

Диагностика и характер проявления гидроморфного засоления ландшафта «Варницы» (г. Ростов Великий, Ярославская обл.): опыт и методология применения электрофизического подхода

Ю. В. Симонова¹, А. В. Русаков¹, А. Г. Рюмин¹, В. Р. Беляев²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,

Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,

Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

Для цитирования: Симонова, Ю. В., Русаков, А. В., Рюмин, А. Г., Беляев, В. Р. (2019). Диагностика и характер проявления гидроморфного засоления ландшафта «Варницы» (г. Ростов Великий, Ярославская обл.): опыт и методология применения электрофизического подхода. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 64 (1), 81–99. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.105>

В задачи исследования входило выяснение возможности применять показатель удельного электрического сопротивления (УЭС), чтобы оценить засоление почв, формирующихся под влиянием комплекса факторов и процессов, характерных для гумидных ландшафтов центра Русской равнины. В условиях фреатического засоления к таким процессам относятся переувлажнение, накопление и консервация органического вещества, осаждение карбонатов и гипса. Исследование почвенных разрезов на территории памятника природы «Соляной источник “Варницы”» по показателю истинного УЭС ($E_{Rи}$) проводилось параллельно с химическим анализом основных макрокомпонентов водной вытяжки почвы, подземных и грунтово-дренажных вод на участке исследования. Пробы почвы из двух разрезов на участке исследования и воды отбирались в течение пяти сезонов 2016–2017 гг. В дальнейшем проводился корреляционный анализ результатов измерений $E_{Rи}$ с суммой и содержанием отдельных ионов, в ходе которого обнаружилась тесная связь значений $E_{Rи}$ с суммарным содержанием солей в почве, концентрацией кальция и сульфатов. В то же время сезонные изменения этого показателя обусловлены изменением концентраций натрия и хлоридов. Показатель $E_{Rи}$, измеренный в грунтово-дренажных и подземных водах участка исследования, более чувствителен по сравнению с почвой реагирует на изменение общей минерализации, а также концентраций отдельных ионов в течение годового гидрологического цикла, т. е. проявляется более тесная корреляция между $E_{Rи}$ и этими переменными. Геопространственная вариабельность засоленности и ареал засоления определялись путем электрофизических измерений по методу горизонтального электрического профилирования на площади участка, предварительно покрытой детальной геодезической съемкой. На примере гидроморфного Варницкого участка гумидной зоны показано, что по сравнению с другими факторами именно засоленность (при высокой степени последней) играет решающую роль в формировании значений УЭС почвы. Электрофизические параметры могут быть достоверными индикаторами в мониторинговых исследованиях ландшафтного засоления.

Ключевые слова: Варницы, оз. Неро, солевая съемка, удельное электрическое сопротивление, горизонтальное электрическое профилирование, почва, гумидный климат.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2019

Введение

В условиях аридного климата удельное электрическое сопротивление (УЭС) (или обратно пропорциональная ему величина — электрическая проводимость) традиционно используется как экспресс-показатель и надежный критерий диагностики засоления почв. В международной практике пороговым критерием при диагностике засоления почвы приняты значения электрической проводимости, превышающие 4 дСм/м в фильтрате из водонасыщенной почвенной пасты (Soil..., 2014). Солончаки характеризуются электрической проводимостью более 15 дСм/м в фильтратах из водонасыщенных почвенных паст (Status..., 2015).

В условиях достаточного и избыточного атмосферного увлажнения, когда засоление почв не распространено широко, показатель УЭС дает представление о профильной дифференциации свойств почв. Горизонтальное электрическое профилирование (ГЭП) и вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) используются как неразрушающие методы, пригодные для специального крупно- и среднемасштабного картографирования почвенного покрова и проведения экологических мониторинговых исследований (Поздняков, 2009).

Важной предпосылкой при теоретическом рассмотрении связи УЭС с засоленностью почвы является условие, что с помощью электрических параметров могут быть оценены многие свойства почвы. В каждом конкретном случае УЭС определяется совокупностью почвенных свойств, связанных с плотностью и подвижностью электрических зарядов (Pozdnyakov, 2008a). Это касается конституционных свойств почв и пород (таких как степень выветрелости, минералогический состав, засоленность, текстурная дифференциация, плотность сложения, пористость), а также их более динамичных свойств (таких как содержание органического вещества, биологическая активность и др.). В литературе имеются также данные о влиянии на УЭС свойств, приобретенных почвами в ходе антропогенного вмешательства (Soil..., 1999; Pozdnyakov, 2008a; Pozdnyakov, 2008b; Кошелев и др., 2012; Поздняков и др., 2012; Кондрашкин и др., 2011; Вашукевич и др., 2017). К таким свойствам относятся, например, окультуренность, переуплотнение, загрязнение и др.

