ing? 2025. URL: https://gardenerbible.com/what-is-ec-in-soil-testing/ (date of access: 12.04.2026)

66. Minhal F, Maas A, Hanudin E, Sudira P. Improvement of the chemical properties and buffering capacity of coastal sandy soil as affected by clays and organic by-product application. Soil and Water Research. 2020;15(2):93–100. doi: 10.17221/55/2019-SWR

67. Ogunniyi JE, Olowookere BT, Burns IG, Lillywhite R, Rickson RJ. Effect of Clay and Organic Matter Amendments on Water and Nutrient Retention of Sandy Soils: Column Leaching Experiment. International Journal of Agriculture and Earth Science. 2021;7(2):1–16

68. Musei SK, Kuyah S, Nyawira S, Ng'ang'a SK, Karugu WN, Smucker A, et al. Sandy soil reclamation technologies to improve crop productivity and soil health: a review. Front Soil Sci. 2024;4(Art 1345895). doi: 10.3389/fsoil.2024.1345895

69. Yilmaz I. Relationships between liquid limit, cation exchange capacity, and swelling potentials of clayey soils. Eurasia Soil Sci. 2004;37(5):506–12. doi: 10.1023/B:EURS.0000029883.33707.95

70. Spagnoli G, Shimobe S. A statistical reappraisal of the relationship between liquid limit and specific surface area, cation exchange capacity and activity of clays. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019;11(4). doi: 10.1016/j.jrmge.2018.11.007. URL: https://www.academia.edu/110436538 (date of access: 12.04.2026)

71. Asghari S, Chittoori BCS, Pierce J. Role of cation exchange and specific surface area in microbial calcite precipitation in clayey soils. Discov Soil. 2025;2(1 Art 55). doi: 10.1007/s44378-025-00079-8

72. Rode AA. Water regime of certain important soil types of the USSR. Jerusalem, Israel: IPST; 1970. 48 p

73. Romanova T, Chervan A, Ivakhnenko N. The essence of soil formation in accordance with soil water regime. Journal of Geography and Cartography. 2024;7(2 Art 6271). doi: 10.24294/jgc.v7i2.6271

74. Rode AA. Theory of Soil Moisture. Vol. 1. Jerusalem, Israel: IPST; 1969. 570 p

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 15.04.2026 г.

УДК 631.42:631.43 DOI: https://doi.org/10.52540/2074-9457.2026.2.27

Г. Н. Бузук

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ПОЧВ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО СОЧЕТАНИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

г. Витебск, Республика Беларусь

Предложен метод количественной оценки глинистой фракции почв, основанный на определении удельного объема гидратированной системы v_{lab} после стандартизованной физико-химической обработки (увлажнение, ультразвуковое диспергирование и центрифугирование). Показано, что величина v_{lab} интегрально отражает суммарный вклад структурно-минеральной матрицы и процессов гидратации, связанных с тонкодисперсной фазой почвенного профиля. Для интерпретации результатов введена нормированная шкала на основе экспериментальных эталонов чистого кварцевого песка и региональной эталонной глины. Выведена аналитическая формула расчета эффективной (функциональной) глинистости (Clay %).

Введена нормированная шкала интерпретации результатов на основе экспериментальных эталонов песка и глины, позволяющая рассчитывать эффективную (функциональную) долю глинистой фракции. Параллельно проведен анализ частотно-зависимой электропроводности почвенных суспензий, на основании которого предложена интерпретация параметров GR_{1k} и GR_{100k} как индикаторов потенциальной и актуальной трофности почвы.

Показано, что совместный анализ v_{lab} и кондуктометрических характеристик формирует согласованную систему признаков, отражающих как структурное состояние почвы, так и свойства жидкой фазы. Предложенный подход позволяет выявлять скрытые функциональные особенности почвенной системы и может быть использован для экспресс-диагностики ее агрохимического состояния.

Ключевые слова: трофность почв, набухаемость, удельный объем, электропроводность, органо-минеральный гель, ультразвуковое диспергирование.

ВВЕДЕНИЕ

Плодородие почв определяется динамическим комплексом их физических, химических и биологических свойств, среди которых фундаментальную роль играет тонкодисперсная коллоидная фракция [1–3]. Данная фракция, представленная преимущественно вторичными глинистыми минералами и высокомолекулярными компонентами органического вещества (гумусом), формирует основную долю активной поверхности почвы. Именно эта поверхность ответственна за удержание влаги, структурообразование и аккумуляцию биофильных элементов.

Глина и гумус выступают ключевыми носителями постоянного и переменного отрицательного заряда в почвенной системе, обуславливая ее емкость катионного обмена (CEC – *Cation Exchange Capacity*) [4, 5]. Величина CEC традиционно используется в почвоведении и агрохимии как фундаментальный показатель потенциального плодородия, поскольку она строго характеризует способность почвенного поглощающего комплекса (ППК) прочно удерживать катионы основных элементов питания (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}, NH_4^{+}) и эффективно противостоять их вымыванию нисходящими водными токами [6, 7]. В связи с этим глинисто-гумусовый комплекс можно рассматривать как базовую матрицу потенциальной трофности почв – их внутренней способности накапливать и пролонгированно репродуцировать ресурсы, необходимые для физиологического обеспечения фитоценозов.

Фундаментальным проявлением взаимодействия почвенной коллоидной системы с полярными молекулами воды является набухание [2, 8]. Глинистые минералы, обладая высокой удельной поверхностью и слоистой кристаллической структурой, способны поглощать значительные объемы воды, формируя развитые гидратированные слои и существенно увеличивая макрообъем всей системы [2, 4]. Аналогичную роль выполняет высокодисперсное органическое вещество, существенно повышающее водоудерживающую способность и трансформирующее микроструктуру порового пространства. В результате для почв с развитой коллоидной фазой характерны высокая влагоемкость, оптимизированная микропористость и развитая поверхность гетерогенного взаимодействия. Связь между удержанием воды и набуханием имеет глубокую физико-химическую природу: оба процесса детерминированы силами взаимодействия диполей воды с поверхностью минеральных пакетов, а также осмотическим привлечением растворителя в диффузные слои ионов (ДЭС) [4, 9].

