специфическую активность поверхности независимо от концентрации твердой фазы в экстракте.

Фазовый анализ (фазовый угол ϕ)

Фазовый угол показывает сдвиг между напряжением и током. Он рассчитывается из значений активного сопротивления R и

реактивного сопротивления X по формуле:

$$\phi = \arctan\left(\frac{X}{R}\right). \quad (10)$$

Фазовый угол ϕ на частоте 10 кГц использовался как прямой индикатор емкостной составляющей импеданса.

Глубина фазового сдвига интерпретировалась как мера «энергоемкости» ДЭС, где более высокие абсолютные значения ϕ соответствуют активным глинистым минералам с высокой емкостью катионного обмена (ЕКО).

Фазовый угол (ϕ_{10k}) выступает в качестве индикатора электрохимической активности поверхности почвенных частиц [41]. Исследования показывают, что минеральные глинистые компоненты, такие как монтмориллонит и иллит, за счет высокой плотности поверхностного заряда и жесткой структуры ДЭС, индуцируют более глубокий фазовый сдвиг по сравнению с органическими субстратами (гумусовыми веществами, например) при эквивалентных уровнях активного сопротивления [36, 40–42]. Данный феномен позволяет использовать фазовые характеристики для разделения минеральной и органической составляющих коллоидного комплекса почвы [43]. Иначе говоря, чем «отрицательнее» угол, тем больше органики в почве.

Для более глубокой диагностики был введен расчетный коэффициент удельной активности:

$$K_{ac} = CI / k_{fd}. \quad (11)$$

Данный параметр позволяет дифференцировать образцы с идентичным гранулометрическим составом по их минералогической природе. Если k_{fd} (1–100 кГц) описывает всю «заселенность» среды мелкими частицами, то CI (10–100 кГц) вычлняет из них только самые подвижные и заряженные. Отношение CI/k_{fd} показывает, какую долю в общей массе мелкодисперсных частиц составляют истинно активные коллоиды. Высокие значения K_{ac} ($> 0,5$) характерны для органогенных и гумусированных горизонтов почв, где высокая удельная поверхность коллоидов обеспечивает интенсивную поляризацию в диапазоне 10–100 кГц [44], и свидетельствуют о высокой емкости поглощения

почвы. Снижение коэффициента ниже 0,3 при высоких значениях k_{fd} свидетельствует о преобладании пылеватых фракций и минералогически истощенных иллитовых или каолиновых систем [34]. В такой почве много пылеватых частиц (высокий k_{fd}), но они электрохимически пассивны (например, мелкозернистый кварц или сильно истощенные глины).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании предложенных коэффициентов, измеряемых с помощью импедансной спектроскопии, нами предложена следующая (ориентировочная) таблица (таблица 2) классификации текстурных типов почвы, адаптированной к классификации Н. А. Качинского [4].

Таблица 2. – Объединенная матрица классификации почв по всем импедансным индексам

Тип почвы	EC25 (мкСм/см)	k_{fd} (%)	CI (%)	K_{ac}	Φ_{1k} (°)	Φ_{10k} (°)	Φ_{100k} (°)
Песчаные	0–20	> 30	0–20	0–1,0	3–10	5–12	5–15
Супесчаные	20–40	20–35	20–40	0,8–1,2	8–15	10–20	15–25
Суглинистые	40–80	10–25	40–60	1,0–1,8	12–20	15–30	25–40
Глинистые	> 80	< 15	> 60	> 1,5	15–30	25–40	35–60+

Для определения текстурных типов почв нами предложен метод на основе анализа многочастотных импедансных спектров с использованием неметрического многомерного шкалирования (NMDS). В качестве входных данных использовались комплексные импедансные характеристики почвенных образцов (глина, суглинок, супесь, песок), измеренные в диапазоне частот (1, 10 и 100 кГц). В качестве меры несходства применялось евклидово расстояние между нормализованными спектрами. NMDS-процедура позволила по-

лучить двумерную ординацию, в которой взаимное расположение точек отражает ранговые отношения между спектрами. Качество ординации оценивалось по величине стресса и коэффициенту соответствия исходных и ординационных расстояний (рисунки 4–5).

Результаты ординации почвенных образцов методом неметрического многомерного масштабирования (NMDS) демонстрируют высокую адекватность модели: значение стресса составляет 0,000, а суммарная объясненная дисперсия (Total

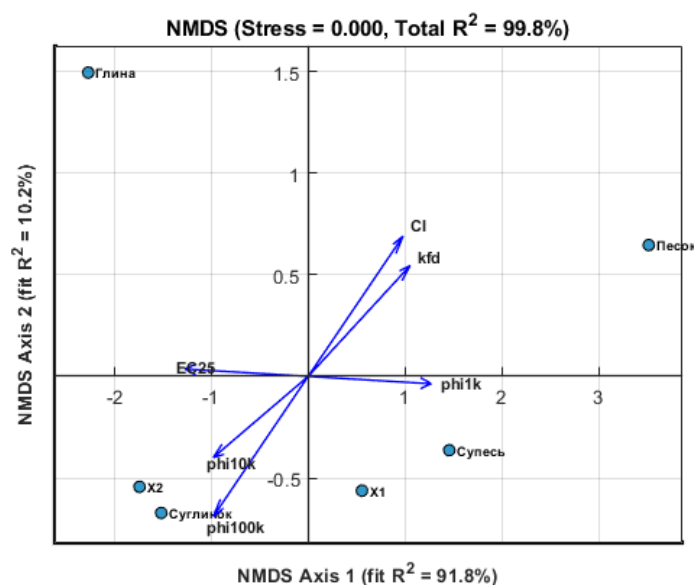


Рисунок 4. – NMDS-ординация почвенных образцов на основе многочастотных импедансных спектров (направления стрелок соответствуют корреляции импедансных параметров с ординационными координатами). Эталонные текстурные классы (глина, суглинок, супесь, песок), X1 и X2 – классифицируемые образцы