Логично предположить, что в аридных условиях, когда соленакопление — один из доминирующих среди процессов почвообразования, значения УЭС (или электрической проводимости) обусловлены преимущественно степенью засоления. Однако в почвах, в том числе и засоленных, могут протекать различные элементарные почвообразующие процессы и их комбинации, в результате которых формируются одинаковые или близкие значения электрических параметров, (Pozdnyakov, 2008a; Субботина и Хорхе, 2013). К таким процессам относятся, например, торфообразование, оглеение, соленакопление. Учитывая интегральность показателя УЭС, важно с методологической точки зрения определить допустимость и ограничения использования этой величины для оценки засоления почвы, формирующейся в гумидном климате, когда процессам засоления, осаждения карбонатов и гипса в условиях сезонно-обратимого, пульсирующего типа водного режима сопутствуют процессы интенсивного оглеения и накопления органического вещества, каждый из которых накладывают собственный отпечаток на значения УЭС.

Параллельно с определением влияния засоления на УЭС выяснялась роль фактора рельефа для гидроморфного засоления в литологически слабоконтрастном,

относительно выровненном болотно-лугово-солончаковом ландшафте. Рельеф имеет решающее значение для переноса растворенных веществ, а, значит, может влиять на пространственную изменчивость засоленности.

1. Объекты исследования

Участок исследования расположен в бассейне Верхней Волги, в Ростовском районе Ярославской обл. на западном берегу оз. Неро вблизи Троице-Сергиева Варницкого монастыря. Сама по себе эта территория уникальна и известна как памятник природы регионального значения «Соляной источник “Варницы”». Одновременно участок является памятником археологии и знаменит тем, что вплоть до XVIII в. здесь существовал солеваренный завод. Из сохранившихся объектов центра ростовского солеварения сегодня можно наблюдать колодец с соленой водой и следы в виде углей, кирпичной кладки, древесины и шлака солеваренного промысла.

Варницкий участок представляет собой замкнутое понижение старицеобразной формы, ограниченное с запада подтапливаемой поймой р. Ишни, с севера — поймой и коренным берегом той же р. Ишни, а с юга и востока — Варницким шоссе. Его поверхность относительно выровнена. Детали современного рельефа связаны с проводившимся на участке солеварением; имеются небольшие западины, валы и многочисленные локальные повышения и понижения. Для улучшения дренажа участок прорезан канавой (рис. 1).

Повышенная минерализация грунтовых вод (ГВ) в котловине оз. Неро вызвана, прежде всего, циркуляцией в водоносных горизонтах легкорастворимых солей коренных эвапоритов пермской системы в местах «гидрогеологических окон» и их выгрузкой в водоносный горизонт современных отложений в пониженных элементах рельефа котловины (Рохмистров, 1968; Новский, 1975). Природное напорно-восходящее движение ГВ обеспечивает постоянное увлажнение почвенного профиля и периодический подъем солевых растворов, что приводит к развитию процессов соленакопления в почвенном покрове Варницкого ландшафта. Крайне нехарактерное для зональных и интразональных почв гумидного климата засоление позволяет рассматривать ареал изученного ландшафта как уникальный в почвенном отношении. Степень засоления почвенного профиля здесь возрастает при восходящем движении влаги от уровня ГВ в период интенсивного испарения, так что на поверхности почвы появляются солевые выцветы. При установлении промывного типа водного режима и нисходящего движения влаги степень засоления в почве уменьшается. Солевой режим почв можно отнести к сезонно-обратимому типу.

Периодически при появлении так называемых бугров ГВ, возникающих в местах сосредоточенного поступления подземных вод, уровень ГВ приближается к поверхности и создаются локальные озера-эфемеры с чрезвычайно высокой минерализацией, достигающей 6400–8400 мг/л (точка «Озерцо» на рис. 1). С потоками ГВ соли перемещаются в примыкающие к участку исследования водотоки.

