

УДК 631.437.31:631.44.061

СВЯЗЬ ПЛОТНОСТИ ПОЧВЫ С ЕЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬЮ, ВОЗМОЖНОСТИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Ч. Г. ГЮЛАЛИЕВ¹⁾

¹⁾Институт географии Министерства науки и образования Азербайджанской Республики,
пр. Гусейна Джавида, 81, AZ1141, г. Баку, Азербайджан

Рассматривается взаимосвязь плотности почвы и ее электропроводности как инструмента экологической диагностики структурных изменений. Почва является ключевым компонентом экосистем, а ее функциональность во многом определяется структурой, плотностью и влажностью. Интенсивное использование тяжелой сельскохозяйственной техники приводит к уплотнению, снижению пористости и деградации структуры, что отражается на инфильтрации воды, газообмене и биологической активности. Экспериментальные исследования проведены на трех типах почв Кура-Араксинской низменности: лугово-серых, серо-луговых и аллювиально-луговых. Измерения электропроводности выполнялись в диапазоне частот 0,4–10 МГц при различных уровнях влажности (10–24 %) и плотности (1,1–1,4 г/см³). Результаты показали сильную линейную зависимость электропроводности от плотности, усиливающуюся при увеличении влажности. Наибольшие значения электропроводности зарегистрированы у аллювиально-луговых почв, а наибольшая чувствительность к уплотнению – у серо-луговых. Корреляционный анализ выявил сильные положительные связи ($r = 0,95–0,99$), а регрессионные модели имели коэффициент детерминации $R^2 > 0,90$. Таким образом, удельная электропроводность может рассматриваться как интегральный индикатор состояния почвы, отражающий совокупное влияние физических и гидротермических параметров. Использование этого показателя открывает возможности для ранней диагностики деградации, оптимизации агротехнических приемов и построения систем экологического мониторинга. Методика может быть интегрирована в цифровое земледелие и применена в межрегиональных исследованиях, обеспечивая надежную базу для разработки стратегий устойчивого использования земельных ресурсов.

Ключевые слова: плотность почвы; электропроводность; экологическая диагностика; уплотнение; пористость; деградация почвы; мониторинг; агроэкосистемы.

RELATIONSHIP BETWEEN SOIL BULK DENSITY, ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND POSSIBILITIES OF ECOLOGICAL DIAGNOSTICS

Ch. G. GULALIYEV^a

^aInstitute of Geography, Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan,
81 Huseyn Javid Avenue, Baku AZ1141, Azerbaijan

The article explores the relationship between soil bulk density and electrical conductivity as a tool for ecological diagnostics of structural changes. Soil is a key ecosystem component whose functionality largely depends on its structure, density, and moisture content. Intensive use of heavy agricultural machinery leads to soil compaction, reduced porosity, and structural degradation, which in turn affects water infiltration, gas exchange, and biological activity. Experimental studies were carried out on three soil types of the Kura-Araz lowland: meadow-gray, gray-meadow, and alluvial-meadow soils.

Образец цитирования:

Гюлалыев ЧГ. Связь плотности почвы с ее электропроводностью, возможности экологической диагностики. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2025;4:112–119.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-4-112-119>

For citation:

Gulaliyev ChG. Relationship between soil bulk density, electrical conductivity and possibilities of ecological diagnostics. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2025;4:112–119. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-4-112-119>

Автор:

Чингиз Гюлалы оглы Гюлалыев – доктор аграрных наук, доцент; заведующий отделом стационарных исследований.

Author:

Chingiz G. oglu Gulaliyev, doctor of science (agriculture), docent; head of the department of stationary research.
ch_gulaliyev@yahoo.com

Electrical conductivity was measured in the frequency range of 0.4–10 MHz under different moisture levels (10–24 %) and densities (1.1–1.4 g/cm³). The results showed a strong linear relationship between electrical conductivity and soil bulk density, which became more pronounced with increasing moisture content. The highest electrical conductivity values were recorded in alluvial-meadow soils, while the greatest sensitivity to compaction was observed in gray-meadow soils. Correlation analysis revealed strong positive relationships ($r = 0.95\text{--}0.99$), and the regression models demonstrated a coefficient of determination $R^2 > 0.90$. These findings confirm that electrical conductivity can be considered an integral indicator of soil condition, reflecting the combined effects of physical and hydrothermal parameters. The application of electrical conductivity provides opportunities for early diagnosis of soil degradation, optimization of agricultural practices, and the development of ecological monitoring systems. Moreover, this methodology can be integrated into precision agriculture and applied in interregional comparisons, offering a reliable scientific basis for sustainable land-use strategies.

