

ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УДК 631.432+550.837.3:550.822.5

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ КАРТИРОВАНИЯ ПОЧВЕННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ¹

© 2020 г. П. А. Рязанцев^a, *, О. Н. Бахмет^a

^aОтдел комплексных научных исследований КарНЦ РАН, ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, 185910 Россия

*e-mail: chthonian@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.11.2018 г.

После доработки 24.09.2019 г.

Принята к публикации 27.11.2019 г.

Рассмотрен комплекс электрических методов геофизики: сопротивления на постоянном токе и вызванной поляризации — с целью картирования почвенных неоднородностей. В полевых условиях на шунгитовых почвах (Заонежский полуостров, Республика Карелия) при помощи электродной установки А–М–N–В с разносами, равными 15 см, выполнены измерения параметров удельного электрического сопротивления (УЭС) и интенсивности вызванной поляризации (ВП). Для обеспечения достоверности интерпретации измеряли относительную влажность почв и определяли гранулометрический состав. По карте значений УЭС выявили изменчивость влажности почв и в меньшей степени гранулометрического состава. По карте значений ВП определили области вариации вещественного состава, в частности, увеличение содержания шунгитового вещества. Анализ корреляционной зависимости электрофизических параметров от влажности показал для УЭС коэффициент Спирмена $r_s = -0.426$, а для ВП $r_s = 0.076$, что подтверждает гипотезу о разном уровне влияния содержания влаги на такие параметры. В процессе изучения влияния частоты генерируемого электрического сигнала установили увеличение интенсивности ВП в диапазоне частот 0.01–0.1 Гц для почв с повышенным содержанием углерода. При анализе образцов почв выявили, что источником аномалий ВП на исследуемом участке может служить как изменение гранулометрического состава, так и содержание шунгитового вещества. Следовательно, в естественных условиях с помощью данных электрофизических показателей можно определять влажность почв, вариации гранулометрического состава, а также текстурно-структурные особенности.

Ключевые слова: удельное электрическое сопротивление, вызванная поляризация, влажность, гранулометрический состав, шунгитовое вещество

DOI: 10.31857/S0032180X20050123

ВВЕДЕНИЕ

Геофизические методы при решении задач почвоведения и агротехники используются с 70-х гг. прошлого века. На практике наиболее часто применяются электроразведочные методы, изучающие сопротивление и проводимость почв [26, 32], главным образом, для контроля и мониторинга влажности [24, 30, 33, 37]. Следует отметить труды А.И. Позднякова, который внес значительный вклад в развитие этого направления в нашей стране [12–14]. Наряду с доказанной эффективностью электроразведочных методов при изучении влажности почв, задачи по определению с их помощью таких почвенных параметров, как гранулометрический состав или степень загрязнения нефтепродуктами, окончательно не решены. Это обусловлено тем, что при насыщении водой

порового пространства почвы на показатели удельного электрического сопротивления (УЭС) оказывает значительное влияние объемное содержание влаги и ее минерализация. Например, лабораторными экспериментами установлено, что параметры влажности, минерализации и выщелачивания оказывают больший эффект на УЭС по сравнению с типом и гранулометрическим составом почв [41]. Отмечается, что колебания УЭС могут фиксировать изменение почвенных признаков (например, плотности) только при относительно малом водонасыщении [36].

Цель работы — оценить информативные возможности электрометрии при картировании почвенных неоднородностей, а также предлагается использование дополнительного метода — вызванной поляризации (ВП). Как отмечается многими исследователями, этот метод обладает чувствительностью к электрохимическим свойствам грунтов, которые обусловлены химическим со-

¹ Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi 10.31857/S0032180X20050123 для авторизованных пользователей.

ставом поровой влаги и кислотностью [29, 34], а также процессами выщелачивания и биодегградации [22, 39]. Кроме того, установлена зависимость ВП от сложения и гранулометрического состава [31, 40]. К преимуществам метода можно отнести то, что современная аппаратура обеспечивает синхронное измерение УЭС и параметров ВП, в результате увеличивается их информативность. Эффективность предложенного комплекса электрических методов оценивали на примере специфических шунгитовых почв Заонежского полуострова (Республика Карелия).

Основы электроразведочных методов. Электроразведочные методы основаны на изучении процессов распространения естественных или искусственно возбуждаемых электромагнитных полей в среде. Их применение позволяет наблюдать пространственное распределение геоэлектрических характеристик [20]. Теоретические основы электроразведки детально описаны в обобщающих трудах [18, 21]. В почвоведении наиболее распространены метод сопротивлений на постоянном токе, который заключается в измерении УЭС почв, т.е. их способность пропускать электрический ток [13, 26, 32]. Так как на практике происходит измерение УЭС некоторого общего объема почвы, включающего внутренние неоднородности, помехи и прочее, вводят термин “кажущееся” УЭС. Кажущееся УЭС обозначается ρ_k и измеряется в омах на метр (Ом · м). Положение точки наблюдения в пространстве определяется геометрией системы наблюдения – электроразведочной установки, представляющей собой пару питающих А–В, по которым подается ток, и приемных М–N, регистрирующих разность потенциалов в среде, электродов, расположенных на фиксированном расстоянии друг от друга [21].

При выполнении измерений электроды располагаются с определенным шагом, величина которого определяет глубину проникновения зондирующего тока. Ток подается (I) на питающую пару электродов АВ, а на приемной паре MN регистрируется разность потенциалов (U). Зная I и U , можно рассчитать ρ_k , используя уравнение:

$$\rho_k = K \frac{U}{I}, \quad (1)$$

где K – геометрический коэффициент, определяющий пространственное положение области, из которой получен сигнал:

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}}. \quad (2)$$

Для оценки возможностей грунта пропускать электрический ток используют параметр кажущейся удельной электрической проводимости (σ_k),

обратно пропорциональный сопротивлению:

$$\sigma_k = \frac{1}{\rho_k}. \quad (3)$$

В первом приближении минеральный скелет почв сложен диэлектриками, поэтому в сухом состоянии они плохо проводят электрический ток. Однако при достаточном водонасыщении, в поровом пространстве образуется объемная электропроводность, обусловленная наличием раствора, а на границе раздела жидкой и твердой фазы – поверхностная, вызванная формированием двойного электрического слоя (ДЭС) [21]. Объемная проводимость существенно зависит от содержания ионов в электролите, а поверхностная проводимость тесно связана с глинистостью, так как мелкодисперсные частицы формируют узкие поры и капилляры, и электрический ток распространяется по границе ДЭС, а не по электролиту. Этим фактом обусловлено более низкое сопротивление глинистых грунтов, чем песчаных, при умеренном водонасыщении, при этом избыточное насыщение высокоминерализованным раствором приводит к эффекту снижения влияния ДЭС.