Почвенные разрезы (точки «В-1» и «В-2» на рис. 1) располагаются в центре участка вблизи Варницкого колодца. Переувлажненные почвы этого гидроморфного ландшафта имеют профили с гумусовым и серией квазиглеевых горизонтов,

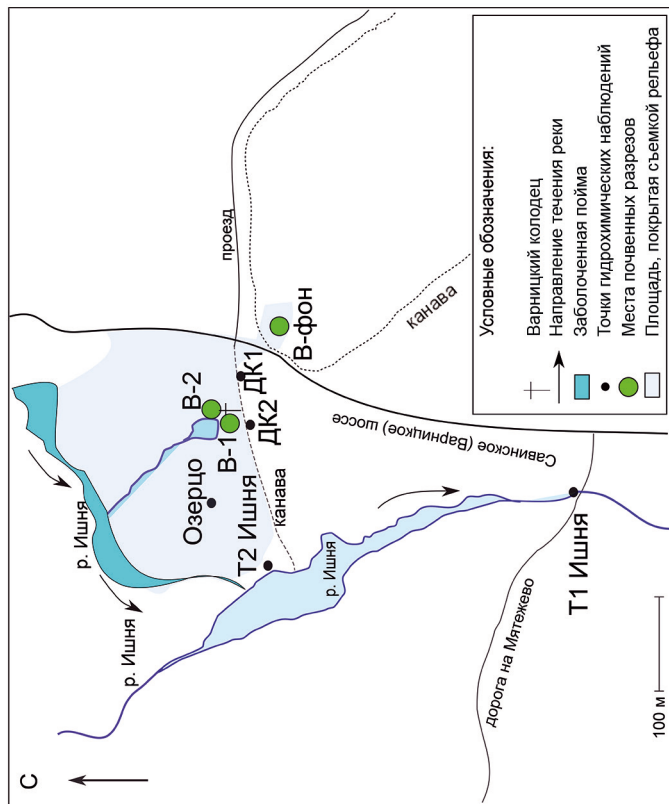
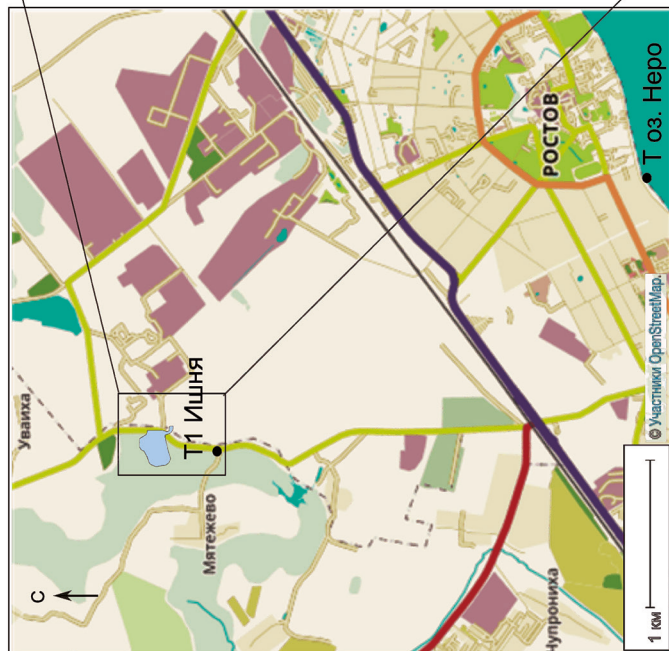


Рис. 1. Расположение участка исследований на местности (слева) и схема точек отбора проб воды и почвы на нем. Создано на основе данных сервиса OpenStreetMap, см. URL: <https://www.openstreetmap.org> (дата обращения 20.01.2019)

местами оторфованных и переслаивающихся с погребенными органогенными горизонтами. Минеральные горизонты включают в себя карбонатно-гипсовые линзы и прослойки и различаются в основном по содержанию легко-, средне- и труднорастворимых солей. Участок представлен серогумусовыми глеевыми и окисленно-глеевыми засоленными почвами и солончаками глеевыми омергеленными гипсо-содержащими.

Разрез, выбранный в качестве фоновой почвы (точка «В-фон» на рис. 1), располагается на территории бывшей пашни, отделенной от участка исследования автодорогой. Уровень ГВ на фоновом участке был искусственно снижен более 30 лет назад при создании глубокого открытого дренажа по внешнему контуру территории. Фоновой почвой является агрозем темный глееватый постагрогенный на двучленных озерных отложениях.