С этой точки зрения удельный объем набухшей (гидратированной) системы v_{lab}, определяемый после стандартизированного ультразвукового диспергирования и последующего центрифугирования, может рассматриваться как интегральная количественная характеристика потенциальной трофности почвы, прямо отражающая функциональную емкость глинисто-гумусового комплекса [9, 10].

В отличие от индекса набухания, показатель удельной электрической проводимости (EC) отражает не потенциальную буферную емкость матрицы, а текущее (актуальное) физико-химическое состояние почвенного раствора. Электропроводность почвы детерминируется мгновенной концентрацией свободных растворенных ионов и представляет собой меру способности жидкой фазы проводить электрический ток [11]. Основной вклад в величину EC вносят подвижные макро- и микроэлементы, находящиеся в растворе: катионы кальция, магния, калия, натрия, а также нитрат-, сульфат- и хлорид-анионы. В современной агрохимической практике EC признан важнейшим оперативным индикатором общей минерализации, уровня засоления и косвенной мерой доступности питательных

веществ [6, 11]. Таким образом, если набухание отражает *потенциальную трофность* (резерв и удержание), то электропроводность характеризует *реализованную (актуальную)* трофность почвы, определяемую содержанием доступных растворенных форм элементов в данный момент времени. Совместный анализ данных параметров позволяет совершить методологический переход от простого констатирующего описания элементного состава к комплексной функциональной оценке почвенной системы. Последнее представляет значительный интерес для лекарственного растениеводства в силу зависимости качества лекарственного сырья от свойств почвы.

Целью настоящей работы является разработка методики количественной оценки потенциальной трофности почв, обусловленной глинисто-гумусовой фазой, на основе индекса набухания, а также детальный анализ ее соотношения с частотно-зависимыми показателями электропроводности как характеристиками актуального состояния почвенной системы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Лабораторный протокол подготовки проб

Разделение на фракции и взятие навески: Воздушно-сухую пробу исходной интактной почвы взвешивали, после чего аккуратно растирали в ступке без разрушения первичных минеральных обломков и просеивали через сито с диаметром отверстий 0,5 мм. Из подготовленного мелкозема брали рабочую навеску массой ≈ 2,00 г. Точная масса сухой навески (m_{soil}) фиксировалась гравиметрически.

Гидратация: К навеске в пластиковой центрифужной пробирке типа Эппендорф объемом 10 мл добавляли точно 8,00 мл деионизированной воды, после чего систему выдерживали в течение 1–2 часов при периодическом перемешивании для достижения термодинамически равновесного набухания и полного смачивания активных поверхностей [2, 8].

Ультразвуковая обработка (УЗ): Пробирки помещали в горизонтальном положении в ультразвуковую ванну мощностью 30 Вт на 15 минут. Данная стадия необходима для стандартизованного диспергирования микроагрегатов и максимально полного высвобождения тонкодисперсной фракции [12].

Центрифугирование: Суспензию после акустического воздействия и интенсивного встряхивания центрифугировали на установке типа 800D при факторе разделения 1000g в течение 15 минут. Такое центробежное ускорение гарантирует удаление свободной гравитационной воды, оставляя в осадке исключительно прочносвязанную капиллярную и адсорбированную влагу [2, 8]. Сочетание УЗ-диспергирования и центрифугирования формирует воспроизводимое состояние гетерогенной системы «дисперсная твердая фаза – удержанная жидкость». Важно отметить, что в процессе УЗ обработки преобладающая часть коллоидной фракции переходит во взвешенное состояние в жидкой фазе, делая центрифугат (фугат) основным носителем электрохимически активных компонентов [12].

Регистрация электрических параметров: Непосредственно в центрифугате измеряли частотно-зависимые компоненты комплексного импеданса – активное сопротивление R и реактивное сопротивление X на фиксированных частотах сигналов 1, 10 и 100 кГц при амплитудном напряжении 0,6 В. Измерения осуществлялись при параллельной схеме замещения с заглублением электродов в жидкую фазу строго на 30 мм [10, 13].

Удаление центрифугата (фугата) и гравиметрия: Центрифугат аккуратно отсасывали с помощью шприца с тонкой иглой. Остаточные капли влаги со стенок пробирки удаляли полосками фильтровальной бумаги, после чего пробирку с влажным плотным осадком взвешивали для определения массы m_{wet}.

Измерительный комплекс и температурная компенсация

Измерения электрофизических параметров выполнялись квадратной четырехэлектродной установкой с фиксированным межэлектродным расстоянием a = 9 мм и LCR-метром FNIRSI LC1020E. Применение четырехэлектродной схемы (подача тока через внешние электроды и регистрация разности потенциалов на внутренних) позволило радикально снизить контактные и поляризационные искажения на интерфейсе «электрод – раствор» [13].

Для исключения влияния геометрии

датчиков традиционно применяется калибровка по стандартным растворам KCl. Однако в данной работе реализован более точный подход с использованием *динамического геометрического коэффициента*, изменяющегося как функция глубины погружения электродов в исследуемый субстрат и частоты сигнала [10, 14].

Изменение глубины погружения квадратного зонда трансформирует пространственную конфигурацию линий электрического поля и объем зоны чувствительности, что напрямую влияет на регистрируемый комплексный импеданс [10, 13–15].

Поскольку удельная электропроводность растворов критически зависит от температуры (возрастая примерно на 2% на каждый градус Цельсия), все зарегистрированные значения активного сопротивления $R(f)$ приводились к стандартизированной температуре T_{ref} = 25 ˚C по классическому линейному уравнению температурной коррекции (формула 1):

$$R_{25}(f) = \frac{R_T(f)}{1 + \alpha(T - 25)}, \quad (1)$$

где $R_T(f)$ – измеренное активное сопротивление при температуре T ˚C;

α – температурный коэффициент проводимости почвенного раствора, принятый для данных систем равным 0,0201 [6, 11].