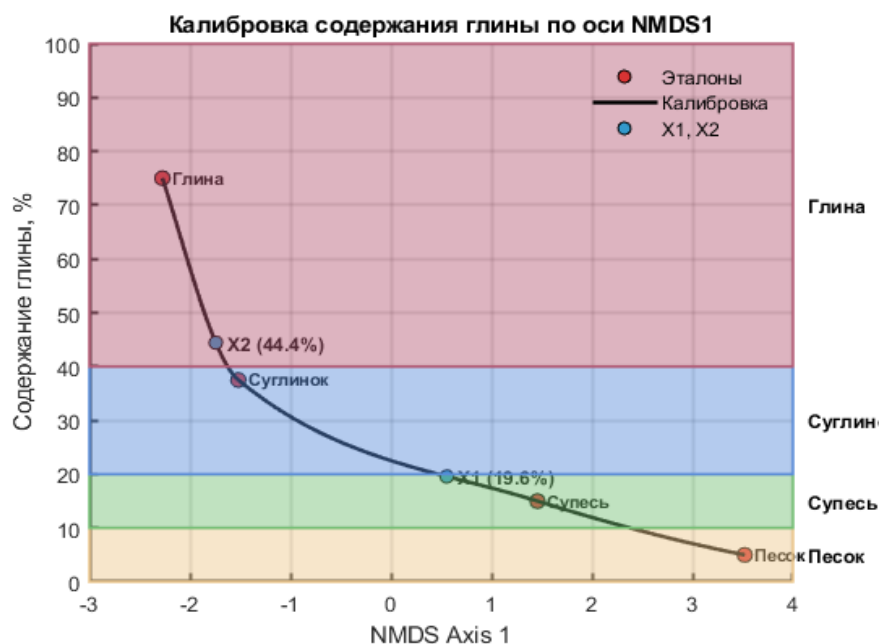


Рисунок 5. – Эмпирическая калибровка первой оси NMDS (NMDS Axis 1) по содержанию физической глины на основе эталонных текстурных классов (глина, суглинок, супесь, песок)

R^2) достигает 99,8%. Основной вклад в дифференциацию объектов вносит первая ось (NMDS Axis 1), описывающая 91,8% вариации данных, в то время как на вторую ось приходится лишь 10,2%.

Первая ось (NMDS Axis 1) выступает в роли интегрального показателя «электрофизической плотности» почв. Противоположная направленность EC25 и Φ_{1k} подтверждают, что для данного ряда почв увеличение содержания тонкодисперсных фракций ведет к росту активной проводимости при одновременном снижении фазовой задержки сигнала.

Вторая ось (NMDS Axis 2), несмотря на меньшую долю объясненной дисперсии (10,2%), играет ключевую роль в дифференциации почвенных разностей внутри укрупненных групп.

Таким образом, первая ось разделяет почвы по фундаментальному признаку «легкие–тяжелые», вторая ось (NMDS Axis 2) детализирует эту классификацию, отделяя чистые литологические разности (песок, глина) от смешанных типов (супесь, суглинок). Это делает двумерное пространство NMDS эффективным инструментом для точной идентификации гранулометрического типа почвы по ее электрофизическому отклику.

Показана монотонная калибровоч-

ная зависимость (рchip-интерполяция), отражающая строгий порядок эталонов при нелинейной форме связи (рисунок 5). Цветные фоновые области соответствуют диапазонам текстурных типов по классификации Качинского (0–100% физической глины) и показаны как интерпретационный фон, экстраполированный на весь диапазон оси NMDS Axis 1. Полученные значения содержания глины представляют собой эмпирические оценки, валидные в пределах данного набора данных для почв с промывным типом увлажнения.

Ультразвук разрушает почвенные агрегаты, которые в обычном состоянии удерживаются вместе органическим «клеем» или силами электростатического притяжения, что высвобождает скрытую проводящую поверхность глинистых минералов.

Применение ультразвуковой дезагрегации (5–15 мин) является необходимым условием для получения объективных значений электрофизических индексов. Ультразвуковая кавитация разрушает водостойчивые агрегаты [14], переводя систему в состояние максимальной дисперсности. Это приводит к экспоненциальному росту суммарной площади поверхности двойного электрического слоя (ДЭС), что фиксируется по увеличению индекса коллоидности (CI) и углублению фазового

сдвига Φ_{10k} [16]. Сонификация позволяет нивелировать влияние структурных факторов почвы, фокусируя измерение на минералогической активности и гранулометрии первичных частиц [45–46].

После обработки ультразвуком наблюдается некоторый рост электропроводности (σ). Ультразвук высвобождает ионы, замкнутые внутри почвенных агрегатов, в свободный раствор. Значение σ становится выше и объективнее отражает реальный запас минеральных солей в почве.

После ультразвука происходит стабилизация фазового угла (Φ) за счет создания стойкой мелкодисперсной взвеси, по-

верхность взаимодействия частиц с током становится максимальной. Фазовый угол на 10 кГц станет более выраженным и стабильным.