Следует отметить, что ρ_k определяется целым рядом факторов: гранулометрическим составом, геометрией порового пространства, концентрацией и минерализацией поровой воды, содержанием электронных проводников (углерода), химическим составом и содержанием отдельных ионов, температурой. Существуют различные модели, описывающие зависимость почвенных свойств и электрических параметров [30].

Особую роль в электрофизике почв играет повышенное содержание органического вещества – органических остатков, гумуса и бактерий, которые оказывают влияние на общую проводимость почв, как правило, увеличивая ее. Например, это обусловлено процессами насыщения порового электролита ионами из-за процессов разложения и биодегградации органического и минерального веществ почв. Или замещением объемного типа проводимости поверхностным, вызванного изменением (сужением) конфигурации порового пространства из-за заполнения пор и капилляров микрочастицами гумуса, биопленками и др., вследствие чего возрастает концентрация заряженных частиц на границе ДЭС.

Под действием внешнего электрического поля, кроме протекания тока, может проходить еще один электрический процесс – вызванная поляризация (ВП). Эффект ВП выражен накоплением в гетерогенных средах электрических зарядов, а после снятия внешнего поля, возвращением системы в состояние равновесия благодаря перемещению зарядов и протеканию вторичного тока [2].

Возникновение ВП в ионопроводящих породах, к которым можно отнести и почвы, происходит за счет двойного электрического слоя, образующегося на контакте жидкой и твердой фаз [38]. В случае наличия электропроводящих минералов (сульфидов, графитов) интенсивность ВП резко возрастает. К факторам, влияющим на ВП, относятся крупность минеральных и органических частиц, слагающих почву, шероховатость и неровность их поверхности [28].

Метод ВП заключается в измерении электрических полей, сформированных в среде вторичными электрическими зарядами. Теоретические основы метода показаны в монографии [6], а техника полевых наблюдений полностью аналогична методу сопротивлений на постоянном токе. Величину эффекта ВП можно оценить во временной и частотной области. Временная ВП (time-domain) фиксирует значение разности потенциалов в конкретный момент времени после отключения внешнего электрического поля. Набор таких отметок (стробов) формирует кривую спада напряжения, описывающую протекание вторичных токов и разрядку (релаксацию) среды. В рамках представленных исследований эффект ВП наблюдался по фазово-частотной методике ВП (frequency-domain), когда регистрируется сдвиг фазы, который характеризует “запаздывание” фазы гармонического сигнала в приемной линии МН относительно фазы сигнала генераторного устройства, что обусловлено влиянием вторичного поля процесса ВП. Данный параметр характеризуется углом сдвига фазы (φ) и измеряется в градусах [7]. Для подавления помех Куликов [7] предложил использовать дифференциальный фазовый параметр, который можно вычислить по фазам 1 и 3 гармоник (φ_1 и φ_3) измеряемого сигнала:

$$\Delta\varphi_{1-3} = \frac{3\varphi_1 - \varphi_3}{2}. \quad (4)$$

Зная $\Delta\varphi$, возможно оценить интенсивность процесса ВП – кажущуюся поляризуемость (η_k), используя эмпирическую формулу:

$$\eta_k = -2.5\Delta\varphi. \quad (5)$$

Полученная величина измеряется в процентах и позволяет судить о способности среды поляризоваться под внешним воздействием. Очевидным преимуществом комплексного использования методов сопротивления на постоянном токе и ВП является возможность синхронного сбора данных.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Работы проводили на специфических шунгитовых почвах Заонежского полуострова (Республика Карелия). Территория Заонежского полуострова значительно отличается от других районов Карелии и сопредельных территорий по природ-

ным условиям почвообразования. Ее характеризует большое разнообразие форм рельефа, широкое распространение шунгитсодержащих почвообразующих пород, более мягкие климатические условия и большое количество лиственных пород в древостое [11].

Шунгитсодержащие породы сильно отличаются от других материнских пород содержанием углерода и гигроскопической влаги, а также поглонительной способностью. Концентрация углерода в этих породах изменяется в интервале от 5 до 95%. При этом, чем больше углерода, тем интенсивнее протекает выветривание, и тем богаче почва элементами минерального питания [1]. Гранулометрический состав шунгитсодержащих почвообразующих пород очень разнообразен: сильнохрящеватые пески, супеси, суглинки, реже глины. Выветренные шунгитовые сланцы и их элюво-делювий занимают территории, расположенные вблизи выходов на дневную поверхность скальных шунгитовых пород. По мере удаления от них ледниковые отложения обедняются шунгитовым веществом.

В таких своеобразных природных условиях Заонежского полуострова сформировался пестрый и сложный почвенный покров (рис. S1). Его специфику во многом определяют шунгитовые почвы – уникальные не только в регионе, но и в мире. Эти почвы в сочетании с подбурами оглееными распространены на площадях, занятых элюво-делювием шунгитовых пород и шунгитовой мореной. По мере удаления от скальных выходов шунгитовых пород морена приобретает смешанный состав, в котором в равной мере участвуют как основные и шунгитовые, так и кислые породы. В подобных местах распространены подбуры, которые отличаются от широко распространенных в Карелии подзолов более темной окраской, пониженной кислотностью, железистостью, а также более высоким содержанием элементов минерального питания.

Первое название шунгитовым почвам дал академик Ф.Ю. Левинсон-Лессинг (1889) – “олонецкая черная почва” [9]. В XX в. исследователи [3, 4, 16] отнесли их к дерновым. В региональной классификации Р.М. Морозова относил специфические почвы на шунгитах к типу буроземов темноцветных, тогда как значительное разнообразие свойств этих почв учитывалось на более низких классификационных уровнях [10]. Согласно “Классификации почв России” [5], почвы, развитые на шунгитах, в зависимости от условий их формирования, можно отнести сразу к трем типам: литоземам, темным буроземам и дерновым.

Почвы на шунгитсодержащих породах формируются в основном под лиственными и хвойно-лиственными лесами с хорошо развитым травяным покровом. На поверхность поступает боль-

шое количество растительного опада, однако мощной лесной подстилки не образуется благодаря высокой активности почвенных животных и микроорганизмов, быстро перерабатывающих органический материал. Особенности почвообразующей породы и процессов трансформации растительного опада определили своеобразие органо-профиля, процессов гумусообразования и состава органического вещества данных почв, которое заключается в высоком содержании и однородном составе гумуса по всему профилю [1]. Несмотря на высокую щелочность и хорошую водопроницаемость почв, развитых на шунгитовых породах, в них происходит закрепление гумусовых кислот в профиле, что связано с богатым химическим и минералогическим составом мелкозема, при выветривании которого высвобождается значительное количество железа и кальция, образующих устойчивые соединения с гумусовыми кислотами. Слабая подвижность органо-минеральных комплексов в почвах, развитых на шунгитосодержащих породах, приводит к формированию недифференцированного профиля, где процессы трансформации органического вещества, а также минеральной массы протекают на месте без миграции веществ за пределы почвенной толщи. Таким образом, основными процессами, формирующими данные почвы, являются гумусообразование в условиях нейтральной или слабокислой реакции среды, метаморфизация минеральной массы *in situ* с освобождением железа, кальция и других элементов. Подобные почвообразовательные процессы в целом нехарактерны для зональных почв Карелии, их проявление на территории Заонежья обусловлено специфическими природными условиями — распространением почвообразующих пород с включением шунгита, более мягким климатом и др. [23].