Расчетные формулы измеряемых и производных величин

На каждой частоте $f \in \{1,10,100\}$ исходно фиксировали раздельно активное R(f) и реактивное X(f), а также комплексное сопротивление Z(f) [13] (формула 2):

$$Z(f) = R(f) + iX(f)$$
$$|Z(f)| = \sqrt{R(f)^2 + X(f)^2}. \quad (2)$$

Гравиметрическая влажность (удержание раствора) (формула 3):

$$w_g = \frac{m_{\text{wet}} - m_{\text{soil}}}{m_{\text{soil}}}. \quad (3)$$

Удельный объем гидратированной (набухшей) системы v_{lab} ($\text{см}^3\ \text{г}^{-1}$) рассчитывали по уравнению 4:

$$v_{lab} = \frac{1}{\rho_s} + \frac{m_{wet} - m_{soil}}{m_{soil} \cdot \rho_{sol}}, \quad (4)$$

где p_s – плотность твердой фазы почвы (при отсутствии прямых пикнометрических измерений принимается равной 2,65 г/см^3);

p_{sol} – плотность удержанной жидкой фазы центрифугата (в приближении принята за 1,00 г/см^3);

m_{soil} – масса абсолютно сухой навески почвы (г);

m_{wet} – масса системы «почва + удержанная жидкость» после центрифугирования (г).

Величина v_{lab} – характеризует суммарный объем, формируемый 1 г сухой почвы после полного насыщения и разрушения агрегатной структуры [12].

Нормированная электропроводность рассчитывалась как отношение удельной электропроводности раствора к массе сухой почвы (формула 5):

$$GR_f = \frac{1}{R(f) \cdot m_{soil}} \cdot 10000, \quad (5)$$

где $R(f)$ – активное сопротивление системы на частоте f (Ом), скорректированное на геометрический коэффициент установки;

m_{soil} – масса сухой почвы (г);

10000 – пересчет S в μS.

Таким образом, параметр GR_f характеризует электрическую проводимость, отнесенную к единице массы почвы ($\mu S \cdot cm^{-1} \cdot г^{-1}$).

Для расчета эффективного содержания глины (*Clay%*) использовалась нормированная шкала, построенная на двух региональных эталонах: чистом карьерном песке (0% глины → v_{sand}) и карьерной глине (100% глины → v_{clay}), обработанных в идентичных условиях (формула 6):

$$Clay\% = 100 \cdot \frac{v_{lab} - v_{sand}}{v_{clay} - v_{sand}}. \quad (6)$$

Данный параметр отражает не гранулометрическое содержание физической глины, а ее *эффективную (функциональную) долю*, определяющую гидрофильный

потенциал и сорбционную активность среды [2, 4].

В состоянии после УЗ-обработки реальный объем системы v_{lab} может опускаться ниже объема чистого песка v_{sand} из-за ультразвуковой переупаковки частиц или специфического гранулометрического состава, в результате чего числитель ($v_{lab} - v_{sand}$) может стать отрицательным. Поэтому в формулу вводится алгоритм расчета логического ограничения (граничное условие) (формула 7):

$$Clay\% = \max\left(0{,}100 \cdot \frac{v_{lab} - v_{sand}}{v_{clay} - v_{sand}}\right). \quad (7)$$

Математическая модель пересчета параметров на интактную пробу

Поскольку скелетная фракция почв (> 0,5 мм) представлена преимущественно слабовыветрелыми первичными минералами и обломками горных пород, ее собственная удельная поверхность, емкость поглощения и способность к набуханию малы по сравнению с мелкоземом [2, 16]. Специфическая электрическая проводимость и индекс набухания крупнозема в условиях принятого гидротермического режима центрифугирования условно принимаются равными нулю.

Разделение интактной пробы почвы на фракции

Воздушно-сухую пробу исходной интактной почвы взвешивали (m_{int}), после чего аккуратно растирали в ступке без разрушения первичных минеральных обломков и просеивали через сито с диаметром отверстий 0,5 мм.

Фракцию, прошедшую через сито (мелкозем), собирали для дальнейшего анализа (m_{mz}).

Фракцию, оставшуюся на сите (крупнозем или скелет почвы, частицы > 0,5 мм), взвешивали отдельно (m_{skel}).

Рассчитывали массовую долю мелкозема в интактной пробе (коэффициент мелкозема K_{mz}) по формуле 8:

$$K_{\text{mz}} = \frac{m_{int} - m_{\text{skel}}}{m_{\text{int}}} = 1 - \omega_{\text{skel}} \quad (8)$$

где ω_{skel} – доля почвенного скелета в единице массы исходной почвы.

Для экстраполяции лабораторных данных, полученных для мелкозема, на реальную интактную почву (до просеивания) формулы расчета индекса набухания (v_{int}), эффективного содержания глины ($Clay_{int}$) и нормированной проводимости ($GR(f)_{int}$) преобразуются с учетом коэффициента K_{mz}.

Индекс набухания интактной почвы (формула 9):

$$\begin{aligned} v_{int} &= K_{mz} \cdot v_{lab} + (1 - K_{mz}) \cdot \rho_s^{-1} = \\ &= K_{mz} \cdot v_{lab} + \rho_s^{-1} - K_{mz} \cdot \rho_s^{-1} = \\ &= \rho_s^{-1} + (v_{lab} - \rho_s^{-1}) \cdot K_{mz}. \end{aligned} \quad (9)$$

Объем, занимаемый твердой фазой единицы массы, остается неизменным (при допущении равенства плотностей ρ_s фракций), но объем удержанной упорядоченной влаги масштабируется пропорционально содержанию активного мелкозема. Формула верна только при строгом допущении, что плотность твердой фазы скелета и мелкозема абсолютно идентичны ρ_s.