2. Методы исследования

2.1. Геодезическая съемка и построение детальной цифровой модели рельефа

Геодезическая съемка участка исследований с фиксацией всех основных форм и элементов естественного и антропогенного рельефа выполнялась с использованием дифференциальной системы приемников спутникового позиционирования Leica Smart Station 1200 (360 съемочных точек на площади 52610 м², в среднем примерно 1 точка на 150 м²) в режиме быстрой статики GPS-ГЛОНАСС с пост-обработкой (время измерения на точке — 1 мин). Пост-обработка данных выполнена в программном пакете Leica GeoOffice 7, получены пространственные координаты точек съемочной сети с ошибкой в плане не более ±1 см, по высоте — не более ±5 см.

При помощи инструмента Raster Interpolation модуля 3D Analyst из программного пакета ArcMap 10.2.1 по данным геодезической съемки методом интерполяции «ординарный кригинг» построена детальная растровая цифровая модель рельефа (ЦМР) участка исследований с размером ячейки матрицы высот 1 × 1 м. На приведенной на рис. 2 карте показаны также построенные по полученной ЦМР горизонтали рельефа, проведенные через 0,1 м, и сеть исходных точек геодезических измерений.

2.2. Полевые электрофизические методы исследования

Электрофизическая съемка выполнена методом ГЭП, который представляет собой так называемое двумерное геопропространственное измерение УЭС (Samouëlian et al., 2005), когда измерительные электроды, заглубляемые в почву, находятся на постоянном фиксированном расстоянии друг от друга и постепенно перемещаются вдоль линии на поверхности почвы. На каждом шаге регистрируется значение УЭС. Набор результатов всех этих измерений на первом межэлектродном расстоянии дает один профиль значений УЭС (первую линию ГЭП). Вторая измерительная линия формируется при увеличении расстояния между электродами, после чего УЭС измеряется повторно. Увеличение расстояния между электродами позволяет проводить исследования на большей глубине. Поскольку распределение тока зави-