Наблюдается увеличение k_{fd} вследствие разрушения агрегатов, что увеличивает суммарную емкость двойного электрического слоя (ДЭС). Разница между 1 кГц и 100 кГц станет еще более наглядной, что позволит точнее отличить тяжелый суглинок от среднего.

В качестве примера приводим результаты анализа суспензии почвы текстурного типа суглинок после обработки ультразвуком и центрифугирования (таблица 3).

Таблица 3. – Результаты анализа суспензии почвы текстурного типа суглинок после обработки ультразвуком и центрифугирования

Параметр (Показатель)	Обозначение	Суспензия	Центрифугат	Вклад твердой фазы (Δ)
Сопротивление 1 кГц, Ом	R_{1k}	522	516	-6
Сопротивление 10 кГц, Ом	R_{10k}	474	481	+7
Сопротивление 100 кГц, Ом	R_{100k}	441	454	+13
Коэффициент дисперсии, %	k_{fd}	18,37	13,66	4,71
Индекс коллоидности, %	CI	7,48	5,95	1,53
Коэффициент активности	K_{ac}	0,407	0,435	—
Фазовый угол (10 кГц), °	Φ_{10k}	-3,38	-2,74	0,64
Расчетное содержание глины, %	C_{clay}	22,2	—	—

Коэффициент дисперсии (k_{fd}) в исследуемом образце (18,37%) свидетельствует о среднесуглинистом составе, при этом 25% от общей интенсивности дисперсии обусловлено непосредственно твердой фазой. Снижение k_{fd} после центрифугирования до 13,66% подтверждает эффективность использования данного параметра для дифференциации вклада почвенного раствора и коллоидных частиц в общую электропроводность системы. Согласно суррогатной модели ($C_{clay} = 1,15 \cdot k_{fd}^{1,02}$), расчетное содержание физической глины составляет примерно 22,2%.

Собственная дисперсия частиц составляет (4,71%). Это «чистый» показатель глинистости. Разница между суспензией и раствором показывает, какую долю дисперсии создают именно твердые коллоиды. Фоновая дисперсия раствора составляет (13,66%). Высокая дисперсия в прозрачном центрифугате указывает на наличие в растворе высокомолекулярных соединений (гуминовых и фульвокислот) или других коллоидов, которые не осели при центрифугировании. Если k_{fd} раство-

ра почти равен k_{fd} суспензии, это означает, что почва структурно деградирована, и ее свойства определяются только химией раствора. В этом случае частицы вносят весомый вклад, что говорит о структурной целостности почвенного поглощающего комплекса.

Сравнение «до» и «после» центрифугирования показывает вклад твердых частиц в электрофизический отклик. Сопротивление центрифугата ($R_{100} = 454$) выше, чем у суспензии (441). Это подтверждает, что в суспензии частицы глины создают дополнительные пути проводимости (поверхностная проводимость ДЭС). После удаления частиц наблюдается спад дисперсии (k_{fd}) с 18,37% до 13,66%. Оставшиеся 13,66% в центрифугате обусловлены не глиной, а ионной поляризацией растворенных органических веществ и специфической измерительной ячейки.

Разница в фазовом угле ($\Delta\Phi = 0,64^\circ$) и индексе коллоидности ($\Delta CI = 1,53\%$) – это истинная коллоидность почвенных коллоидов. Значение $K_{ac} = 0,41$ говорит о том, что коллоидный комплекс имеет преиму-

щественно минеральный характер (глинистые минералы гидрослюдистого типа) с умеренным содержанием гумуса.

Сравнительный анализ суспензии и центрифугата показал, что твердая фаза вносит вклад в общую дисперсию в размере 4,71%. Значение коэффициента удельной активности $K_{ac} = 0,41$ в сочетании с фазовым углом $-3,38^\circ$ позволяет идентифицировать образец как среднесуглинистую почву с активным минеральным поглощающим комплексом. Низкие значения УЭП (1020 мкСм/см) свидетельствуют о благоприятном солевом режиме для выра-

щивания лекарственных культур.

Диаграмма (рисунок 6) демонстрирует вклад твердой фазы в общую поляризацию образца. Значительное снижение коэффициента частотной дисперсии (k_{fd}) и индекса коллоидности (CI) после удаления частиц подтверждает, что именно коллоиды являются основным источником частотной зависимости. Изменение фазового угла ϕ_{10k} отражает переход от комплексного отклика системы «частица-раствор» к отклику чистого электролита. Значение K_{ac} указывает на умеренную активность коллоидного комплекса.