Эффективное содержание глины (%) в интактной пробе (формула 10):

$$Clay_{\text{int}} = Clay \cdot K_{\text{mz}}. \quad (10)$$

Нормированная частотная проводимость интактной почвы (формула 11):

$$GR(f)_{int} = GR_f \cdot K_{\text{mz}}. \quad (11)$$

Применение данных формул позволяет нивелировать эффект искусственного завышения потенциального плодородия и гидрофильности, который неизбежно возникает при анализе исключительно тонких фракций скелетных, щебнистых или сильнокаменистых почв. Учет фактора скелетности вносит существенные коррективы в агрохимическую интерпретацию [2, 7]. Образец почвы, идентифицированный по свойствам мелкозема как «высокопотенциальный и буферный» (например, при высоком содержании внутриструктурных солей и глины в тонкой фракции), при пересчете на интактную пробу с высокой долей крупнозема (ω_{skel} > 0,4–0,5) может смещаться в классификационную группу «ограниченно актуаль-

ной трофности». Это обусловлено тем, что каменистый скелет выступает в роли инертного макро-разбавителя, снижающего реальный гидрофильный и удерживающий объем корнеобитаемого горизонта в естественном залегании. Таким образом, введение коэффициента K мелкозем является обязательным условием для перехода от абстрактных лабораторных величин к реальной оценке качества почвенных ресурсов *in situ*.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ экспериментального массива данных

Сводные результаты определений физико-химических и частотно-зависимых кондуктометрических параметров тринадцати исследованных образцов почв в исходном состоянии без УЗ-обработки – **US(-)** и после нее – **US(+)** систематизированы в таблице 1.

Таблица 1. – Физико-химические и кондуктометрические характеристики образцов почв в исходном состоянии и после ультразвукового воздействия

	US(-)					**US(+)**				
name	v_{lab}	m_{soil}	GR_{1k}	GR_{100k}	*Clay %*	v_{lab}	m_{soil}	GR_{1k}	GR_{100k}	*Clay %*
S-26	0,94	2,19	67,29	77,56	31,84	1,23	1,81	38,03	51,35	67,81
S-18	0,83	2,13	21,79	24,42	18,04	0,81	2,13	16,57	19,43	16,29
S-33	0,82	2,08	16,73	18,69	17,00	0,78	2,12	13,84	15,84	11,85
S-16	0,87	2,06	13,81	15,54	22,97	0,82	2,11	11,12	12,73	17,40
S-15	0,88	2,14	15,45	17,46	24,17	0,82	2,14	12,73	14,70	17,20
S-13	0,76	2,09	8,50	9,72	9,59	0,71	2,14	8,40	9,63	3,25
S-12	0,76	2,19	8,63	9,95	9,69	0,75	2,13	8,38	9,58	8,70
S-27	1,07	2,09	53,57	64,96	47,68	0,99	2,13	35,12	49,06	38,48
S-25	0,87	2,11	10,04	11,62	23,29	0,80	2,05	10,43	11,90	14,16
S-24	0,74	2,14	6,54	7,56	7,32	0,69	2,18	6,87	7,77	0,78
S-21	0,81	2,11	12,05	13,93	15,63	0,78	2,09	11,75	13,47	12,57
S-22	0,81	2,00	13,94	15,91	15,47	0,82	2,09	11,74	13,62	16,74
S-23	0,93	2,10	15,20	17,54	30,69	0,98	2,14	17,05	20,45	36,38

Примечания: **US(−)** – исходное (нативное) состояние почвенной суспензии и фугата без применения ультразвуковой обработки; **US(+)** – состояние почвенной системы после стандартизированного воздействия ультразвуком (мощностью 30 Вт в течение 15 минут); name – идентификационное наименование (шифр) исследуемого образца почвы; v_{lab} ($см^3 \cdot г^{-1}$) – удельный объем гидратированной (набухшей) почвенной системы после центрифугирования. Характеризует суммарный объем, формируемый 1 граммом абсолютно сухой почвы вместе с прочноудерживаемой и адсорбированной влагой; m_{soil} (г) – точная масса навески абсолютно сухой почвы, зафиксированная гравиметрически при подготовке пробы; GR_{1k} (мкСм $\cdot$ $см^{-1} \cdot г^{-1}$) – нормированная активная электропроводность почвенной системы (фугата) на низкой частоте измерительного сигнала 1 кГц, приведенная к стандартной температуре 25 °C и отнесенная к единице массы сухой почвы; GR_{100k} (мкСм $\cdot$ $см^{-1} \cdot г^{-1}$) – нормированная активная электропроводность почвенной системы (фугата) на высокой частоте измерительного сигнала 100 кГц, приведенная к стандартной температуре 25 °C и отнесенная к единице массы сухой почвы; Clay % – расчетное эффективное (функциональное) процентное содержание глинистой (органо-минерального геля) фракции в мелкоземе, вычисленное по нормированной шкале относительно региональных эталонов песка и глины.

Частотная дисперсия и эффекты ультразвуковой деструкции

Для всего массива образцов зафиксировано устойчивое и закономерное превышение нормированной проводимости на частоте 100 кГц по сравнению с частотой 1 кГц ($GR_{100k} > GR_{1k}$). Это однозначно подтверждает наличие выраженной частотной дисперсии импеданса в исследуемых гетерогенных средах [13–15]. Физический механизм дисперсии обусловлен тем, что на частоте 1 кГц период полуволны измерительного сигнала сопоставим со временем релаксации ДЭС почвенных частиц. Происходит накопление связанных зарядов на межфазных границах (эффект Максвелла-Вагнера), что порождает высокое поляризационное сопротивление и снижает активную проводимость [17, 18].

На высоких частотах (100 кГц) вклад межфазной поляризации минимален, поэтому величина GR_{100k} преимущественно

отражает объемную ионную проводимость почвенного раствора и пропорциональна удельной электропроводности раствора [12].

Воздействие ультразвука вызывает глубокую трансформацию электрофизического отклика. Переход от состояния **US(-)** к **US(+)** в большинстве образцов сопровождается падением абсолютных величин проводимости, при этом низкочастотная проводимость GR_{100k} падает значительно сильнее, чем высокочастотная GR_{100k}. С акустико-физической точки зрения УЗ-кавитация разрушает природные почвенные агрегаты [12]. В исходном состоянии агрегаты представляют собой совокупность пористых макро- и микроколлекторов с большим количеством внутренних интерфейсных «ловушек» для зарядов, многократно усиливающих низкочастотную поляризацию. Разрушение агрегатной структуры нивелирует эти структурные ловушки, снижая поляризационный вклад в общую проводимость.