Keywords: soil grounding; electrical conductivity; environmental diagnostics; compaction, porosity; soil degradation; monitoring, agroecosystems.

Введение

Почва – это сложная многофункциональная система, являющаяся основным компонентом биосферы и базисом всех наземных экосистем [1; 2]. Она выполняет функции опорной среды для растений, обеспечивает круговорот воды, углерода и питательных веществ, а также регулирует биогеохимические процессы в агроландшафтах и природных экосистемах [3]. Благодаря высокой пространственной и временной вариабельности физических и химических свойств почва выступает интегральным индикатором изменений окружающей среды. Ее функциональность определяется структурой, плотностью, влажностью, емкостью катионного обмена и термо-гидравлическими параметрами, которые регулируют процессы инфильтрации, испарения, воздухообмена и доступности питательных элементов [4]. Комплексное взаимодействие этих характеристик формирует водный и тепловой режимы почвы, а также биологическую активность микробных сообществ. Нарушение хотя бы одного из этих параметров приводит к снижению экологических функций и агропродуктивности [5]. В условиях глобальных климатических изменений и интенсификации земледелия возрастает риск деградации почв, связанный с уплотнением, эрозией и потерей органического вещества. Следует подчеркнуть, что уплотнение само по себе не вызывает эрозию, однако оба процесса взаимосвязаны: эрозия приводит к ухудшению структуры и увеличению плотности почвы вследствие разрушения агрегатов и потери органического вещества [6]. Эти процессы сопровождаются снижением влагоемкости и нарушением газообмена в почвенном профиле, что ухудшает биологическую активность. Сохранение и мониторинг физических свойств почвы становятся ключевой задачей как для устойчивого сельскохозяйственного производства, так и для обеспечения экосистемных услуг, включая регулирование гидрологического цикла и поддержание биоразнообразия [7]. Современные исследования подтверждают, что физическое состояние почвы является не только агро-техническим, но и экологическим фактором, напрямую влияющим на устойчивость экосистем и климатическую регуляцию [8]. Поэтому комплексное изучение физических параметров почвы – от плотности и пористости до электрофизических характеристик – приобретает фундаментальное значение в научных исследованиях и практическом природопользовании. В последние годы электрофизические методы все шире применяются в агроэкологических исследованиях и мониторинге почв благодаря неинвазивности и высокой оперативности измерений [9; 10]. Эти методы позволяют получать информацию о физических параметрах почвы без разрушения ее структуры, что особенно важно для многократных полевых наблюдений. В частности, электропроводность (ЕС) чувствительна к содержанию влаги, ионов и органического вещества и, следовательно, опосредованно отражает пористость и степень уплотнения [11]. Современные исследования подтверждают прогностическую ценность ЕС для оценки уплотнения, картирования управленческих зон и создания цифровых моделей состояния почвенного покрова [12; 13]. Интенсивное использование тяжелой сельскохозяйственной техники приводит к увеличению плотности почвы, снижению ее пористости и деградации структуры. В субтропических регионах с высокой сезонной контрастностью увлажнения уплотнение особенно критично, поскольку при сочетании высокой летней температуры и временного переувлажнения возрастает риск застоя воды и вторичной засоленности. Одновременно уплотнение влияет на электропроводность, изменяя скорость и интенсивность распространения электромагнитных сигналов. Поэтому изучение взаимосвязи между плотностью почвы и ее электрофизическими характеристиками приобретает как научное, так и практическое значение [5; 9]. Исследования свидетельствуют, что повышение содержания влаги увеличивает диэлектрическую проницаемость. Это позволяет с помощью метода TDR (Time Domain Reflectometry) осуществлять неинвазивные измерения влажности [13]. При уплотнении уменьшается общая пористость, но это не означает полного вытеснения воздуха водой; происходит перераспределение фазового соотношения, изменяющее пути миграции ионов и увеличивающее электропроводность [13]. Таким образом, плотность и влажность