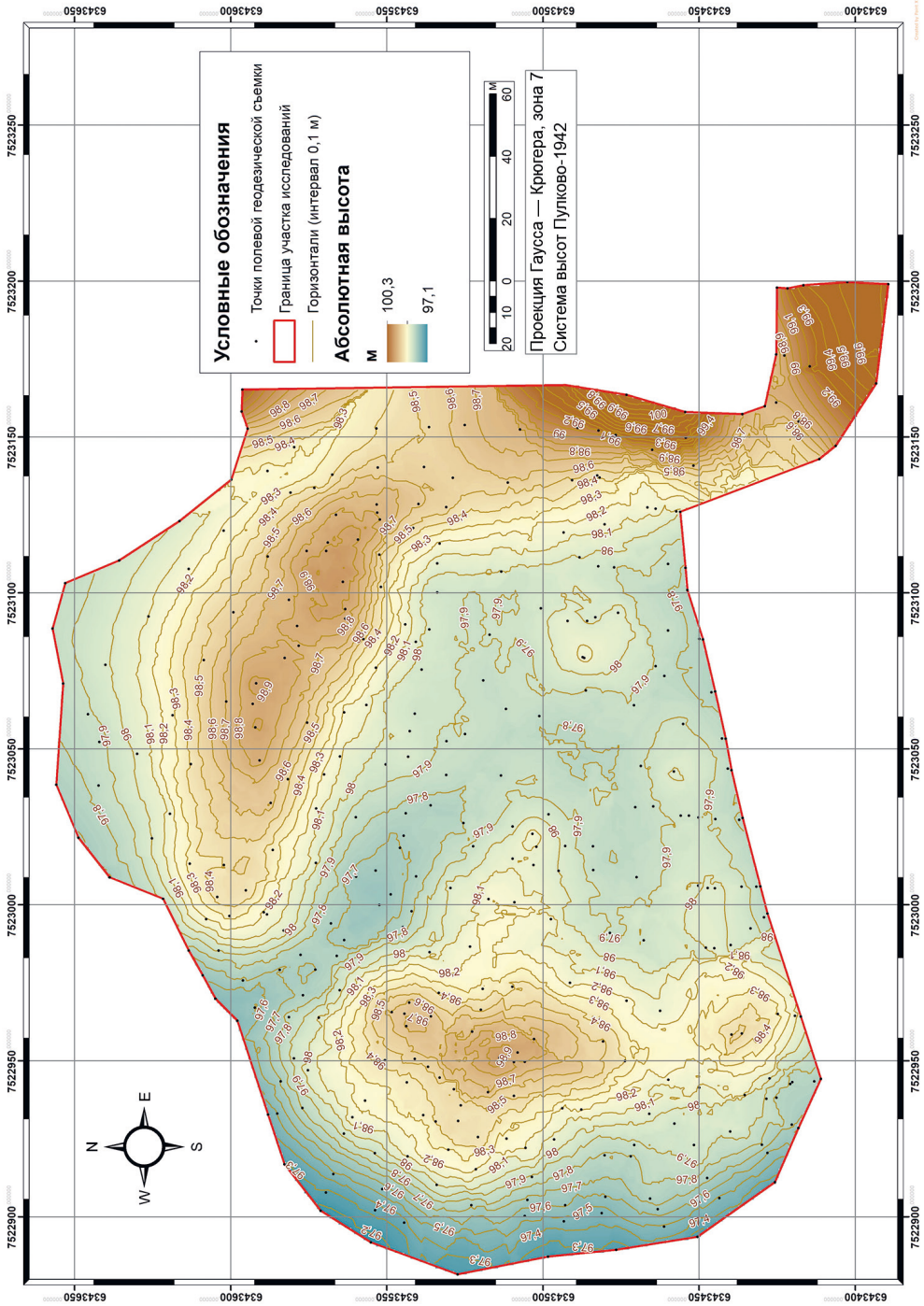


Рис. 2. Рельеф участка исследований

сит от гетерогенности среды, то измеренное таким способом значение УЭС называется кажущимся (Поздняков, 2009) и обозначается ER_k , а глубина исследования — «псевдоглубиной» (Samouëlian et al., 2005).

ГЭП производилось при помощи портативного прибора LandMapper-01 с четырехэлектродной схемой измерений в конфигурации Wenner, т. е. с равными расстояниями между электродами $AM = MN = NB$. Межэлектродное расстояние равнялось для первой линии измерений 0,5 м, для второй — 1,0 м. Таким образом, расстояние между питающими электродами А и В равнялось 1,5 и 3,0 м, между приемными электродами М и N — 0,5 и 1,0 м соответственно (рис. 3). Глубина исследования при таком расположении электродов приблизительно оценивается как $1/3$ расстояния АВ (Поздняков, 2009) и, следовательно, охватывает почвенную толщу мощностью 0,5 и 1,0 м. Шаг сетки составлял примерно 5 м и корректировался в зависимости от местоположения характерных точек рельефа. На площади приблизительно 2,3 га массив данных ER_k включает 265 точек. В каждой точке выполнено по пять повторных измерений УЭС.

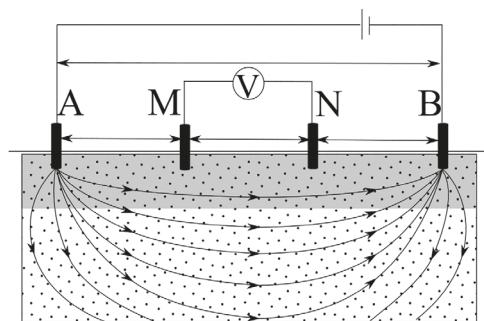


Рис. 3. Четырехэлектродная схема измерения сопротивления по Позднякову (2009)

2.3. Лабораторные методы исследования

Образцы почвы отбирались из двух почвенных разрезов (точки «В-1» и «В-2» на рис. 1), расположенных в непосредственной близости от Варницкого колодца с соленой водой, из каждого генетического горизонта до глубины залегания ГВ. В лабораторных условиях измерялось истинное УЭС (ER_i) во влажных образцах почвы, насыщенных дистиллированной водой до состояния верхнего предела текучести. ER_i измерялось в кювете с площадными электродами с повторностью 15 раз по методике, описанной в пособии (Поздняков, 2009).

В этих же образцах определялось содержание солей. Концентрация легкорастворимых солей определялась стандартными методами в водной вытяжке (почва : вода = 1 : 5), в том числе SO_4^{2-} , сухой и прокаленный остаток — весовым, Cl^- — аргентометрическим, общая щелочность и щелочность от водорастворимых карбонатов — титриметрическим, Ca^{2+} и Mg^{2+} — комплексометрическим методом. Концентрации Na^+ и K^+ измерялись в непрерывном пламени на приборе Shimadzu AA-7000, работающем в режиме эмиссии. Содержание SO_4^{2-} гипса находилось весовым методом в солянокислой вытяжке, CO_2 карбонатов — по убыли массы навески вследствие обработки 5 н. раствором HCl.