Несмотря на то, что почвы, развитые на шунгитосодержащих породах, привлекали внимание ряда исследователей, многие вопросы их генезиса остались не изученными. Это связано с тем, что шунгитосодержащие породы очень разнообразны по химическому составу, а кроме того, существенно различается их содержание в четвертичных отложениях. Участок исследований расположен в северо-восточной части Заонежского полуострова, где преобладают буроземы шунгитовые [11].

Полевые измерения электрофизических параметров почв выполняли методом электропрофилирования с использованием симметричной четырехэлектродной установки А-М-Н-В, где расстояние между всеми электродами составляло 15 см. Постоянный разнос обеспечил картирование площадных неоднородностей и изменчивости почв на глубине 15 см. Выбор глубины исследования обусловлен несколькими причинами. Выбранный интервал попадает в область переменного увлажнения зоны аэрации, которая при от-

сутствии осадков имеет выдержанную влажность. Учитывали и аппаратные возможности — шуп влагомера MS-350A, используемого для измерения относительной влажности почв, позволяет проводить замеры на глубине не более 20 см.

Сбор данных осуществляли электроразведочным комплексом, включающим генератор SGD-EGC200 SKAT II и измеритель SGD-EEM MEDUSA (СибГеофизПрибор, Россия). Комплекс позволяет регистрировать разность потенциалов и фазовое ВП на наборе из восьми частот. Так как ВП (как и УЭС) зависит от частоты (f) генерируемого тока, в рамках выполненных исследований измерения проводили на относительно высокой ($f = 4.88$ Гц) и низкой ($f = 0.305$ Гц) частотах. Съемку выполняли по регулярной сети 50×50 м, положение точек наблюдений фиксировали с помощью GPS (рис. 1).

В основе использования способа измерений на двух частотах лежала гипотеза о возможности выявления по показателям ВП участков повышенного содержания углерода в почвах. Выбор измерительных частот обусловлен спектральными характеристиками фазового ВП, которые были показаны в статье Куликова и Яковлева [8]. В работе демонстрируется, что шунгит имеет максимум интенсивности поляризации на низких частотах в интервале 0.3–0.5 Гц, а рудные минералы обладают максимумами на частотах более 1 Гц.

Так как влажность оказывает критическое влияние на показатели УЭС, на первом этапе работ измеряли проводимость приповерхностных вод портативным кондуктометром COM-100. Проводимость воды составила 150 мкС/см (при $t = 20^\circ\text{C}$), тогда как средние значения для Карелии 60 мкС/см. Это свидетельствует о относительно высокой минерализации воды и, как следствие, низких значениях УЭС почв. Кроме того, на каждой точке наблюдений фиксировали относительную влажность, а также высотные отметки для учета влияния микрорельефа.

С целью дополнительного обоснования причин изменчивости электрофизических свойств в лабораторных условиях изучали образцы исследованных почв. Такой подход является полезным для параметрической оценки исследуемых грунтов, так как регистрируемые значения можно сопоставить с полевыми наблюдениями [19]. Всего отобрано 6 проб, 2 в зоне повышенной амплитуды ВП, 2 в зоне повышенной влажности и 2 в фоновых областях. При отборе отдельные почвенные горизонты не выделяли, а использовали общую пробу, отобранную с глубины 5–20 см, объемом до 0.5 м³. Это обусловлено интегральным характером измерений методами электроразведки, т.е. регистрируемый показатель относится к некоторому объему среды. Для выполне-



Рис. 1. Схема расположения точек наблюдений (1) и мест отбора проб (2).

ния анализов из каждой пробы отбирали по три навески, усредненные методом квартования.

Лабораторные измерения выполняли в ячейке размером $60 \times 20 \times 25$ см, такой же электроразведочной установкой (А–М–N–В с разносами 15 см) и аппаратным комплексом, описанным выше. Ячейку заполняли почвой на $2/3$ от объема, что обеспечивало равномерное распределение электрического тока в объеме образца почвы при измерениях. Пробы высушивали, после добавления подсоленной воды (для достижения проводимо-

сти воды 150 мкС/см и моделирования условий полевого участка) выполняли замеры ρ_k и η_k в относительно сухом ($W_{\text{отн}} = 20\%$) и относительно влажном состоянии ($W_{\text{отн}} = 40\%$).

Для каждой пробы измеряли гранулометрический состав методом лазерной дифрактометрии при помощи анализатора частиц LS 13320 (Beckman Coulter, США), что позволило определить частицы от коллоидных глинистых (0.04 мкм) до грубозернистых песчаных (2 мм). Общее содержание углерода определяли методом дифферен-

циального термического анализа на синхронном термоанализаторе STA 449 F1 Jupiter (Netzsch, Германия) в интервале температур 100–1000°C. Несмотря на недостатки метода пиролиза при определении и дифференциации педогенного и литогенного углерода [15], в почвах Заонежья отчетливо наблюдается экзотермический эффект в диапазоне температур 240–700°C для органического углерода и 500–700°C, характеризующий содержание неорганического шунгитового углерода [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По итогам выполненных работ получены карты распределения параметров ρ_k и η_k на двух частотах, которые отражают изменения электрофизических параметров в почвенном слое (рис. 2). Отмечается, что значения ρ_k имеют достаточно низкие показатели вследствие минерализации воды. Фоновые показатели η_k составляют порядка 1%. По картам видно, что аномалии полей УЭС и ВП имеют разное распределение и приурочены к разным источникам.

Дополнительно, в качестве средства интерпретации выполнено сопоставление карты распределения относительной влажности ($W_{\text{отн}}$) с микрорельефом в пределах участка работ, что наглядно объясняет закономерности распределения гравитационной влаги в почвах на участке (рис. 3). Это взаимосвязь отражается и в поле УЭС, где отчетливо видно, что проводящие зоны с $\rho_k = 20\text{--}150 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ локализованы вдоль восточного фланга участка, в области понижений поверхности. Зоны высокого сопротивления с $\rho_k = 150\text{--}350 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ расположены на вершине. По показателям УЭС выделяется два канала миграции влаги с вершины в нижнюю часть (рис. 4). В общем виде аномалии УЭС фрагментарны и имеют схожее распределение на разных частотах.