почвы совместно определяют ее электрофизические параметры, причем характер этого влияния зависит от частотного диапазона применяемого сигнала [13]. Эти данные подчеркивают необходимость учета не только плотности, но и гидротермических условий при интерпретации электрофизических измерений. Традиционные микроморфологические и физико-химические методы диагностики почв остаются трудоемкими и ограниченно применимыми в полевых условиях. В этом контексте электропроводность рассматривается как неdestructивный, быстрый и доступный параметр, который позволяет оперативно оценивать структурное состояние почвы и степень ее уплотнения [13]. Особенно перспективным направлением является использование данных электропроводности в системах прецизионного земледелия, где координатные измерения ЕС служат основой для геоинформационных карт внутриполевой изменчивости. На их основе возможно дифференцированное внесение удобрений, регулирование норм полива и оптимизация механической обработки почв. Ранее проведенные исследования, в том числе работы Н. В. Вашукевич, Ч. Г. Гюлалыева и С. Л. Куклиной [13], подтвердили результативность электрофизических методов при диагностике почв в зоне экологического мониторинга озера Байкал. Результаты свидетельствуют, что методика применима как в аграрных, так и в природоохранных исследованиях, а также расширяет ее потенциал как универсального инструмента экологической диагностики. Основная цель настоящей работы заключается в установлении функциональной зависимости между плотностью почвы и ее электропроводностью, а также в оценке возможностей использования этого показателя для экологической диагностики степени уплотнения и практического применения в системах прецизионного земледелия и межрегионального мониторинга почв.

Материалы и методы исследования

Объектами исследования являлись три типа почв Кура-Араксинской низменности – лугово-сероземные, сероземно-луговые и пойменно-луговые, различающиеся по гранулометрическому составу и гидрофизическим свойствам [9]. Гранулометрический анализ показал, что лугово-сероземные почвы относятся к легкосуглинистым, сероземно-луговые – к среднесуглинистым, а пойменно-луговые – к тяжелосуглинистым разностям. Почвообразующими породами служили аллювиальные отложения рек Куры и Аракса, сформированные в условиях периодического увлажнения и длительного орошения. Содержание гумуса в исследованных почвах невысокое и изменяется в пределах 1,2–2,7 %, что характерно для аллювиально-аккумулятивных образований засушливых и субаридных территорий. В отличие от исходного текста, значения, приведенные в табл. 1, согласованы с лабораторными данными и отражают фактическое распределение органического вещества по типам почв.

Таблица 1

Содержание гумуса и гидрологические константы почв, %

Table 1

Humus Content and Hydrological Constants of Soils, %

Название почвы	Глубина см	Гумус	Гигроскопическая влага	Минимальная гигроскопическая влага	Влага завядания	Предельная полевая влагоемкость
Лугово-сероземные	0–25	2,10	3,20	5,22	6,99	29,4
Сероземно-луговые	0–25	2,25	5,05	8,08	10,83	28,0
Пойменно-луговые	0–25	2,17	4,10	7,30	9,78	32,3

Химический состав и ионно-солевой баланс исследованных почв приведены в табл. 2. В ней показаны величины плотного остатка, концентрации основных анионов (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}) и катионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+), а также рассчитано суммарное содержание солей. Полученные данные указывают, что сероземно-луговые почвы обладают наиболее высоким уровнем общей минерализации (11,0 %), связанной с их расположением в нижней части микрорельефа и более интенсивным накоплением легкорастворимых солей. Лугово-сероземные и пойменно-луговые почвы характеризуются меньшей минерализацией (4,9 и 8,4 % соответственно), что отражает различия в степени выщелачивания и гидрологическом режиме территории. Они демонстрируют специфику ионно-солевого баланса в условиях Кура-Араксинской низменности, где процессы засоления формируются под влиянием высокого испарения, близкого залегания грунтовых вод и многолетнего орошения.

Таблица 2

Анализ полевой водной втяжки почв

Table 2

Analysis of the Field Water Capacity of Soils

Плотный остаток, %	CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻ % / мг-экв.	CL ⁻ % / мг-экв.	SO ₄ ⁻ % / мг-экв.	Сумма анионов, % / мг-экв.	Ca ⁺⁺ % / мг-экв.	Mg ⁺⁺ % / мг-экв.	Сумма катионов, % / мг-экв.	Na, % / мг-экв.	Сумма солей, % / мг-экв.
Лугово-сероземные										
0,175	нет	<u>0,061</u> 1,000	<u>0,035</u> 1,000	<u>0,018</u> 0,370	<u>0,114</u> 2,370	<u>0,050</u> 2,500	нет	<u>0,050</u> 2,500	нет	<u>0,164</u> 4,87
Сероземно-луговые										
0,333	нет	<u>0,031</u> 0,500	<u>0,085</u> 2,420	<u>0,125</u> 2,600	<u>0,241</u> 5,520	<u>0,020</u> 1,00	<u>0,014</u> 1,150	<u>0,034</u> 2,150	<u>0,078</u> 3,370	<u>0,353</u> 11,040
Пойменно-луговые										
0,260	нет	<u>0,049</u> 0,800	<u>0,052</u> 1,460	<u>0,093</u> 1,940	<u>0,194</u> 4,200	<u>0,022</u> 1,100	<u>0,008</u> 0,700	<u>0,030</u> 1,800	<u>0,055</u> 2,400	<u>0,279</u> 8,400