Устойчивость солевого профиля почвы и интенсивность миграции ионов за пределы ландшафта оценивались путем выявления тенденции распределения солей по генетическим горизонтам в зависимости от водного режима гидроморфных почв. Для этого анализ водной вытяжки и измерения УЭС в водонасыщенной пасте выполнялись с кратностью 1 раз в сезон в течение календарного года (с сентяб-

ря 2016 по сентябрь 2017 г.). В грунтово-дренажных водах (точки «ДК1», «ДК2»), эфемерном озере, появляющемся на участке в периоды интенсивного стока (точка «Озерцо»), и сопряженных с ландшафтом водотоках (р. Ишня — «Т1 Ишня», «Т2 Ишня», оз. Неро — «Т оз. Неро») проводились гидрохимические исследования и измерение УЭС в течение этого же периода исследований. Пробы речной воды отбирались в створах, расположенных выше («Т2 Ишня») и ниже («Т1 Ишня») по течению от источника и спуска дренажных вод.

3. Результаты

3.1. Результаты измерения истинного удельного электрического сопротивления

По результатам анализа проб двух почвенных разрезов Варницкого участка в течение пяти сезонов мониторинга получен массив экспериментальных данных солевого состояния профилей (данные анализа водной вытяжки почвы) и Е_{Ри}. Всего проанализированы пробы из пяти горизонтов в каждом разрезе (почвенный профиль до уровня ГВ, в среднем 0,30–0,35 м) в течение всех сезонов года (с сентября 2016 г. по июнь 2017 г.). В пятый сезон отбора проб (сентябрь 2017 г.) уровень ГВ опустился (0,7 м), что позволило вскрыть почвенный профиль на большую глубину; были отобраны пробы из семи горизонтов в разрезе «В-1» и из шести горизонтов в разрезе «В-2». Горизонты представлены гумусовыми (АУ) и квазиглеевыми горизонтами (Q). Таким образом, для обработки принята выборка из 53 значений по каждому показателю. Основные параметры, описывающие массив, приведены в табл. 1. Минимальное значение Е_{Ри} характерно для верхнего гумусового горизонта и соответствует одному из периодов наиболее интенсивного соленакопления — зимней межени (дата отбора 30 января 2017 г.). Максимальное значение Е_{Ри} зафиксировано в окисленно-квазиглеевом горизонте (разрез «В-2», 0–6 см) с наиболее низким содержанием легкорастворимых солей, карбонатов и гипса. Во все сезоны мониторинга этот горизонт отличается минимальными концентрациями солей и более высоким показателем Е_{Ри}. Среднее значение Е_{Ри} для генеральной совокупности данных по обоим разрезам — 10,9 Ом·м соответствует среднему значению суммы солей — 1,5 %. Величина Е_{Ри} значительно изменяется в течение года, о чем свидетельствует коэффициент вариации этого показателя, равный 58,4 % (табл. 1).

По абсолютным значениям содержания в водной вытяжке почвы (ммоль-экв/100 г почвы) в составе солей доминировали SO₄²⁻ и Ca²⁺, второстепенными были Cl⁻ и Na⁺. По значениям коэффициента вариации можно заключить, что квазистационарное солевого состояние полигона исследований определяется ионами SO₄²⁻ и Ca²⁺ (коэффициенты вариации соответственно 19,0 и 13,5 %), а сезонные колебания обязаны ионам Cl⁻ и Na⁺ (коэффициенты вариации соответственно 91,7 и 95,9 %), концентрация которых в почвенном растворе и твердой фазе наиболее всего зависит от водно-солевого режима почвы.