Более того, для отдельных образцов (например, S-23) после УЗ-обработки отмечен рост проводимости (GR_{100k} увеличился с 17,54 до 20,45), что указывает на десорбцию ионов с внутренних поверхностей глинистых агрегатов и их переход в раствор.

Важным диагностическим критерием выступает абсолютная частотная дисперсия (формула 12):

$$\Delta GR = GR_{100k} - G_{R1k}. \qquad (12)$$

Экспериментально показано (таблица 1), что несмотря на снижение абсолютных параметров электропроводности, УЗ-обработка приводит к росту дисперсии ΔGR и отношения GR_{100k} / GR_{1k}. Это указывает на то, что акустическое поле селективно подавляет именно низкочастотные структурно-поляризационные процессы, делая частотную шкалу чувствительным индикатором агрегированности почвенной матрицы [12, 13].

Интерпретация графических зависимостей

Анализ экспериментальных трендов, представленных на графиках исходного документа, позволяет установить линейные межкорреляционные связи.

На графиках исходного состояния **US(-)** (рисунок 1) фиксируется средний коэффициент детерминации для низкочастотной проводимости ($R^2 = 0{,}56$ для связи $GR_{1k} - v_{lab}$), тогда как для высокочастотной проводимости связь выражена несколько сильнее ($R^2 = 0{,}58$ для $GR_{100k} - v_{lab}$). Это может указывать на то, что в нативной структурной матрице пространственное распределение ДЭС и емкость поглощения (косвенно выраженная через v_{lab}) взаимосвязаны с поляризационными эффектами.

После проведения ультразвуковой деструкции (рисунок 2) структура связей существенно изменяется. В низкочастотном диапазоне наблюдается наиболее тесная зависимость исследуемых параметров ($R^2 = 0{,}91$), тогда как для высокочастотной проводимости коэффициент детерминации несколько снижается до $R^2 = 0{,}85$, что, однако, существенно выше, чем в варианте без ультразвука.

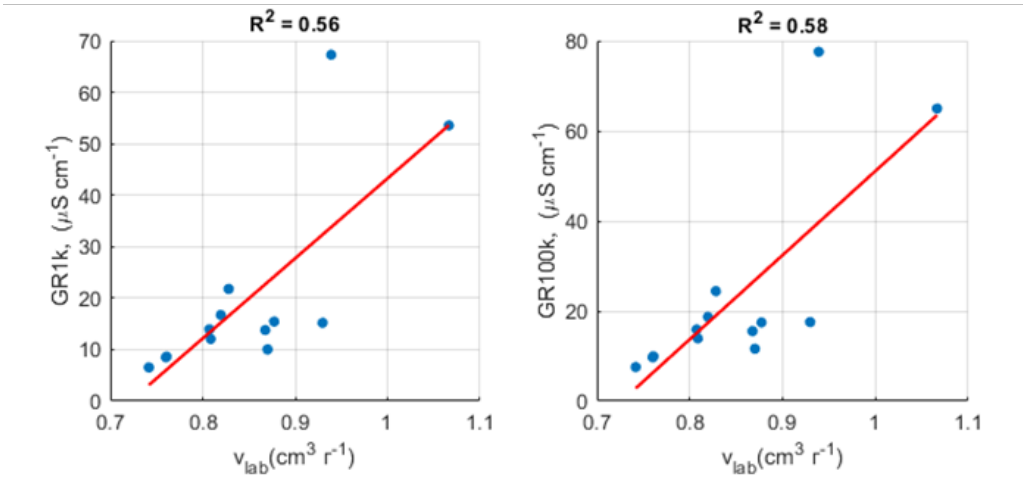


Рисунок 1. – Зависимость нормированной проводимости GR_{1k} (слева) и GR_{100k} (справа) от удельного объема гидратированной системы v_{lab} для исходных образцов -**US(-)**

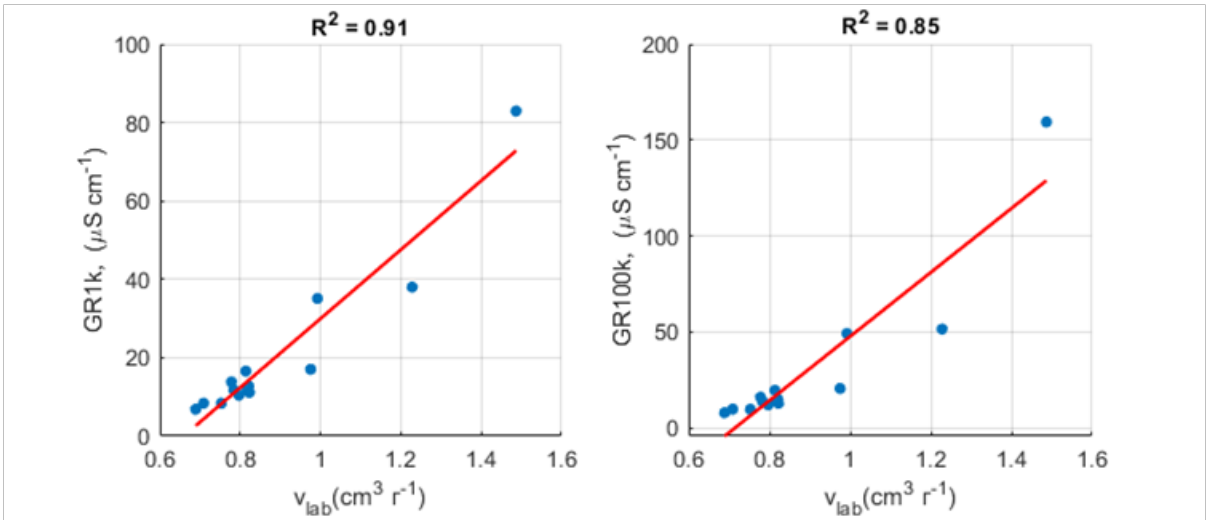


Рисунок 2. – Зависимость нормированной проводимости GR_{1k} (слева) и GR_{100k} (справа) от удельного объема гидратированной системы v_{lab} после УЗ-обработки -**US(+)**

Данное явление объясняется тем, что ультразвуковая обработка разрушает агрегированную структуру почвы, устраняя экранирующее влияние агрегатов и обеспечивая доступ к ранее недоступной («скрытой») активной поверхности глинистых минералов [12].