Тестовые участки располагались в пределах сходных природно-климатических условий Кура-Араксинской низменности и использовались в режиме регулируемого орошения под различными сельскохозяйственными культурами – главным образом хлопчатником, зерновыми и люцерной. Эти культуры по-разному воздействуют на структурное состояние и водно-физические свойства почвы, определяя степень ее уплотнения и динамику влагоемкости. Климат исследуемого региона характеризуется мягкой малоснежной зимой и жарким сухим летом; по своим параметрам он близок к климату сухих степей и полупустынь. Среднегодовая сумма суммарной радиации составляет около 133 ккал/см², а радиационный баланс – около +45,9 ккал/см². По многолетним наблюдениям, среднегодовая температура воздуха равна 14,6 °С; средняя температура января (самого холодного месяца) – 1,4 °С, а июля (наиболее теплого месяца) – 27,4 °С. Годовая сумма осадков колеблется в пределах 280–320 мм, причем основное их количество приходится на весенне-осенний периоды. Испаряемость значительно превышает количество осадков (900–1100 мм в год), что обуславливает дефицит влаги и усиливает процессы засоления и уплотнения орошаемых почв.

Средняя относительная влажность воздуха составляет около 77 % и колеблется в течение года в пределах 60–84 %. Среднегодовое количество атмосферных осадков – около 300 мм, при этом основная их часть выпадает весной и осенью, а минимальные значения наблюдаются в июле–августе. Годовая величина испаряемости значительно превышает количество осадков и варьирует от 900 до 1100 мм [6], что подтверждает выраженный дефицит влаги и необходимость орошения. Измерения электрофизических свойств почв проводились по методике, разработанной и апробированной авторами ранее [6]. Эксперименты выполнялись на трех типах почв – лугово-серых, серо-луговых и аллювиально-луговых, различающихся по гранулометрическому составу и влагоемкости. Почвенные образцы отбирались с глубины 0–25 см, затем в лабораторных условиях воздушно высушивались, очищались от грубых механических включений и просеивались через сито с диаметром ячеек 1 мм. Для подготовки модельных образцов применялась специальная методика уплотнения, обеспечивающая воспроизводимое формирование различной плотности при постоянной температуре (21 ± 0,5 °С) и регулируемой влажности. Влажностный режим задавался на пяти уровнях: 10 %, 16, 18, 20 и 24 %. Электрофизические параметры измерялись в диапазоне частот 0,4–10 МГц с использованием приборов типов Л2-7, Р-859 и Р-5016. Каждое измерение выполнялось в трехкратной повторности для обеспечения статистической надежности данных. Дополнительно использовался измеритель полных проводимостей, определяющий активную составляющую в диапазоне от 0,01 до 1000 м·См и реактивную – от ±0,5 до ±500 пФ, работающий на основе моста переменного тока типа Л2-7. Температурные измерения выполнялись с помощью конденсаторного датчика специальной конструкции, снабженного термостатирующим устройством. Термостатирование осуществлялось с применением ультратермостата УТ-15, поддерживающего температуру жидкости с точностью ± 0,5 °С. Встроенные насосы установки обеспечивали постоянную циркуляцию термостатирующей жидкости через соединительные шланги к измерительной ячейке, что гарантировало стабильность температурных условий эксперимента.