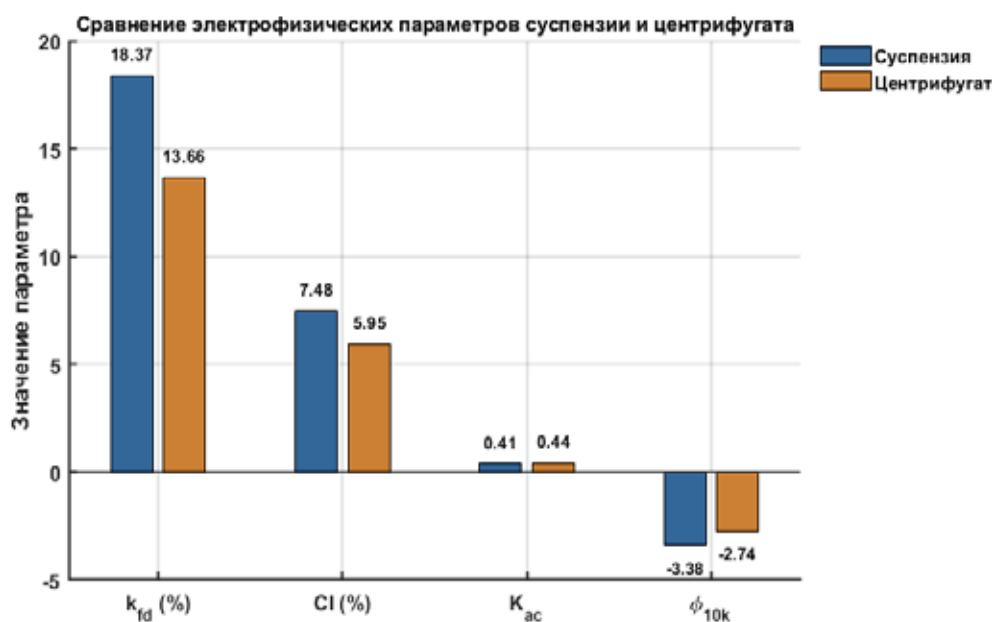


Рисунок 6. – Сравнение ключевых электрофизических параметров для почвенной суспензии и центрифугата

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

R_{1k} , R_{10k} , R_{100k} – активное электрическое сопротивление, измеренное на частотах 1, 10 и 100 кГц соответственно [Ом].

X_{1k} , X_{10k} , X_{100k} – реактивное электрическое сопротивление, измеренное на частотах 1, 10 и 100 кГц соответственно [Ом].

ϕ_{10k} (Phase Angle) – фазовый угол (сдвиг фаз) на частоте 10 кГц [град.].

k_{fd} (Frequency Dispersion Coefficient) – коэффициент частотной дисперсии (1–100 кГц) [%]. Индикатор количественного содержания физической глины.

CI (Colloidal Index) – индекс коллоидности (10–100 кГц) [%]. Индикатор качественной активности коллоидного комплекса.

K_{ac} (Specific Activity Coefficient) – коэффициент удельной активности коллоидов. Рассчитывается как отношение CI / k_{fd} .

σ_{25} , EC25 (Electrical Conductivity) – удельная электрическая проводимость, приведенная к температуре 25 °С [мкСм/см].

f_t (Temperature Correction Factor) – температурный поправочный коэффициент.

k (Cell Constant) – геометрическая константа измерительной ячейки [см⁻¹].

Аббревиатуры:

ДЭС (EDL) – двойной электрический слой.

УЗ (US) – ультразвук/ультразвуковая обработка.

ЕКО (СЕС) – емкость катионного обмена.

SIP – спектрально-вызванная поляризация (Spectral Induced Polarization).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования была разработана и апробирована методика оперативной диагностики почвенных сред, основанная на частотной дисперсии импеданса в диапазоне 1–100 кГц.

Установлено, что коэффициент частотной дисперсии (k_{fd}) в диапазоне 1–100 кГц является надежным индикатором количественного содержания физической глины (частиц < 0,01 мм).

Фазовый угол (φ_{10k}) позволяет дифференцировать природу коллоидов, разделяя высокоактивные минеральные глины и органическое вещество почвы.

Введенный индекс коллоидности (**CI**) эффективно отражает состояние двойного электрического слоя (ДЭС) и степень дезагрегации образца.

Разработан математический алгоритм обработки данных, который через систему безразмерных индексов (k_{fd} , **CI**, K_{ac}) позволяет интерпретировать электрофизический отклик почвенной системы. Внедренная температурная коррекция (приведение к 25 °С с коэффициентом $\alpha = 0,021$) обеспечивает сопоставимость результатов вне зависимости от полевых условий замера.

Установлена высокая чувствительность параметров дисперсии к гранулометрическому составу. Сравнительный анализ суспензии и раствора над осадком после отстаивания или центрифугирования позволяет количественно выделить вклад твердой фазы коллоидов в общую проводимость, что подтверждает значительную роль поверхностной проводимости двойного электрического слоя (ДЭС) в формировании импеданса.

Предложенная методика может быть эффективно использована в прецизионном возделывании лекарственных растений. Оперативный контроль индекса коллоидности (**CI**) и коэффициента активности (K_{ac}) позволяет прогнозировать пригодность участков для выращивания конкретных видов лекарственного сырья, чувствительных к текстуре почвы и ее ионообменной способности. Использование метода обеспечивает минимизацию

рисков снижения качества сырья из-за несоответствия почвенных условий физиологическим потребностям растений, что открывает новые возможности для стандартизации агротехнических приемов в лекарственном растениеводстве.

Предложенный метод классификации текстуры через электрофизические параметры открывает возможности для автоматизации почвенного мониторинга и создания портативных систем экспресс-анализа, не требующих сложной химической пробоподготовки.

Создание системы новых безразмерных коэффициентов (**CI**, k_{fd} , K_{ac}) позволяет стандартизировать электрофизические измерения, делая их независимыми от геометрии датчика. Это закладывает основу для создания новых классификаторов почв.

Практическая значимость состоит в скорости и экономии. Традиционный гранулометрический анализ (метод пипетки) занимает от 24 до 48 часов. Методика дает результат за 15–20 минут (включая УЗ-подготовку), что дает существенную экономию ресурсов.

Определенный интерес представляет установление связей предложенных коэффициентов с урожайностью, составом и содержанием биологически активных веществ в культивируемых и дикорастущих лекарственных растениях с целью прогноза.