В результате деструкции вклад поверхностно-поляризационных эффектов уменьшается, а измеряемая проводимость в большей степени начинает отражать свойства жидкой фазы.

На высоких частотах (100 кГц) величина GR_{100k} определяется преимущественно объемом жидкой фазы, удерживаемой в поровом пространстве, что приводит к формированию близкой к линейной зависимости между GR_{100k} и удельным объемом гидратированной системы v_{lab}.

Комплексная диагностика трофности и агрохимического состояния

Интеграция параметров v_{lab}, GR_{1k} и GR_{100k} позволяет сформировать концептуальную модель функциональной диагностики почв, в рамках которой каждый показатель выполняет определённую диагностическую роль:

– v_{lab} – удельный объем гидратированной (набухшей) системы, интегральный показатель гидрофильно-структурного потенциала почвенной матрицы (вместимости) [2];

– GR_{1k} – индикатор потенциальной (обменной, связанной) трофности, ассоциированной с ёмкостью двойного электрического слоя и запасом обменных катионов почвенного поглощающего комплекса [4, 5, 9];

– GR_{100k} – индикатор актуальной (доступной) трофности, отражающий текущую концентрацию элементов питания в почвенном растворе [12, 13];

– частотная дисперсия (ΔGR) – мера структурной организации и степени агрегированности почвенных коллоидов [12, 13].

На основе выявленных закономерностей разработана классификационная схема, позволяющая выделить четыре ключевых диагностических типа почв:

1. Почвы высокого уровня общей трофности (высокопотенциальные, буферные). Характеризуются одновременно высокими значениями v_{lab}, GR_{1k} и GR_{100k} при выраженной частотной дисперсии. Подобные системы обладают развитым почвенным поглощающим комплексом, обеспечивающим сбалансированный запас как прочно удерживаемых обменных катионов, так и мобильных форм элементов питания в почвенном растворе [5, 19]. Примером являются образцы S-26 и S-27.

2. Потенциально богатые высокоструктурированные (агрегированные) почвы. Отличаются высокими значениями v_{lab} и исходно повышенными значениями GR_{1k}, однако демонстрируют существенное снижение кондуктометрических показателей после ультразвукового воздействия, сопровождаемое увеличением частотной дисперсии. Это указывает на

то, что значительный запас элементов питания физически локализован внутри устойчивых микроагрегатов, а их биодоступность ограничена структурным состоянием почвы и динамикой агрегатообразования [12].

3. Почвы с преобладанием актуальной (легкодоступной) трофности. Характеризуются умеренными значениями v_{lab}, относительно низким уровнем GR_{1k} и повышенными значениями GR_{100k}. После ультразвуковой обработки наблюдается стабильность или увеличение проводимости (пример – образец S-23). Такие системы обогащены растворенными солями, однако обладают ограниченной емкостью поглощения и низкой буферностью, что повышает риск быстрого вымывания и истощения элементов питания [6, 11].

4. Почвы низкого уровня трофности (деградированные, песчаные). Идентифицируются по низким значениям всех базовых параметров (v_{lab}, GR_{1k}, GR_{100k}) и слабой или практически отсутствующей частотной зависимости. Для них характерны слабая структурированность, низкое содержание глинисто-гумусовых коллоидов и, как следствие, низкая продуктивность [1–3, 20]. Типичные представители – образцы S-13, S-12 и S-24.

Сохранение практически неизменных значений v_{lab} до и после ультразвукового воздействия (при одновременном существенном изменении проводимости) указывает на то, что акустическая обработка не влияет на термодинамические характеристики жидкой фазы, но существенно изменяет геометрию твердой фазы и конфигурацию поверхностных зарядов [12]. Это позволяет в рамках двухчастотной кондуктометрии раздельно оценивать вклад структурных параметров почвы и свойств почвенного раствора, формируя основу для экспресс-диагностики ее функционального состояния [13, 15].

В ходе проведенных исследований показано, что в килогерцовом диапазоне электропроводность почвенных суспензий демонстрирует частотную дисперсию, проявляющуюся в превышении высокочастотного показателя над низкочастотным ($GR_{100k} > GR_{1k}$). Наблюдаемая дисперсия согласуется с переходом от низкочастотных межфазных поляризационных процессов к режиму, в котором вклад объёмной ионной проводимости раствора становится более значимым. Установлено, что параметры GR_{1k} и GR_{100k} могут использоваться как селективные индикаторы различных аспектов трофности: GR_{1k} – как индикатор потенциальной (обменной/связанной) составляющей, а GR_{100k} – как индикатор актуальной (растворной/доступной) составляющей.

Выявлено, что ультразвуковая обработка сопровождается снижением абсолютных значений электропроводности, что интерпретируется как следствие разрушения агрегатной структуры и ослабления вклада межфазной поляризации (в частности, эффектов типа Максвелла–Вагнера) на внутренних границах раздела фаз. Показано, что деструкция агрегатов сопровождается увеличением частотной дисперсии, что позволяет рассматривать показатель ΔGR как количественный индикатор степени агрегированности и структурной организации дисперсной системы.

Установлена выраженная связь между кондуктометрическими параметрами и эффективной долей глинистой (органо-минеральной) фракции. После ультразвуковой обработки наблюдается усиление корреляционных связей, что согласуется с раскрытием активной поверхности минералов и уменьшением экранирующего влияния органо-минеральных агрегатов.

Подтверждено, что параметр v_{lab} обладает высокой устойчивостью к ультразвуковому воздействию и может рассматриваться как инвариантный показатель вместимости системы, характеризующий потенциальные условия удержания и транспорта жидкой фазы.