Результаты исследования и их обсуждение

С физической точки зрения, удельная электрическая проводимость почвы определяется совокупным влиянием трех основных факторов – влажности, структуры порового пространства и степени уплотнения [9; 13]. При увеличении плотности снижается объем воздушных пор, возрастает доля водонаполненных капилляров, что усиливает перенос электрических зарядов и повышает общую проводимость среды. Механизм передачи электрического тока реализуется за счет ионообменных процессов на поверхности коллоидных частиц и перемещения ионов в жидкой фазе. Глинистые минералы и органическое вещество обладают высокой емкостью катионного обмена и формируют двойной электрический слой, способствующий усилению проводимости [9]. Уплотнение почвы приводит к увеличению контактов между частицами и сокращению пути миграции ионов, что дополнительно интенсифицирует процесс переноса заряда. Электропроводность почвенной массы зависит также от частотного диапазона электромагнитного поля. На низких частотах (0,4–1 МГц) преобладает поляризационная составляющая проводимости, обусловленная перемещением заряженных частиц в поровом растворе. На более высоких частотах (5–10 МГц) возрастает вклад дипольной релаксации молекул воды, что объясняет повышенную чувствительность электропроводности к изменению влажности и структуры порового пространства [9]. Таким образом, увеличение влажности почвы приводит к росту электропроводности в значительно большей степени, чем увеличение плотности. Это связано с тем, что при повышении влажности увеличивается объем электропроводящей жидкости и концентрация ионов в поровом растворе, тогда как уплотнение изменяет лишь геометрию пор и контакт между частицами. В совокупности эти факторы определяют общий уровень электропроводности почвенного образца, которая может рассматриваться как надежный интегральный индикатор структурных изменений и степени уплотнения (рис).

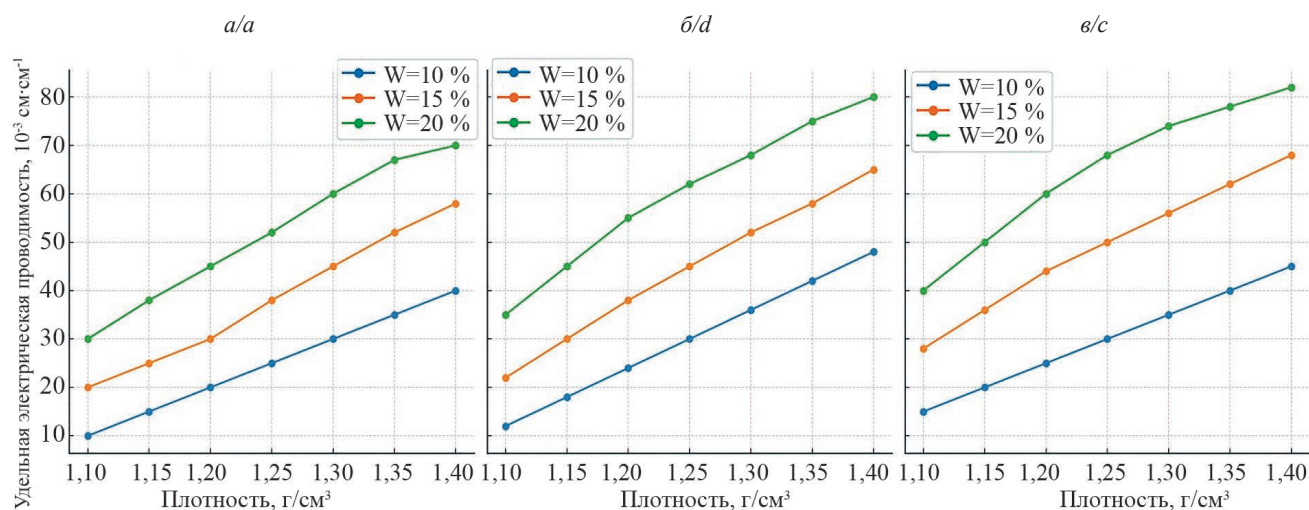


Рис. Зависимость электропроводности почвы от плотности при частотах 0,4 и 10 МГц:
а – лугово-серая почва; б – серо-луговая почва; в – аллювиально-луговая почва

Fig. Dependence of soil electrical conductivity on bulk density at frequencies of 0.4 and 10 MHz:
а – meadow-grey soil; б – grey-meadow soil; в – alluvial-meadow soil