SUMMARY

G. N. Buzuk

MULTIFREQUENCY IMPEDANCE ANALYSIS OF SOILS IN MEDICINAL PLANT CULTIVATION: METHODOLOGY

The article proposes a novel electrophysical technique for assessing granulometric composition and mineralogical activity of soils. The method is based on the analysis of complex impedance of soil extracts in the 1–100 kHz frequency range preceded by ultrasonic sample treatment. Calculated indices are introduced and substantiated: the frequency dispersion coefficient (k_{fd}) reflecting the quantitative content of physical clay, and the colloidal index (CI) characterizing qualitative activity of the electrical double layer (EDL). The authors propose a specific activity coefficient $K_{ac} = CI / k_{fd}$ enabling differentiation between mineral and organic components of the colloidal complex.

Keywords: Soil electrophysics, impedance spectroscopy, electrical double layer (EDL), ultrasonic disaggregation, dispersion coefficient, colloidal index, soil texture, medicinal plants.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шейн, Е. В. Курс физики почв / Е. В. Шейн. – Москва : Изд-во Московского ун-та, 2005. – 432 с.
2. 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. – DOI: 10.1016/j.compag.2004.11.001.
3. Дембовецкий, А. В. Гранулометрический состав почв: история, развитие методов, современное состояние и перспективы / А. В. Дембовецкий, З. Н. Тюгай, Е. В. Шейн // *Вестник Московского университета. Серия 17, Почвоведение*. – 2024. – Т. 79, №. 4. – С. 7–13. – DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-4-7-13.
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. Rhoades, J. D. Soil salinity assessment: methods and interpretation of electrical conductivity measurements / J. D. Rhoades, F. Chanduvi, S. M. Lesch. – Rome : Food & Agriculture Org., 1999. – 152 p.
6. Corwin, D. L. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture / D. L. Corwin, S. M. Lesch // *Computers and electronics in agriculture*. – 2005. – Vol. 46, N 1/3. – P. 11–43. – DOI: 10.1016/j.compag.2004.10.005.
7. Klein, K. A., Santamarina J. C. Electrical conductivity in soils: Underlying phenomena / K. Klein, J. C. Santamarina // *Journal of environmental & engineering geophysics*. – 2003. – Vol. 8, N 4. – P. 263–273. – DOI: 10.4133/JEEG8.4.263.
8. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry / D. A. Robinson, S. B. Jones, J. M. Wraith [et al.] // *Vadose zone journal*. – 2003. – Vol. 2, N 4. – P. 444–475. – DOI: 10.2136/vzj2003.4440.
9. Relationship between spectral induced polarization and hydraulic properties of saturated and unsaturated sandstone / A. Binley, L. D. Slater, M. Fukes, G. Cassiani // *Water resources research*. – 2005. – Vol. 41, N 12. – Art. W12417. – DOI: 10.1029/2005WR004202.
10. Revil, A. Spectral induced polarization of shaly sands: Influence of the electrical double layer / A. Revil // *Water resources research*. – 2012. – Vol. 48, N 2. – Art. W02517. – DOI: 10.1029/2011WR011260.
11. Chelidze, T. L. Electrical spectroscopy of rocks: a review – I. Theoretical models / T. L. Chelidze, Y. Gueguen // *Geophysical journal international*. – 1999. – Vol. 137, N 1. – P. 1–15. – DOI: 10.1046/j.1365-246x.1999.00799.x.
12. A physical model of the low-frequency electrical polarization of clay rocks / P. Cosenza, A. Ghorbani, C. Revil [et al.] // *Journal of geophysical research. Solid earth*. – 2008. – Vol. 113, N B8. – P. 1–9. – DOI: 10.1029/2007JB005539.
13. Garrouch, A. A. The influence of clay content, salinity, stress, and wettability on the dielectric properties of brine-saturated rocks; 10 Hz to 10 MHz / A. A. Garrouch, M. M. Sharma // *Geophysics*. – 1994. – Vol. 59, N 6. – P. 909–917. – DOI: 10.1190/1.1443650.
14. North, P. F. Towards a fixed standard for determining the resistance of soil aggregates to ultrasonic dispersion / P. F. North // *The journal of soil science*. – 1976. – Vol. 27, N 4. – P. 447–459.
15. Шаймухаметов, М. Ш. Опыт использования ультразвука при изучении механизма закрепления органического вещества в почве / М. Ш. Шаймухаметов // *Почвоведение*. – 1974. – № 5. – С. 154–161.
16. A comparison of physical soil organic matter fractionation methods for amended soils / S. Duddigan, L. J. Shaw, P. D. Alexander, C. D. Collins // *Applied and environmental soil science*. – 2019. – Vol. 2019, N 1. – P. 1–12. – DOI: 10.1155/2019/3831241.
17. Field, D. J. A description of aggregate liberation and dispersion in A horizons of Australian Vertisols by ultrasonic agitation / D. J. Field, B. Minasny // *Geoderma*. – 1999. – Vol. 91, N 1/2. – P. 11–26. – DOI: 10.1016/S0016-7061(98)00142-6.
18. Optimization of Secondary Metabolites Production in Medicinal Plants / A. Sharma, P. Krishna, M. Pant, K. Pant // *Tissue Culture Techniques and Medicinal Plants : Enhancing Propagation and Production* / ed.: A. Husen, M. Pant. – Boca Raton : CRC Press, 2024. – P. 275–289.
19. Investigating the effect of different soil textures on morphological characteristics and the amount of essential oil of *Lippia citriodora* medicinal plant / A. M. A. Hakimzadeh, M. Haghjoo, G. Moradi, M. Esfandiari // *Water and soil management and modeling*. – 2022. – DOI: 10.22098/mmws.2022.10991.1095.
20. Vegetation characteristics and response to the soil properties of three medicinal plant communities in Altay Prefecture, China / T. Lang, L. Pan, B. Liu [et al.] // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12, N 24. – Art. 10306. – DOI: 10.3390/su122410306.
21. Mehalaine, S. Plants of the same place do not have the same metabolic pace: soil properties affect differently essential oil yields of plants growing wild in semiarid Mediterranean lands /