Показано, что трехпараметрический подход v_{lab} – GR_{1k} – GR_{100k} обеспечивает возможность экспресс-дифференциации почв по уровню трофности, буферной способности и доступности элементов питания, снижая потребность в трудоемких седиментационных и классических химико-аналитических процедурах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предложена и концептуально обоснована интегральная электрофизическая модель функциональной диагностики почв, основанная на со-

вместном использовании удельного объема гидратированной системы v_{lab} и двухчастотных кондуктометрических параметров GR_{1k} и GR_{100k}, а также их частотной дисперсии ΔGR.

Ключевым элементом методического подхода является стандартизованный протокол подготовки образцов (увлажнение – ультразвуковое диспергирование – центрифугирование), обеспечивающий перевод природно неоднородной почвенной системы в воспроизводимое состояние и позволяющий сопоставлять гидрофизические и электрофизические характеристики различных образцов.

Принципиальной особенностью предложенного подхода является использование ультразвуковой обработки как контролируемого физического воздействия, позволяющего операционально разделить вклад структурной организации твердой фазы и свойств жидкой фазы. В результате достигается возможность интерпретации регистрируемых параметров через физически обоснованные компоненты почвенной системы.

Показано, что параметр v_{lab} отражает гидрофильно-структурный потенциал и вместимость почвенной матрицы, GR_{1k} характеризует вклад связанных и обменных форм, связанных с двойным электрическим слоем, тогда как GR_{100k} преимущественно определяется объемной ионной проводимостью почвенного раствора. Совместное использование этих параметров формирует согласованное пространство признаков, позволяющее дифференцировать почвы по уровню трофности и структурной организации.

Практическое значение разработанного подхода заключается в возможности предварительной экспресс-оценки состояния почв без применения трудоемких седиментационных и классических химико-аналитических методов. Использование нормированной шкалы на основе эталонов обеспечивает переход от относительных измерений к количественным интерпретациям и повышает сопоставимость результатов.

В целом полученные результаты демонстрируют перспективность двухчастотной кондуктометрии в сочетании с параметром v_{lab}. как универсального инструмента функциональной диагностики, обеспечивающего количественную оценку как структурно-минеральной компоненты, так и состояния жидкой фазы почвенной системы.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются существенное расширение базы исследованных почв с целью охвата широкого спектра текстурных, минералогических и генетических типов, что позволит повысить универсальность и воспроизводимость предложенного подхода. Особое внимание должно быть уделено учету минералогического состава глинистой фракции, включая различия между монтмориллонит-, иллит- и каолинит-содержащими системами, поскольку их вклад в процессы гидратации и поверхностного заряда может существенно различаться.

Дополнительно представляет интерес систематическое изучение влияния солевого состава и ионной силы почвенного раствора, включая варьирование концентрации и состава электролитов, что позволит уточнить характер взаимодействия между процессами объемной проводимости и межфазной поляризации. В этом контексте важным является переход от эмпирической интерпретации к построению параметризованных моделей, учитывающих вклад ключевых физико-химических факторов.

Отдельным направлением является разработка калибровочных зависимостей для различных природно-климатических и литологических условий, включая создание региональных и межрегиональных шкал интерпретации параметров v_{lab}, GR_{1k} и GR_{100k}. Это позволит адаптировать метод к практическим задачам агрохимической диагностики и мониторинга почвенного покрова. В более широком плане перспективным представляется интеграция предложенного подхода с геофизическими и гидрологическими методами, а также его использование в задачах пространственного картирования неоднородности почвенных свойств.

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

FUNCTIONAL SOIL DIAGNOSTICS BASED ON INTEGRATED COMBINATION OF HYDROPHYSICAL AND ELECTROPHYSICAL PARAMETERS

A method for quantitative assessment of clay fraction in soils is proposed based on the determination of the specific volume of a hydrated system v_{lab} after standardized physicochemical treatment (wetting, ultrasonic dispersion and centrifugation). It is shown that the swelling index v_{lab} integrally reflects total contribution of the structural–mineral matrix and hydration processes associated with the fine-dispersed fraction of the soil profile. A normalized scale based on experimental reference materials from pure high-silica sand and regional reference clay is introduced to interpret the results. An analytical formula for calculating effective (functional) clayiness is derived *(Clay %)*.

A standardized scale for interpreting results based on experimental reference materials of sand and clay, allowing to calculate effective (functional) part of the clay fraction is introduced. In parallel analysis of frequency-dependent electrical conductivity of soil suspensions is made, based on which interpretation of parameters GR_{1k} and GR_{100k} as indicators of potential and available soil trophicity is proposed.

It is shown that a combined analysis of v_{lab} and conductometric characteristics defines a coordinated system of characteristics reflecting both the structural soil state and the liquid phase properties. The approach proposed allows to reveal hidden functional features of the soil system and can be applied for express diagnostics of its agrochemical state.

Keywords: soil trophicity, swelling capacity, specific volume, electrical conductivity, organo-mineral gel, ultrasonic dispersion.

ЛИТЕРАТУРА

1. Brady, N. C. The Nature and Properties of Soils / N. C. Brady, R. R.Weil. – 15th ed. – New York : Pearson Education, 2016. – 1104 p.

2. Hillel, D. Introduction to Environmental Soil Physics / D. Hillel. – Amsterdam : Academic Press, 2004. – 494 p.

3. Sparks, D. L. Environmental Soil Chemistry / D. L. Sparks. – 2nd ed. – Oxford : Academic Press, 2003. – 352 p.

4. Sparks, D. L. Soil Physical Chemistry / D. L. Sparks. – 2nd ed. – Boca Raton : CRC Press, 1999. – 432 p.

5. Sumner, M. E. Cation exchange capacity and exchange coefficients / M. E. Sumner, W. P. Miller // Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods / ed. D. L. Sparks. – Madison : Soil Science Society of America, 1996. – P. 1201–1229.

6. Rhoades, J. D. The Use of Saline Waters for Crop Production / J. D. Rhoades, A. Kandiah, A. M. Mashali. – Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1992. – 133 p.