У лугово-серой почвы (рис., а) при влажности 10 % удельная электропроводность изменялась в пределах $10\text{--}30 \cdot 10^{-3} \text{ См} \cdot \text{см}^{-1}$, тогда как при 20 % достигала $60 \cdot 10^{-3} \text{ См} \cdot \text{см}^{-1}$. Таким образом, при удвоении влажности величина электропроводности возрастала в 2–2,5 раза. Это свидетельствует о том, что электропроводность чутко реагирует на изменение воздушно-водного режима в поровом пространстве и может использоваться как индикатор структурных изменений и степени уплотнения почвы. Для серо-луговой почвы (рис., б) характер зависимости аналогичен: увеличение плотности с 1,10 до 1,40 г/см³ сопровождалось ростом электропроводности с 12–15 до $45\text{--}70 \cdot 10^{-3} \text{ См} \cdot \text{см}^{-1}$. При влажности 20 % проводимость была на 15–20 % выше, чем у лугово-серой почвы, что связано с большей долей мелкодисперсных фракций ($<0,01 \text{ мм}$) и повышенной емкостью катионного обмена. Развитая система водных пленок и высокая удельная поверхность частиц способствуют интенсификации переноса ионов в жидкой фазе, что усиливает электропроводность. Таким образом, различия в гранулометрическом составе оказывают прямое влияние на чувствительность электропроводности к уплотнению, что подтверждает ее диагностическую ценность. Аллювиально-луговая почва (рис., в) характеризовалась наибольшими абсолютными значениями электропроводности: при влажности 24 % и плотности 1,4 г/см³ величина превышала $80 \cdot 10^{-3} \text{ См} \cdot \text{см}^{-1}$.

Это объясняется сочетанием высокой влагоемкости, значительной емкости катионного обмена и преобладанием тонкодисперсных частиц в ее составе. Такая структура обеспечивает непрерывность водно-ионной фазы и тем самым максимальную электропроводность. Следовательно, электропроводность может рассматриваться как интегральный индикатор физического состояния аллювиальных почв, отражающий их влажностно-структурное равновесие. Сравнительный анализ трех типов почв свидетельствует, что зависимость электропроводности от плотности имеет линейный характер во всем диапазоне (1,1–1,4 г/см³). При этом чувствительность электропроводности к изменению плотности возрастает с увеличением влажности, особенно в аллювиально-луговых почвах. Данный факт подчеркивает необходимость учета гидротермического режима при интерпретации электрофизических параметров и проведении экологической диагностики состояния почв. Таким образом, удельная электропроводность является надежным индикатором структурного состояния почвы. Совокупное влияние плотности и влажности определяет величину проводимости, а выявленные закономерности имеют важное практическое значение для раннего выявления деградационных процессов и оптимизации агротехнических приемов в системах экологического мониторинга. Сравнительные показатели изменения электропроводности различных типов почв представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнительные показатели изменения электропроводности при различной плотности и влажности

Table 3

Comparative indicators of electrical conductivity changes under different bulk density and moisture conditions

Тип почвы	Диапазон плотности, г/см ³	Влажность, %	Электропроводность, 10 ⁻³ , См·см ⁻¹	Прирост при уплотнении, %
Лугово-серая	1,10 → 1,40	10	10 → 30	+200
		16	20 → 45	+125
		20	30 → 60	+100
Серо-луговая	1,10 → 1,40	10	12 → 32	+167
		16	22 → 47	+114
		20	28 → 70	+150
Аллювиально-луговая	1,10 → 1,40	10	28 → 45	+61
		20	40 → 65	+62
		24	50 → 80	+60

Корреляционный анализ показал наличие сильных положительных связей между плотностью и удельной электропроводностью почвы:

- лугово-серая почва – $r = 0,95–0,97$;
- серо-луговая почва – $r = 0,96–0,98$;
- аллювиально-луговая почва – $r = 0,97–0,99$.

Регрессионный анализ подтвердил, что зависимость электропроводности от плотности описывается линейными уравнениями вида $\sigma = a \cdot \rho + b$, где σ – удельная электрическая проводимость (10⁻³ См·см⁻¹), ρ – плотность почвы (г/см³). Примеры уравнений:

- лугово-серая почва: $w = 10\%$: $\sigma = 14,2\rho - 6,5$; $w = 20\%$: $\sigma = 42,5\rho - 25,8$;
- серо-луговая почва: $w = 10\%$: $\sigma = 18,5\rho - 8,7$; $w = 20\%$: $\sigma = 51,7\rho - 30,4$;
- аллювиально-луговая почва: $w = 10\%$: $\sigma = 20,3\rho + 5,4$; $w = 24\%$: $\sigma = 61,8\rho - 35,2$.