В свою очередь, характер поведения поля ВП иной. Распределение значений η_k равномерно, и только в северной части присутствует интенсивная аномалия до 4%, имеющая простираение с северо-запада на юго-восток. Отличительной особенностью является изменение показателей при уменьшении частоты: на низких частотах амплитуда сигнала в аномальной области усиливается на 0.4–0.8%, а фоновые значения снижаются на такой же уровень.

Полученные данные исследовали при помощи кросс-плот диаграмм (рис. S3) и расчета коэффициента корреляции Спирмена (так как зависимость была непараметрической). Такой подход наглядно показал, что высотная отметка и $W_{\text{отн}}$ имеют линейную зависимость с величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 0.5942$, а коэффициент корреляции $r_s = -0.614$. При сопоставле-

нии ρ_k и $W_{\text{отн}}$ отмечается отсутствие частотной дисперсии, достоверность $R^2 = 0.3025$, а $r_s = -0.426$ ($f = 4.88 \text{ Гц}$) и -0.371 ($f = 0.305 \text{ Гц}$). Это указывает на взаимосвязь УЭС и влажности, хотя полученные значения несколько меньше показанных в литературе (r_s от -0.5 и более) [25].

Для ВП картина отлична, вычисление линейного тренда происходит с малой достоверностью $R^2 = 0.0023$, из-за дисперсии значений η_k на разных частотах при $f = 4.88 \text{ Гц}$ $r_s = 0.076$, а при $f = 0.305 \text{ Гц}$ $r_s = -0.069$. В обоих случаях статистически значимый результат не был получен. Следует отметить, что небольшая выборка ($n = 35$) приводит к значительной статистической погрешности, вероятно, общие взаимоотношения при увеличении плотности измерений должны остаться неизменными. В целом, исследованиями установлено, что метод ВП является наименее зависимым от влажности, что позволяет делать выводы о его большей эффективности при изучении неоднородностей почв вещественного и структурного плана по сравнению с методом УЭС.

Связь между полями ВП и УЭС демонстрируется на рис. S3 в виде кросс-плот диаграммы плотности распределения точек. По соотношению значений ρ_k и η_k выделено три класса почв. Первый класс (диапазон $\rho_k = 50\text{--}150 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\eta_k = 0.2\text{--}1.4\%$) интерпретируется как влажные почвы, второй класс (диапазон $\rho_k = 150\text{--}250 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\eta_k = 0.8\text{--}2.0\%$) – относительно сухие, третий класс (диапазон $\rho_k = 10\text{--}50 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\eta_k = 1.3\text{--}3.7\%$) – почвы с аномальными значениями электрофизических параметров, содержащие повышенное количество углерода. Полученные данные показывают, что ВП, как и предполагалось, несет дополнительную информацию о почвенных признаках и не зависит от влажности.

Для выявления источников аномальных изменений электрофизических полей изучали характеристики почвенных образцов. Осредненные показатели для каждой пробы приведены в табл. 1. Исследования показали, что по гранулометрическому составу в пробах преобладает физический песок (среднее содержание 85%), а в общем виде они разделяются на песчаные почвы с возвышенности и легкосуглинистые в низине. С учетом постоянных значений $W_{\text{отн}}$ такие данные позволяют оценить влияние содержания физического песка.

На рис. 5 представлены графики, отражающие изменение электрофизических свойств на разных частотах для образцов, указанных выше. Во всех случаях отчетливо видно влияние влажности, ее кратное увеличение приводит к снижению ρ_k в 2–3 раза. При этом изменение рабочей частоты генерируемого тока (с 0.038 до 4.88 Гц) при относительно сухой среде не дает явных результатов (ва-