- S. Mehalaine, H. Chenchouni // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2020. – Vol. 13. – Art. 1263. – DOI: 10.1007/s12517-020-06219-4.
22. Habberjam, G. M. The use of a square configuration in resistivity prospecting / G. M. Habberjam, G. E. Watkins // *Geophysical prospecting*. – 1967. – Vol. 15, N 3. – P. 445–467. – DOI: 10.1111/j.1365-2478.1967.tb01798.x.
23. 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. – DOI: 10.1111/j.1365-2478.1972.tb00631.x.
24. Wu, Y. C. Proposed new electrolytic conductivity primary standards for KCl solutions / Y. C. Wu, W. F. Koch, K. W. Pratt // *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*. – 1991. – Vol. 96, N 2. – P. 191–201. – DOI: 10.6028/jres.096.008.
25. Бузук, Г. Н. Метод изменяющегося геометрического коэффициента для определения электропроводности/электросопротивления почв / Г. Н. Бузук // *Вестник фармации*. – 2025. – № 2. – С. 41–53. – DOI: 10.52540/2074-9457.2025.2.41.
26. Revil, A. Determination of permeability from spectral induced polarization in granular media / A. Revil, N. Florsch // *Geophysical journal international*. – 2010. – Vol. 181, N 3. – P. 1480–1498. – DOI: 10.1111/j.1365-246X.2010.04573.x.
27. Vanhala, H. Mapping oil-contaminated sand and till with the spectral induced polarization (SIP) method / H. Vanhala // *Geophysical Prospecting*. – 1997. – Vol. 45, N 2. – P. 303–326. – DOI: 10.1046/j.1365-2478.1997.00338.x.
28. Vanhala, H. Laboratory and Field Studies of Environmental and Exploration Applications of the Spectral Induced Polarization (SIP) Method : acad. diss. ... for the degree of Dr. of Technical Sciences / Vanhala Heikki ; Geological Survey of Finland. – Espoo, 1997. – 110 l.
29. Vanhala, H. Laboratory and Field Results of the Use of the Spectral Induced Polarization (SIP) Method for Detecting Organic and Inorganic Contaminants / H. Vanhala // 3rd EEGS Meeting, Aarhus, 9-11 Aug. 1997. – Aarhus, Denmark : European Association of Geoscientists & Engineers, 1997.
30. Dukhin, S. S. Dielectric properties of disperse systems / S. S. Dukhin // *Surface and Colloid Science*. – 1971. – Vol. 3. – P. 83–165.
31. Lesmes, D. P. Dielectric spectroscopy of sedimentary rocks / D. P. Lesmes, K. M. Morgan // *Journal of geophysical research. Solid Earth*. – 2001. – Vol. 106. – P. 13329–13346. – DOI: 10.1029/2000JB900402.
32. Waxman, M. H. Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands / M. H. Waxman, L. J. M. Smits // *SPE journal*. – 1968. – Vol. 8, N 2. – P. 107–122. – DOI: 10.2118/1863-A.
33. Liu, F. Electrical Conductivity in Soils: A Review / F. Liu. – 2015. – 31 p.
34. Using the Spectral Induced Polarization technique for estimating soil texture and moisture content / M. Moawad, M. Gomaa, A. M. Elshenawy [et al.] // *Advances in Basic and Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 4, N 1. – P. 1–6. – DOI: 10.21608/abas.2025.341306.1056.
35. Al-Moadhen, M. M. Electrical conductivity of sand-clay mixtures / M. M. Al-Moadhen, B. G. Clarke, X. Chen // *Proceedings of the ICE – Geotechnical Engineering*. – 2022. – Vol. 175, N 6. – P. 503–516.
36. Spectral induced polarization of clay-sand mixtures: Experiments and modeling / G. Okay, P. Leroy, A. Ghorbani [et al.] // *Geophysics*. – 2014. – Vol. 79, N 6. – P. E353–E75. – DOI: 10.1190/geo2013-0347.1.
37. Chelidze, T. L. Electrical spectroscopy of porous rocks: II. Experimental results and interpretation / T. L. Chelidze, Y. Gueguen, C. Ruffet // *Geophysical journal International*. – 1999. – Vol. 137, N 1. – P. 16–34. – DOI: 10.1046/j.1365-246x.1999.00800.x.
38. Börner, F. D. Estimation of hydraulic conductivity from complex electrical measurements / F. D. Börner // *SGA-Spektrum*. – 1995. – N 1. – P. 13–28.
39. Use of airborne radar images and machine learning algorithms to map soil clay, silt, and sand contents in remote areas under the Amazon rainforest / A. C. S. Ferreira, M. B. Ceddia, E. M. Costa [et al.] // *Remote sensing*. – 2022. – Vol. 14, N 22. – Art. 5711. – DOI: 10.3390/rs14225711.
40. Microwave dielectric behavior of wet soil – Part II: Dielectric mixing models / M. C. Dobson, F. T. Ulaby, M. T. Hallikainen, M. A. El-rayes // *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*. – 1985. – Vol. GE-23, N 1. – P. 35–46. – DOI: 10.1109/TGRS.1985.289498.
41. Slater, L. D. IP interpretation in environmental investigations / L. D. Slater, D. P. Lesmes // *Geophysics*. – 2002. – Vol. 67, N 1. – P. 77–88. – DOI: 10.1190/1.1451353.
42. Slater, L. Electrical-hydraulic relationships observed for unconsolidated sediments / L. Slater, D. P. Lesmes // *Water resources research*. – 2002. – Vol. 38, N 10. – DOI: 10.1029/2001WR001075.
43. Complex conductivity of soils / A. Revil, A. Coperey, Z. Shao [et al.] // *Water resources research*. – 2017. – Vol. 53, N 8. – P. 7121–7147. – DOI: 10.1002/2017WR020655.
44. Electrical conductivity, pH, organic matter and texture of selected soils around the Qatar university campus / S. I. Alam, H. Hammada, F. Khan [et al.] // *Research in Agriculture Livestock and Fisheries*. – 2020. – Vol. 7, N 3. – P. 403–409. – DOI: 10.3329/ralf.v7i3.51359.
45. Mayer, L. M. Relationships between whole sediment surface area and organic matter / L. M. Mayer // *Chemical geology*. – 1994. –