Во всех случаях коэффициент детерминации (R^2) превышает 0,90, что подтверждает высокую достоверность регрессионных моделей. Результаты, представленные на рис. и в табл. 3, демонстрируют, что ключевым фактором, определяющим электропроводность, является степень увлажнения. Повышение влажности вызывает увеличение концентрации ионов в почвенном растворе и рост доли водопроводящей фазы, что оказывает более выраженное влияние на σ , чем механическое уплотнение. Следовательно, электропроводность отражает не только плотностные изменения, но и гидрологическое состояние почвенного профиля. Наибольшая чувствительность электропроводности к уплотнению выявлена у серо-луговой почвы. Это объясняется ее гранулометрическим составом – преобладанием пылеватых и мелкодисперсных фракций (<0,01 мм), которые формируют плотные контакты между частицами и тонкие водные пленки, усиливающие ионный перенос. Аллювиально-луговая почва имеет наибольшие абсолютные значения

электропроводности, что связано с ее высокой влагоемкостью и емкостью катионного обмена, однако относительная чувствительность этой почвы к уплотнению ниже, так как водно-физические связи частично компенсируют эффект плотности. Таким образом, выявленная связь между плотностью и удельной электропроводностью отражает совокупное влияние трех факторов – структуры порового пространства, влажности и ионного состава почвенного раствора. Эта зависимость может служить основой для разработки электрофизических критериев экологической диагностики структурных нарушений и деградиационных процессов в агроэкосистемах. Современные исследования подтверждают прогностическую ценность показателя σ для оценки уплотнения и гидрофизического состояния почв [4; 9; 10]. Методы регистрации электропроводности обладают преимуществами неинвазивности, высокой чувствительности и оперативности, что делает их востребованными в системах цифрового мониторинга и прецизионного земледелия. Использование пространственных карт распределения ЕС позволяет выявлять зоны уплотнения, засоления и переувлажнения, а также проводить их сравнительный анализ при различной степени эродированности и агротехнической нагрузки. Таким образом, метод электропроводности является эффективным инструментом не только для агрофизической оценки уплотнения, но и для комплексной экологической диагностики состояния почвенного покрова. Он может быть применен для межрегиональных сопоставлений и мониторинга деградиационных процессов, что соответствует современным стратегиям устойчивого землепользования в условиях климатических изменений.

Заключение

Проведенные исследования свидетельствуют, что увеличение плотности и влажности почвы сопровождается закономерным ростом ее удельной электропроводности. Эта зависимость обусловлена изменением структуры порового пространства, повышением доли водопроводящей фазы и активизацией ионообменных процессов на поверхности коллоидных частиц.

Установлено, что между плотностью и электропроводностью наблюдаются сильные положительные корреляции ($r = 0,95–0,99$), а характер зависимости описывается линейными уравнениями с коэффициентом детерминации $R^2 > 0,90$. Основным фактором, определяющим уровень электропроводности, является степень увлажнения, которая усиливает ионную проводимость почвенного раствора и повышает чувствительность показателя к уплотнению.

Наибольшая чувствительность электропроводности к изменению плотности зафиксирована у серо-луговой почвы вследствие ее текстурных особенностей и повышенного содержания мелкодисперсных частиц. Аллювиально-луговые почвы демонстрируют максимальные абсолютные значения электропроводности, что связано с их высокой влагоемкостью и емкостью катионного обмена.

Полученные результаты свидетельствуют, что удельная электропроводность может рассматриваться как надежный индикатор физического состояния и степени уплотнения почв. Метод электропроводности является неинвазивным, высокочувствительным и оперативным инструментом для оценки изменений структуры и влажностно-ионного состояния почв. Практическое применение метода целесообразно в системах экологического мониторинга, прецизионного земледелия и при межрегиональных сопоставлениях почв различных природно-климатических зон (например, Южного Кавказа и Восточной Европы).

Результаты исследования могут быть использованы для разработки электрофизических критериев экологической диагностики деградиационных процессов и формирования стратегий устойчивого землепользования в условиях изменяющегося климата.

Библиографические ссылки

1. Brady NC, & Weil RR. The nature and properties of soils (15th edition). Pearson Education [Internet, cited 2016 August 15]. 2016, 912 p. URL: <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/the-nature-and-properties-of-soils/P200000006281/>
2. Keesstra SD, Bouma J, Wallinga J, Tittonell P, Smith P, Cerdà A, Montanarella L. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs). *Soil*. 2016;2(2):111–128. <https://doi.org/10.5194/soil-2-111-2016>.
3. Lal R. Soil Science Beyond Soil. *Soil Science Society of America Journal*. 2020;84(3):656–672. <https://doi.org/10.1002/saj2.20020>.
4. Corwin DL, Lesch SM. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2005;46(1–3):11–43. DOI: 10.1016/j.compag.2004.10.005.
5. Friedman SP. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2005;46(1–3):45–70. DOI: 10.1016/j.compag.2004.11.001.
6. Jacobsen OH, Schjønning P. Electrical conductivity of soils as influenced by soil texture and water content. *European Journal of Soil Science*. 1993;44(4):593–603. DOI: 10.1111/j.1365-2389.1993.tb00476.x.
7. Nadler A, Frenkel H. Determination of soil solution electrical conductivity from bulk soil electrical conductivity measurements by the four-electrode method. *Soil Science Society of America Journal*. 1980;44(6):1216–1221. DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400060015x.