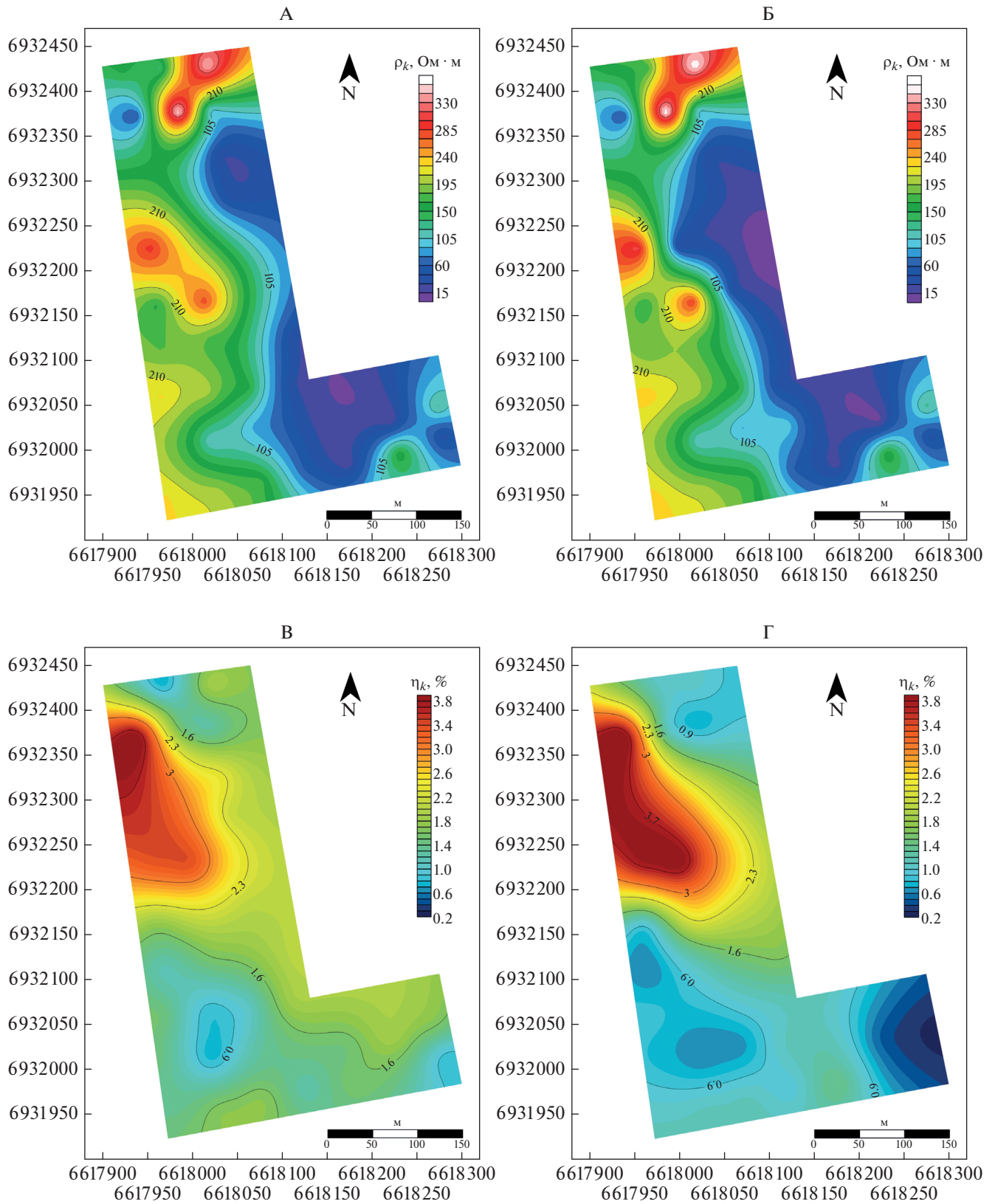


Рис. 2. Карты значений ρ_k (при $f = 4.88$ Гц (А) и 0.305 Гц (Б)) и η_k (при $f = 4.88$ Гц (В) и 0.305 Гц (Г)) на исследуемом участке.

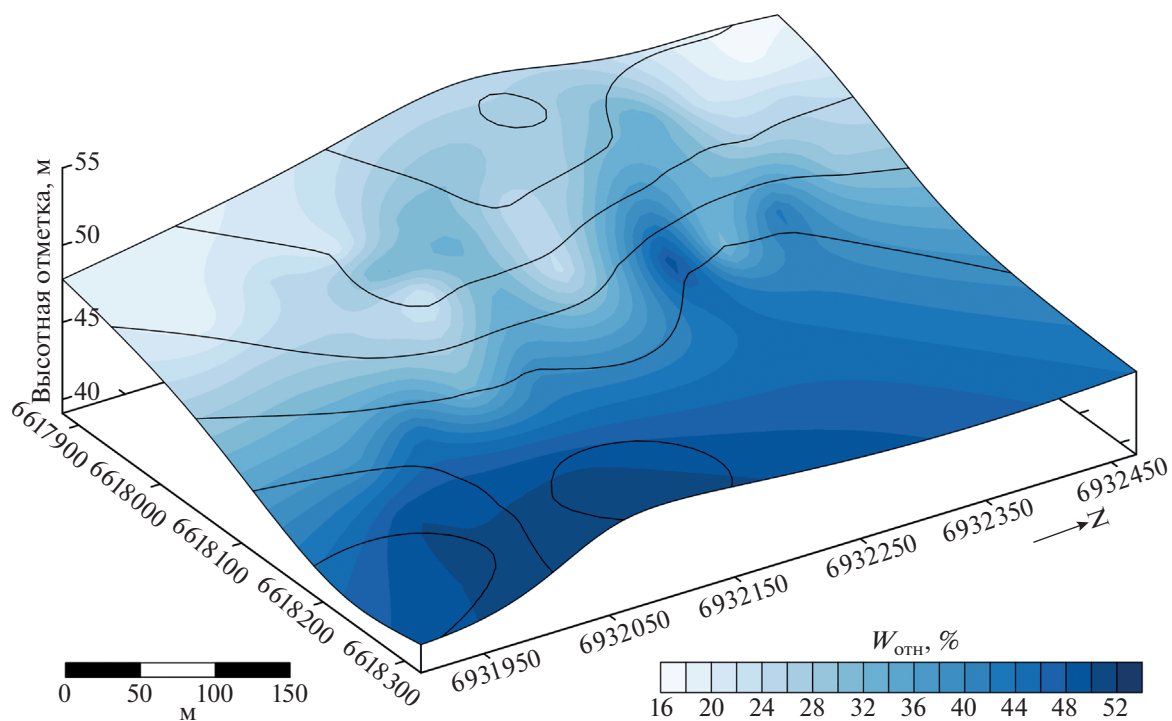


Рис. 3. Распределение $W_{отн}$ на участке с учетом микрорельефа.

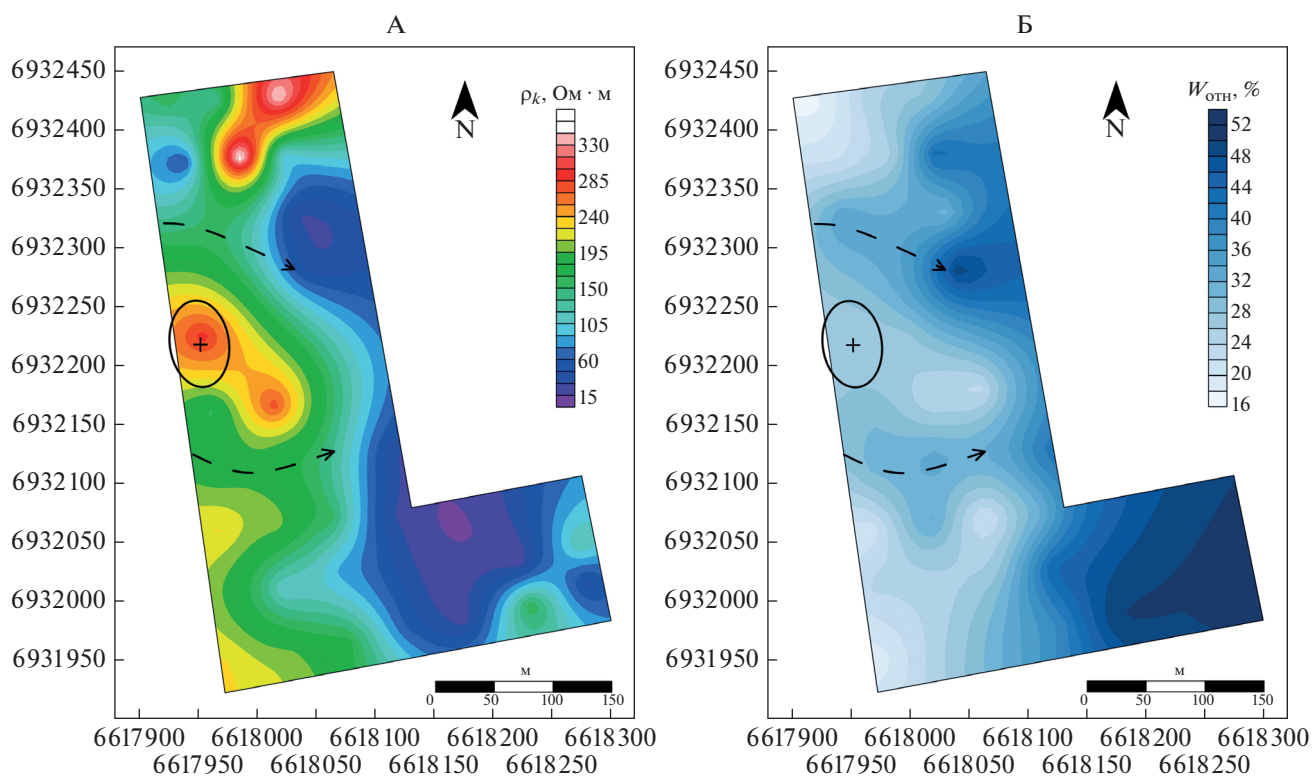


Рис. 4. Сопоставление карт ρ_k (А) и $W_{отн}$ (Б) (стрелки – направление капиллярного стока, овал – вершина возвышенности).