Vol. 114, N 3/4. – P. 347–363. – DOI: 10.1016/0009-2541(94)90063-9.

46. Revil, A. Spectral induced polarization porosimetry / A. Revil, N. Florsch, C. Camerlynck // Geophysical journal international. – 2014. – Vol. 198, N 2. – P. 1016–1033. – DOI: 10.1093/gji/ggu180.

REFERENCES

1. Shein EV. Soil Physics Course. Moskva, RF: Izd-vo Moskovskogo un-ta; 2005. 432 s. (In Russ.)

2. 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

3. Dembovetskii AV, Tiugai ZN, Shein EV. Granulometric composition of soils: history, development of methods, current state and prospects. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17, Pochvovedenie.* 2024;79(4):7–13. doi: 10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-4-7-13. (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. Rhoades JD, Chanduvi F, Lesch SM. Soil salinity assessment: methods and interpretation of electrical conductivity measurements. Rome, Italy: Food & Agriculture Org.; 1999. 152 p

6. Corwin DL, Lesch SM. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Comput Electron Agric.* 2005;46(1-3):11–43. doi: 10.1016/j.compag.2004.10.005

7. Klein KA, Santamarina JC. Electrical conductivity in soils: Underlying phenomena. *J Environ Eng Geophys.* 2003;8(4):263–73. doi: 10.4133/JEEG8.4.263

8. Robinson DA, Jones SB, Wraith JM, Or D, Friedman SP. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry. *Vadose Zone J.* 2003;2(4):444–75. doi: 10.2136/vzj2003.4440

9. Binley A, Slater LD, Fukes M, Cassiani G. Relationship between spectral induced polarization and hydraulic properties of saturated and unsaturated sandstone. *Water Resour Res.* 2005;41(12 Art W12417). doi: 10.1029/2005WR004202

10. Revil A. Spectral induced polarization of shaly sands: Influence of the electrical double layer. *Water Resour Res.* 2012;48(2 Art W02517). doi: 10.1029/2011WR011260

11. Chelidze TL, Gueguen Y. Electrical spectroscopy of rocks: a review – I. Theoretical models. *Geophys J Int.* 1999;137(1):1–15. doi: 10.1046/j.1365-246x.1999.00799.x

12. Cosenza P, Ghorbani A, Revil C, Zamora M, Schmutz M, Jougnot D, et al. A physical model of the low-frequency electrical polarization of clay rocks. *Journal of geophysical re-*

search. Solid earth. 2008;113(B8):1–9. doi: 10.1029/2007JB005539

13. Garrouch AA, Sharma MM. The influence of clay content, salinity, stress, and wettability on the dielectric properties of brine-saturated rocks; 10 Hz to 10 MHz. *Geophysics.* 1994;59(6):909–17. doi: 10.1190/1.1443650

14. North PF. Towards a fixed standard for determining the resistance of soil aggregates to ultrasonic dispersion. *The Journal of Soil Science.* 1976;27(4):447–59

15. Shaimukhametov MSh. Experience of using ultrasound in studying the mechanism of fixation of organic matter in soil. *Pochvovedenie.* 1974;(5):154–61. (In Russ.)

16. Duddigan S, Shaw LJ, Alexander PD, Collins CD. A comparison of physical soil organic matter fractionation methods for amended soils. *Appl Environ Soil Sci.* 2019;2019(1):1–12. doi: 10.1155/2019/3831241

17. Field DJ, Minasny B. A description of aggregate liberation and dispersion in A horizons of Australian Vertisols by ultrasonic agitation. *Geoderma.* 1999;91(1-2):11–26. doi: 10.1016/S0016-7061(98)00142-6

18. Sharma A, Krishna P, Pant M, Pant K. Optimization of Secondary Metabolites Production in Medicinal Plants. In: Husen A, Pant M, editors. *Tissue Culture Techniques and Medicinal Plants: Enhancing Propagation and Production.* Boca Raton, USA: CRC Press; 2024. p. 275–89

19. Hakimzadeh AMA, Haghjoo M, Moradi G, Esfandiari M. Investigating the effect of different soil textures on morphological characteristics and the amount of essential oil of *Lippia citriodora* medicinal plant. *Water and Soil Management and Modeling.* 2022. doi: 10.22098/mmws.2022.10991.1095