8. Naderi-Boldaji M, Keller T. Degree of soil compactness is highly correlated with soil physical functions. *Soil and Tillage Research*. 2016;159:41–46. DOI: 10.1016/j.still.2016.01.010.
9. Поздняков АИ, Гюлалыев ЧГ. Электрофизические свойства некоторых почв. Москва, Баку: Адильоглы; 2004. 240 с.
10. Rhoades JD, Raats PAC, Prather RJ. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Science Society of America Journal*. 1976;40(5):651–655. DOI: 10.2136/sssaj1976.03615995004000050017x.
11. 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 Journal*. 2003;2(4):444–475. DOI: 10.2136/vzj2003.4440.
12. Zhang X, Hartemink AE. Soil density and electrical conductivity relationships under intensive agriculture. *Geoderma*. 2020;370:114366. DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114366.
13. Вашукевич НВ, Гюлалыев ЧГ, Куклина СЛ. Диагностика почв зоны экологического мониторинга озера Байкал с использованием электрофизического метода. *Аграрный вестник Урала*. 2017;2:14–19.

References

1. Brady NC, & Weil RR. The nature and properties of soils (15th edition). Pearson Education [Internet, cited 2016 August 15]. 2016, 912 p. Available from: <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/the-nature-and-properties-of-soils/P200000006281/>
2. Keesstra SD, Bouma J, Wallinga J, Tittone P, Smith P, Cerdà A, Montanarella L. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs). *Soil*. 2016;2(2):111–128. <https://doi.org/10.5194/soil-2-111-2016>
3. Lal R. Soil Science Beyond Soil. *Soil Science Society of America Journal*. 2020;84(3):656–672. <https://doi.org/10.1002/saj2.20020>
4. Corwin DL, Lesch SM. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2005;46(1–3):11–43. DOI: 10.1016/j.compag.2004.10.005.
5. Friedman SP. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2005;46(1–3):45–70. DOI: 10.1016/j.compag.2004.11.001.
6. Jacobsen OH, Schjønning P. Electrical conductivity of soils as influenced by soil texture and water content. *European Journal of Soil Science*. 1993;44(4):593–603. DOI: 10.1111/j.1365-2389.1993.tb00476.x.
7. Nadler A, Frenkel H. Determination of soil solution electrical conductivity from bulk soil electrical conductivity measurements by the four-electrode method. *Soil Science Society of America Journal*. 1980;44(6):1216–1221. DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400060015x.
8. Naderi-Boldaji M, Keller T. Degree of soil compactness is highly correlated with soil physical functions. *Soil and Tillage Research*. 2016;159:41–46. DOI: 10.1016/j.still.2016.01.010.
9. Pozdnyakov AI, Gyulaliyev CG. *Elektrofizicheskie svoystva nekotorykh pochv* [Electrophysical properties of some soils]. Moscow, Baku: Adilogly; 2004. 240 p. Russian.
10. Rhoades JD, Raats PAC, Prather RJ. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Science Society of America Journal*. 1976;40(5):651–655. DOI: 10.2136/sssaj1976.03615995004000050017x.
11. 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 Journal*. 2003;2(4):444–475. DOI: 10.2136/vzj2003.4440.
12. Zhang X, Hartemink AE. Soil density and electrical conductivity relationships under intensive agriculture. *Geoderma*. 2020;370:114366. DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114366.
13. Vashukevich NV, Gyulaliyev CG, Kuklina SL. *Diagnostika pochv zony ekologicheskogo monitoringa ozera Baikal s ispol'zovaniem elektrofizicheskogo metoda* [Diagnosis of soils in the environmental monitoring zone of Lake Baikal using an electrophysical method]. *Agrarny vestnik Urala* [Agrarian Bulletin of the Urals]. 2017;2:14–19. Russian.

Статья поступила в редколлегию 29.08.2025.
Received by editorial board 29.08.2025.