Таблица 1. Гранулометрический состав и содержание общего углерода в образцах почв, %

№ пробы	Физическая глина (<0.01 мм)	Физический песок (>0.01 мм)	$C_{\text{общ}}$	Гранулометрический состав
1	24.4	75.6	4.4	Суглинок легкий
2	20.5	79.5	5.7	Суглинок легкий
3	9.4	90.6	8.4	Песок связанный
4	9.1	90.9	4.1	Песок связанный
5	12.1	87.9	3.6	Супесь
6	9.0	91.0	2.9	Песок связанный

риации ρ_k в пределах 1% погрешности), тогда как при дополнительном увлажнении проявляется незначительный линейный рост ρ_k ($\approx 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), в сторону высоких частот. В свою очередь, показатели η_k демонстрируют иную картину, с меньшим диапазоном изменений, однако с более проявленным эффектом частотной дисперсии. Примеры возникновения дисперсии значений ВП при выдержанных показателях УЭС при изменении частоты тока можно найти и в литературе [27, 35], это позволяет сделать вывод, что такое распределение для дисперсных грунтов нормальное.

Рассмотрим несколько проб более детально. Проба 1 характеризуется относительно низкими значениями электрофизических параметров в сухом состоянии, тогда как при смачивании ρ_k и η_k возрастают в 3 раза. При этом показатели η_k увеличиваются в область высоких частот, а увлажнение пробы приводит к общему смещению уровня значений на 0.7%. Эффект повышения интенсивности ВП при увлажнении обусловлен увеличением поверхностной проводимости, которая пропорциональна содержанию мелких частиц (т.е. увеличению содержания физической глины в почве) [19, 40]. Этот факт подтверждается результатом анализа гранулометрического состава пробы 1 (легкий суглинок). Для пробы 6 характерно такое же распределение ρ_k , как и в пробе 1. На параметр η_k изменение влажности влияния практически не оказывает, а частотная дисперсия носит линейный характер (уменьшение f приводит к уменьшению η_k). Показатели гранулометрического состава пробы 6 соответствуют песку, эффект ВП, в котором определяется размером составляющих его частиц, а насыщение водой не приводит к изменению характера проводимости.

Отдельно следует рассмотреть пробу 3, где обнаружен интересный эффект, выраженный нелинейным изменением частотного спектра фазового ВП, а также резким повышением η_k при увлажнении до 2.8% в области частот менее 0.1 Гц. С одной стороны, примеры спектра ВП для шунгитовых пород [8], а также данные о повышенном содержании общего углерода в пробе 3 (в 2 раза

больше фоновых значений), свидетельствуют о верности предположения о влиянии содержания углерода в почве, в том числе и шунгитового, на спектральные характеристики фазового ВП. К дополнительным доказательствам присутствия шунгитового вещества можно отнести и более низкий уровень УЭС в пробе 3 по сравнению с пробой 6.

С другой стороны, это может являться и следствием изменения соотношения песок–глина. Выявленный эффект повышения уровня ВП на частотном интервале 0.01–0.1 Гц может происходить за счет влияния размеров минеральных частиц и связанной с этим пористостью. Характеристики порового пространства пропорциональны времени релаксации (разрядки) среды и, как следствие, при увеличении размеров пор происходит увеличение интенсивности низкочастотной составляющей электрического сигнала [31]. Этот тезис согласуется с результатами определения гранулометрического состава (рис. S4). Установлено, что проба 3 содержит большее количество физического песка по сравнению с пробой 6, тогда как проба 1 отличается повышенным содержанием физической глины.

Анализируя полученную информацию с учетом полевых наблюдений, следует предположить большую вероятность существования первого варианта, так как класс III аномальных значений ρ_k и η_k (рис. S3) приурочен к некоторой линейной зоне (рис. 3), которая наблюдается в условиях пространственной изменчивости гранулометрического состава и влажности грунтов. Кроме того, в пробах 2 и 3, отобранных в пределах указанной зоны прослеживается повышенное содержание общего углерода. Так как отобранные образцы почв находятся в пределах единого биоценоза с выдержанными условиями, можно предположить приуроченность обнаруженной зоны к маломощному шунгитовому слою в кровле подстилающих материнских пород (явление характерное для геологического строения Заонежского полуострова), который служит источником поступления углерода в почву.