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

8. Шеин, Е. В. Курс физики почв / Е. В. Шеин. – Москва : Изд-во Моск. ун-та, 2005. – 432 с.

9. Фридрихсберг, Д. А. Курс коллоидной химии / Д. А. Фридрихсберг. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Ленинград : Химия, 1984. – 368 с.

10. Бузук, Г. Н. Многочастотный импедансный анализ почв: методология / Г. Н. Бузук // Вестник фармации. – 2025. – № 4. – С. 42–58.

11. Поздняков, А. И. Стационарные электрические поля в почвах : монография / А. И. Поздняков, Л. А. Позднякова, А. Д. Позднякова ; под ред. Л. О. Карпачевского. – Москва : КМК Scientific Press, 1996. – 358 с.

12. Study of soil aggregate breakdown dynamics under low dispersive ultrasonic energies with sedimentation and X-ray attenuation / J. Schomakers, F. Zehetner, A. Mentler [et al.] // International agrophysics. – 2015. – Vol. 29, N 4. – P. 501–508. – DOI: 10.1515/intag-2015-0057.

13. Interpretation of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) circuit model for soils / P. J. Han, Y. F. Zhang, F. Y. Chen, X. H. Bai // Journal of Central South University. – 2015. – Vol. 22, N 11. – P. 4318–4328. – DOI: 10.1007/s11771-015-2980-1.

14. 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.

15. Ultra-broad-band electrical spectroscopy of soils and sediments–a combined permittivity and conductivity model / M. Loewer, T. Günther, J. Igel [et al.] // Geophysical journal international. – 2017. – Vol. 210, N 3. – P. 1360–1373. – DOI: 10.1093/gji/ggx242.

16. Качинский, Н. А. Физика почвы / Н. А. Качинский. – Ч. 1. – Москва : Высшая

школа, 1965. – 323 с.

17. Chen, Y. Effects of Maxwell–Wagner polarization on soil complex dielectric permittivity under variable temperature and electrical conductivity / Y. Chen, D. Or // Water resources research. – 2006. – Vol. 42, N 6. – DOI: 10.1029/2005WR004590.

18. Maxwell, J. C. A Treatise on Electricity and Magnetism : in 2 vol. / J. C. Maxwell. – Oxford : Clarendon Press, 1873. – Vol. 1. – 425 p. ; Vol. 2. – 444 p.

19. Тюрин, И. В. Органическое вещество почвы и его роль в плодородии / И. В. Тюрин. – Москва : Наука, 1965. – 320 с.

20. Поздняков, А. И. Электрофизические методы исследования почв / А. И. Поздняков. – Москва : Наука, 1986. – 190 с.

REFERENCES

1. Brady NC, Weil RR. The Nature and Properties of Soils. 15th ed. New York, USA: Pearson Education; 2016. 1104 p

2. Hillel D. Introduction to Environmental Soil Physics. Amsterdam, Netherlands: Academic Press; 2004. 494 p

3. Sparks DL. Environmental Soil Chemistry. 2nd ed. Oxford, UK: Academic Press; 2003. 352 p

4. Sparks DL. Soil Physical Chemistry. 2nd ed. Boca Raton, USA: CRC Press; 1999. 432 p

5. Sumner ME, Miller WP. Cation exchange capacity and exchange coefficients. In: Sparks DL, editor. Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods. Madison, USA: Soil Science Society of America; 1996. p. 1201–29

6. Rhoades JD, Kandiah A, Mashali AM. The Use of Saline Waters for Crop Production. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 1992. 133 p

7. Vadiunina AF, Korchagina ZA. Methods for studying the physical properties of soils. Moskva, RF: Agropromizdat; 1986. 416 s. (In Russ.)

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

9. Fridrikhsberg DA. Colloid Chemistry Course. Izd 2-e, pererab i dop. Leningrad, RF: Khimiia; 1984. 368 s. (In Russ.)

10. Buzuk GN. Multifrequency impedance analysis of soils: methodology. Vestnik farmatsii. 2025;(4):42–58. (In Russ.)

11. Pozdniakov AI, Pozdniakova LA, Pozdniakova AD. Stationary electric fields in soils: monografiia. Karpachevskii LO, redactor. Moskva, RF: KMK Scientific Press; 1996. 358 s. (In Russ.)

12. Schomakers J, Zehetner F, Mentler A, Ottner F, Mayer H. Study of soil aggregate breakdown dynamics under low dispersive ultrasonic energies with sedimentation and X-ray attenuation. Int Agrophys. 2015;29(4):501–8. doi: 10.1515/intag-2015-0057

13. Han PJ, Zhang YF, Chen FY, Bai XH. Interpretation of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) circuit model for soils. J Cent South Univ. 2015;22(11):4318–28. doi: 10.1007/s11771-015-2980-1

14. Buzuk GN. The method of varying geometric coefficient for determining the electrical conductivity/resistivity of soils. Vestnik farmatsii. 2025;(2):41–53. doi: 10.52540/2074-9457.2025.2.41. (In Russ.)

15. Loewer M, Günther T, Igel J, Kruschwitz S, Martin T, Wagner N. Ultra-broad-band electrical spectroscopy of soils and sediments – a combined permittivity and conductivity model. Geophys J Int. 2017;210(3):1360–73. doi: 10.1093/gji/ggx242

16. Kachinskii NA. Soil physics. Ch. 1. Moskva, RF: Vysshaia shkola; 1965. 323 s. (In Russ.)

17. Chen Y, Or D. Effects of Maxwell–Wagner polarization on soil complex dielectric permittivity under variable temperature and electrical conductivity. Water Resour Res. 2006;42(6). doi: 10.1029/2005WR004590

18. Maxwell JC. A Treatise on Electricity and Magnetism : in 2 vol. Oxford, UK: Clarendon Press; 1873. Vol. 1. 425 p. ; Vol. 2. 444 p

19. Tiurin IV. Soil organic matter and its role in fertility. Moskva, RF: Nauka; 1965. 320 s. (In Russ.)

20. Pozdniakov AI. Electrophysical methods of soil research. Moskva, RF: Nauka; 1986. 190 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 26.05.2026 г.