20. Lang T, Pan L, Liu B, Guo T, Hou X. Vegetation characteristics and response to the soil properties of three medicinal plant communities in Altay Prefecture, China. *Sustainability.* 2020;12(24 Art 10306). doi: 10.3390/su122410306

21. Mehalaine S, Chenchouni H. Plants of the same place do not have the same metabolic pace: soil properties affect differently essential oil yields of plants growing wild in semiarid Mediterranean lands. *Arabian Journal of Geosciences.* 2020;13(Art 1263). doi: 10.1007/s12517-020-06219-4

22. 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

23. 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

24. Wu YC, Koch WF, Pratt KW. Proposed new electrolytic conductivity primary standards

- for KCl solutions. *J Res Natl Inst Stand Technol.* 1991;96(2):191–201. doi: 10.6028/jres.096.008
25. Buzuk GN. Variable geometric coefficient method for determining the electrical conductivity/resistivity of soils. *Vestnik farmatsii.* 2025;(2):41–53. doi: 10.52540/2074-9457.2025.2.41. (In Russ.)
26. Revil A, Florsch N. Determination of permeability from spectral induced polarization in glauconitic media. *Geophys J Int.* 2010;181(3):1480–98. doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04573.x
27. Vanhala H. Mapping oil-contaminated sand and till with the spectral induced polarization (SIP) method. *Geophys Prospect.* 1997;45(2):303–26. doi: 10.1046/j.1365-2478.1997.00338.x
28. Vanhala H. Laboratory and Field Studies of Environmental and Exploration Applications of the Spectral Induced Polarization (SIP) Method [academic dissertation]. Espoo, Finland: Geological Survey of Finland; 1997. 110 p
29. Vanhala H. Laboratory and Field Results of the Use of the Spectral Induced Polarization (SIP) Method for Detecting Organic and Inorganic Contaminants. In: 3rd EEGS Meeting, Aarhus, 9-11 Aug 1997. Aarhus, Denmark: European Association of Geoscientists & Engineers; 1997
30. Dukhin SS. Dielectric properties of disperse systems. *Surface and Colloid Science.* 1971;3:83–165
31. Lesmes DP, Morgan KM. Dielectric spectroscopy of sedimentary rocks. *J Geophys Res Solid Earth.* 2001;106:13329–46. doi: 10.1029/2000JB900402
32. Waxman MH, Smits LJM. Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands. *SPE Journal.* 1968;8(2):107–22. doi: 10.2118/1863-A
33. Liu F. Electrical Conductivity in Soils: A Review. 2015. 31 p
34. Moawad M, Gomaa M, Elshenawy AM, Basheer A, Kotb A. Using the Spectral Induced Polarization technique for estimating soil texture and moisture content. *Advances in Basic and Applied Sciences.* 2025;4(1):1–6. doi: 10.21608/abas.2025.341306.1056
35. Al-Moadhen MM, Clarke BG, Chen X. Electrical conductivity of sand-clay mixtures. *Proceedings of the ICE – Geotechnical Engineering.* 2022;175(6):503–16
36. Okay G, Leroy P, Ghorbani A, Cosenza P, Camerlynck C, Cabrera J. Spectral induced polarization of clay-sand mixtures: Experiments and modeling. *Geophysics.* 2014;79(6):E353–E375. doi: 10.1190/geo2013-0347.1
37. Chelidze TL, Gueguen Y, Ruffet C. Electrical spectroscopy of porous rocks: II. Experimental results and interpretation. *Geophys J Int.* 1999;137(1):16–34. doi: 10.1046/j.1365-246x.1999.00800.x
38. Börner FD. Estimation of hydraulic conductivity from complex electrical measurements. *SGA-Spektrum.* 1995;(1):13–28
39. Ferreira ACS, Ceddia MB, Costa EM, Ceddia MB, Nascimento MM, Vasques GM. Use of airborne radar images and machine learning algorithms to map soil clay, silt, and sand contents in remote areas under the Amazon rainforest. *Remote Sens (Basel).* 2022;14(22 Art 5711). doi: 10.3390/rs14225711
40. Dobson MC, Ulaby FT, Hallikainen MT, El-rayes MA. Microwave dielectric behavior of wet soil – Part II: Dielectric mixing models. *IEEE Trans Geosci Remote Sens.* 1985;GE-23(1):35–46. doi: 10.1109/TGRS.1985.289498
41. Slater LD, Lesmes DP. IP interpretation in environmental investigations. *Geophysics.* 2002;67(1):77–88. doi: 10.1190/1.1451353
42. Slater L, Lesmes DP. Electrical-hydraulic relationships observed for unconsolidated sediments. *Water Resour Res.* 2002;38(10). doi: 10.1029/2001WR001075
43. Revil A, Coperey A, Shao Z, Florsch N, Fabricius, Deng Y, et al. Complex conductivity of soils. *Water Resour Res.* 2017;53(8):7121–47. doi: 10.1002/2017WR020655
44. Alam SI, Hammada H, Khan F, Enazi R, Goktepe I. Electrical conductivity, pH, organic matter and texture of selected soils around the Qatar university campus. *Research in Agriculture Livestock and Fisheries.* 2020;7(3):403–9. doi: 10.3329/ralf.v7i3.51359
45. Mayer LM. Relationships between whole sediment surface area and organic matter. *Chem Geol.* 1994;114(3-4):347–63. doi: 10.1016/0009-2541(94)90063-9
46. Revil A, Florsch N, Camerlynck C. Spectral induced polarization porosimetry. *Geophys J Int.* 2014;198(2):1016–33. doi: 10.1093/gji/ggu180

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 22.12.2025 г.