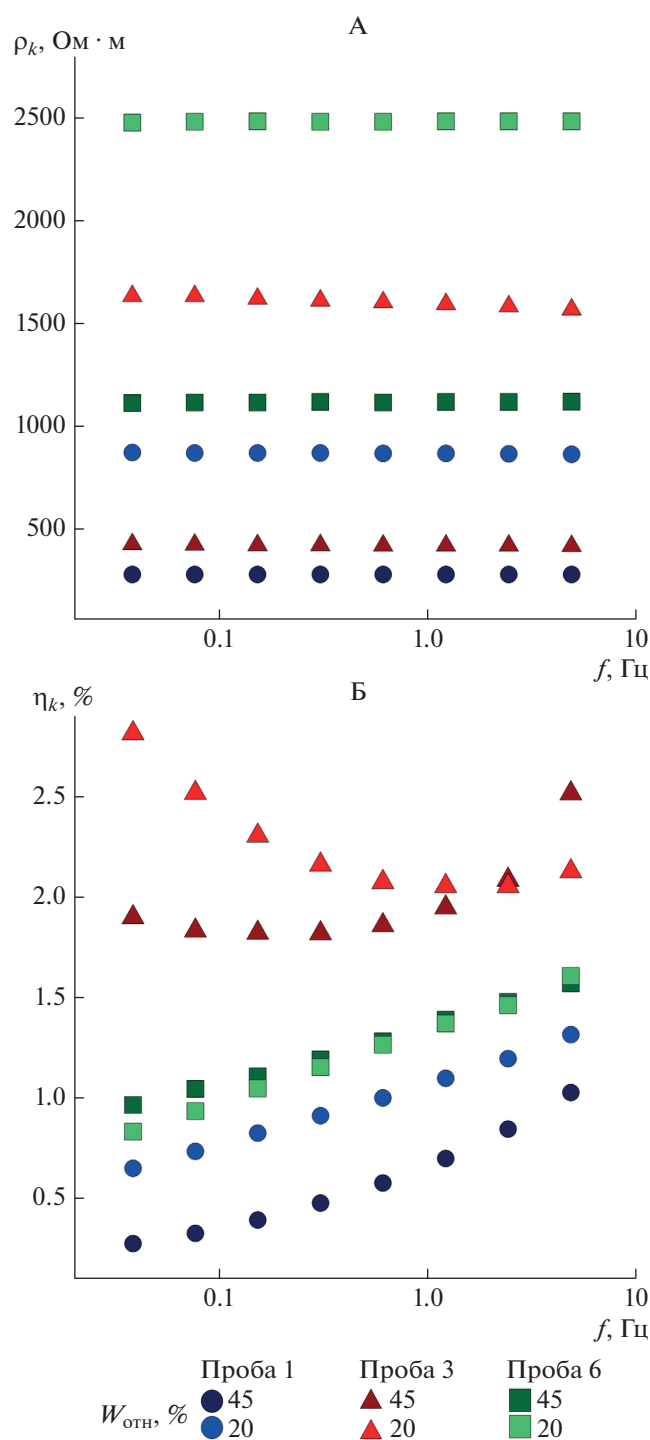


Рис. 5. Графики частотного измерения ρ_k (А) и η_k (Б) для проб глинистого состава (проба 1), супеси (проба 3) и песка (проба 6).

Обобщив результаты исследования проб, можно сделать вывод о том, что в значениях ρ_k отражается в первую очередь содержание влаги в почве. Тогда как смещение частотного распределения η_k можно связать с крупностью частиц и содержа-

нием шунгитового вещества. Благодаря этому по частотному спектру η_k можно делать прогноз о гранулометрическом составе почвы и присутствии в ней электропроводящих минеральных включений, таких как шунгит.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований шунгитовых почв методами сопротивления и вызванной поляризации сделаны следующие выводы.

Показатели поля УЭС тесно связаны с распределением влаги в почвах, особенно в случае относительного объемного содержания менее 30–40%, поэтому иногда могут быть малоинформативными при описании почвенных признаков. Например, проведенный анализ выявил приуроченность наблюдаемых показателей УЭС и влажности, главным образом, к микрорельефу исследуемого участка, и в значительно меньшей степени к типу почв. Следовательно, для корректного использования метода сопротивлений на постоянном токе для решения почвенных задач необходимо учитывать значения влажности почв, ее динамическое изменение и общую минерализацию воды, а также гранулометрический состав.

Использование метода ВП продемонстрировало меньшую связь регистрируемых показателей с содержанием воды в почве и обеспечило выявление на исследуемом участке аномальной области, обусловленной повышенным содержанием углерода. Лабораторное изучение образцов показало, что формирование аномалий ВП в почвах может происходить как за счет изменения гранулометрического состава почв, так и содержания шунгитового вещества. Такие изменения находят отражение в эффекте частотной дисперсии — образования максимумов интенсивности сигнала на определенном диапазоне частот.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены в рамках государственного задания КарНЦ РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Рис. S1. Почвенная карта района работ [10].

Рис. S2. Диаграммы сопоставления значений $W_{отн}$ с высотными отметками, ρ_k и η_k ($n = 35$).

Рис. S3. Диаграмма плотности распределения значений ρ_k и η_k .

Рис. S4. Графики распределения гранулометрического состава в пробах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бахмет О.Н.* Остров Кижы. Литогенные почвы, сформировавшиеся на шунгитовых сланцах. Путеводитель почвенной экскурсии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. 44 с.
2. *Вахромеев Г.С., Ерофеев Л.Я., Канайкин В.С., Номоконова Г.Г.* Петрофизика. Томск: Изд-во ТомГУ, 1997. 462 с.
3. *Володин А.М., Тойкка М.А.* К вопросу классификации и инвентаризации шунгитовых почв Заонежского района Карельской АССР // Уч. записки ПетрГУ. 1958. Т. 9. Вып. 3. С. 205–217.
4. *Иванова Е.Н.* Классификация почв СССР. М.: Наука, 1976. 228 с.
5. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
6. *Комаров В.А.* Электроразведка методом вызванной поляризации. Л.: Недра, 1980. 388 с.
7. *Куликов А.В., Шемякин Е.А.* Электроразведка фазовым методом вызванной поляризации. М.: Недра, 1978. 157 с.
8. *Куликов В.А., Яковлев А.Г.* Применение частотных характеристик вызванной поляризации для разделения аномалий от углефицированных пород и сульфидов // Геофизика. 2008. № 6. С. 55–60.
9. *Левинсон-Лессинг Ф.Ю.* Об Олонецкой черной почве. Петрозаводск: Олонецкие губернские ведомости, 1889. № 33. С. 357–358.
10. *Морозова Р.М.* Лесные почвы Карелии. Л.: Наука, 1991. 184 с.
11. *Морозова Р.М., Федорец Н.Г., Бахмет О.Н.* Почвы и почвенный покров Заонежья Карелии // Тр. КарНЦ РАН. 2004. Вып. 6. С. 69–89.
12. *Поздняков А.И., Хан К.Ю.* Использование методов постоянных электрических полей в почвенных исследованиях // Почвоведение. 1979. № 7. С. 57–65.
13. *Поздняков А.И.* Полевая электрофизика почв. М.: МАИК “Наука/Интерпериодика”, 2001. 187 с.
14. *Поздняков А.И., Елисеев П.И., Русаков А.В.* Электрическое сопротивление как возможный показатель окультуренности пахотных супесчаных почв гумидной зоны // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2012. № 2. С. 54–60.
15. *Соколов Д.А., Кулижский С.П., Лим А.Г., Гуркова Е.А., Нечаева Т.В., Мерзляков О.Э.* Сравнительная оценка методов определения педогенного органического углерода в углесодержащих почвах // Вестник Томского гос. ун-та. Биология. 2017. № 39. С. 29–43.
16. *Урусевская И.С., Шекк Г.В.* Особенности топорядка почв на шунгитовых породах Заонежья // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 1988. № 2. С. 12–19.
17. *Чаженина С.Ю., Коробкина Е.В.* Органическое вещество почв, сформированных на шунгитовых породах // Органическая минералогия. Мат-лы IV совещ. Черноголовка, 2013. С. 175–178.
18. *Хмелевской В.К.* Электроразведка. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. 422 с.
19. *Шевнин В.А., Бобачев А.А., Баранчук К.И.* Лабораторные измерения сопротивления и параметров вызванной поляризации рыхлых грунтов для определения литологического строения разреза // Инженерные изыскания. 2014. № 9–10. С. 53–58.
20. Электроразведка методом сопротивлений / Под ред. Хмелевского В.К., Шевнина В.А. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1994. 160 с.
21. *Якубовский Ю.В., Ренард И.В.* Электроразведка. М.: Недра, 1991. 358 с.
22. *Aal G.A., Slater L.D., Atekwana E.A.* Induced-polarization measurements on unconsolidated sediments from a site of active hydrocarbon biodegradation // Geophysics. 2006. V. 71. № 2. P. H13–H24. <https://doi.org/10.1190/1.2187760>
23. *Bakhmet O.N., Fedorets N.G.* Soils and their characteristics on Zaonezhye Peninsula // Biogeography, landscapes, ecosystems and species of Zaonezhye Peninsula, in Onega Lake, Russian Karelia. Reports of the Finnish Environment Institute. 2014. V. 40. P. 53–55.
24. *Banton O., Seguin M.K., Cimon M.A.* Mapping field scale physical properties of soil with electrical resistivity // Soil Sci. Soc. Am. J. 1997. V. 61. P. 1010–1017. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100040003x>
25. *Calamita G., Brocca L., Perrone A., Piscitelli S., Lapenna V., Melone F., Moramarco T.* Electrical resistivity and TDR methods for soil moisture estimation in central Italy test-sites // J. Hydrol. 2012. V. 454–455. P. 101–112. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.001>
26. *Friedman S.* Soil properties influencing apparent electrical conductivity: A review // Comput. Electron. Agric. 2005. V. 46. P. 45–70. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.11.001>
27. *Ghorbani A., Cosenza Ph., Revil A., Zamora M., Schmutz M., Florsch N., Jougnot D.* Non-invasive monitoring of water content and textural changes in clay-rocks using spectral induced polarization: A laboratory investigation // Appl. Clay Sci. 2009. V. 43. P. 493–502. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.12.007>
28. *Koch K., Revil A., Holliger K.* Relating the permeability of quartz sands to their grain size and spectral induced polarization characteristics // Geophys. J. Int. 2012. V. 190. P. 230–242. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05510.x>
29. *Lesmes D.P., Frye K.M.* Influence of pore fluid chemistry on the complex conductivity and induced polarization responses of Berea sandstone // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. № B3. P. 4079–4090. <https://doi.org/10.1029/2000JB900392>
30. *Pozdnyakov A.I., Pozdnyakova L.A., Karpachevskii L.O.* Relationship between water tension and electrical resistivity in soils // Eurasian Soil Science. 2006. V. 39. P. S78–S83. <https://doi.org/10.1134/S1064229306130138>
31. *Revil A., Florsch N., Camerlynck C.* Spectral induced polarization porosimetry // Geophys. J. Int. 2014. V. 198. P. 1016–1033. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu180>
32. *Samouëlian A., Cousin I., Tabbagh A., Bruand A., Richarde G.* Electrical resistivity survey in soil science: a review // Soil Till. Res. 2005. V. 83. P. 173–193. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004>
33. *Schwartz B.F., Schreiber M.E., Yan T.* Quantifying field-scale soil moisture using electrical resistivity imaging //

- J. Hydrol. 2008. V. 362. P. 234–246.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.08.027>
34. *Schwartz N., Shalem T., Furman A.* The effect of organic acid on the spectral-induced polarization response of soil // *Geophys. J. Int.* 2014. V. 197. P. 269–276.
<https://doi.org/10.1093/gji/ggt529>
35. *Scott J.B.T., Barker R.D.* Characterization of sandstone by electrical spectroscopy for stratigraphical and hydrogeological investigations // *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 2005. V. 38. P. 143–154.
<https://doi.org/10.1144/1470-9326/04-036>
36. *Seladji S., Cosenza P., Tabbagh A., Ranger J., Richard G.* The effect of compaction on soil electrical resistivity: a laboratory investigation // *Eur. J. Soil Sci.* 2010. V. 61. P. 1043–1055.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01309.x>
37. *Tabbagh A., Dabas M., Hesse A., Panissod C.* Soil resistivity: a non-invasive tool to map soil structure horzination // *Geoderma.* 2000. V. 97. P. 393–404.
[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00047-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00047-1)
38. *Titov K., Komarov V., Tarasov V., Levitski A.* Theoretical and experimental study of time domain-induced polarization in water-saturated sands // *J. Appl. Geophys.* 2002. V. 50. P. 417–433.
[https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00168-4](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00168-4)
39. *Vaudelet P., Revil A., Schmutz M., Franceschi M., Begasat P.* Changes in induced polarization associated with the sorption of sodium, lead, and zinc on silica sands // *J. Colloid Interface Sci.* 2011. V. 360. № 2. P. 739–752.
<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.04.077>
40. *Weller A., Slater L.D.* Induced polarization dependence on pore space geometry: Empirical observations and mechanistic predictions // *J. Appl. Geophys.* 2015. V. 123. P. 310–315.
<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.09.002>
41. *Yoon G.L., Park J.B.* Sensitivity of leachate and fine contents on electrical resistivity variations of sandy soils // *J. Hazard Mater.* 2001. V. B84. P. 147–161.
[https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00197-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00197-2)

The Integrated Application of Geoelectric Methods in Mapping Soil Inhomogeneities

P. A. Ryazantsev^{1, *} and O. N. Bakhmet¹

¹*Department for Multidisciplinary Scientific Research, Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk, 185910 Russia*

**e-mail: chthonian@yandex.ru*

Application of a set of electrical methods of geophysics—direct current resistance direct current resistance and induced polarization—for the purposes of mapping soil heterogeneities is considered. In the field, we measured the parameters of electrical resistivity (EC) and induced polarization (IP) of shungite soils of the Zaonezhsky Peninsula (Republic of Karelia) using the A–M–N–B electrode installation with spacings of 15 cm. To ensure the adequacy of the interpretation, the relative soil water content and the soil texture were determined. Using the map of resistivity values, spatial variations in the soil water content and, partly, in the soil texture were determined. The map of IP values was used to determine spatial variations in the material composition of the soils, including, in particular, the content of shungite. The analysis of the relative dependence of the electrophysical parameters on the soil water content showed that the Spearman coefficient r_s is -0.426 for the EC and 0.076 for the IP, which confirms the hypothesis about different levels of influence of the water content on these parameters. In the course of studying the influence of the frequency of the generated electric signal, an increase in the intensity of IP was found in frequency range of 0.01 – 0.1 Hz for the soils with an increased carbon content. The analysis of the soil samples demonstrated that the anomalies of IP within the studied area may be related to changes both in the soil texture and in the content of shungite material. Hence, the electrophysical indicators determined under natural conditions can be applied to characterize spatial variations in the soil water content, soil texture, and some structural properties of the soils.

Keywords: electrical resistivity, induced polarization, humidity, soil texture, shungite substance