Чтобы выявить зависимость между Е_{Ри} и параметрами, характеризующими засоление почв, рассчитаны коэффициенты корреляций (табл. 2). Значениям рН предварительно возвращены значения активности ионов [H₃O⁺] путем обратно-

логарифмического перевода. По итогам корреляционного анализа (для $n = 53$) установлено, что значения ERu имеют тесную обратную корреляцию с содержанием сухого и прокаленного остатка, ионов SO_4^{2-} и Ca^{2+} , общей суммой солей. Оцененный вклад этих показателей по значению R составил соответственно $-0,71$, $-0,62$, $-0,69$, $-0,67$, $-0,70$. Сами коэффициенты корреляции R имеют близкие значения. Существенность значений R проверялась путем сравнения с критерием Стьюдента t для 1%-го уровня значимости. Расчетные критерии t для полученных коэффициентов корреляции больше критического значения t для заданного уровня значимости, тем самым демонстрируется существенность связи.

Корреляционный анализ данных макрокомпонентного состава и значений ERu грунтово-дренажных вод полигона исследований и воды сопряженных с участком водотоков (р. Ишня, оз. Неро), отобранных в разные периоды годового гидрологического цикла ($n = 32$), показал (табл. 3), что ERu имеет высокие отрицательные коэффициенты корреляции с сухим и прокаленным остатком, общей минерализацией, концентрациями отдельных ионов (Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+). Соответствующие коэффициенты корреляции значимы на 1%-ном уровне значимости. При этом сезонное изменение уровня минерализации в воде обусловлено в первую очередь изменением содержания Cl^- и Na^+ , наиболее тесную корреляцию ERu имеет с концентрациями SO_4^{2-} и Ca^{2+} . В целом же близкие коэффициенты корреляции ERu с макрокомпонентами химического состава исследованных вод подтверждают, что по данным УЭС можно судить, скорее, об общей минерализации воды, нежели чем о содержании отдельных ионов (Манштейн, 2002).

Касааясь вопроса границ засоления ландшафта, упомянем, что сейчас оно сосредоточено на наиболее пониженных участках, тогда как до проведения нескольких этапов мелиоративных мероприятий в Ростовском районе засоление имело более масштабный характер. Вероятно, и здесь оно выходило за пределы современного ареала распространения. Важно обратить внимание, что в профилях фоновой почвы содержатся горизонты с суммой солей немногим более 0,1% и, следовательно, ее можно классифицировать как слабозасоленную. При таких низких концентрациях солей в фоновой почве (в агроземе) другие почвенные свойства сказываются сильнее на профильном распределении УЭС по сравнению с засоленностью. Значения ERu в пределах верхней толщи (0–40 см) варьируют в диапазоне 44–47 Ом·м, в нижней (40–100 см) — в диапазоне 23–31 Ом·м и, по-видимому, такое разделение профиля по показателю ERu связано с гранулометрическим составом отложений. В нижней более тяжелой по гранулометрическому составу части двучленной почвообразующей породы, на которой сформирована фоновая почва, обеспечивается дополнительная электрическая проводимость, что отражается на показателе дифференциации профиля — значении ERu . По крайней мере, для представленного почвенного профиля фоновой почвы мы имеем тесную обратную корреляцию этого параметра с содержанием физической глины ($R = -0,93$; расчетный t -критерий более t -критерия Стьюдента для 1%-го уровня значимости), тогда как его связь с суммой солей слабая ($R = -0,22$; расчетный t -критерий меньше, чем t -критерий для 1%-го уровня значимости). На этом примере хорошо демонстрируется приоритетность различных факторов влияния на значение ERu в каждом конкретном случае.

Таблица 1. Статистические характеристики массива данных (n = 53) солевого состояния и ERи почвенных разрезов (гумусовые и квазиллеевые горизонты)

Параметр	ERи Ом·м	pH	Сух. ост.	Прокал. ост.	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ сол	CO ₂ карб	SO ₄ ²⁻ гипса
%														
Минимум	1,4	6,4	0,76	0,19	0,17	0,27	11,87	10,55	0,56	0,37	0,01	0,99	0,88	0,88
Максимум	25,2	7,7	2,82	2,43	2,17	19,85	25,64	18,98	4,41	23,00	0,36	2,93	17,30	17,30
Среднее	10,9	7,1	1,52	1,14	0,58	4,79	17,43	15,48	1,73	4,95	0,19	1,49	7,95	7,95
Медиана	9,3	7,1	1,48	1,07	0,41	3,52	16,81	15,48	1,55	3,89	0,19	1,41	7,02	7,02
Дисперсия	40,4	0,1	0,03	0,06	0,21	19,21	10,75	4,52	0,77	22,11	0,01	0,02	10,62	10,62
Станд. отклон.	6,4	0,3	0,17	0,25	0,46	4,38	3,28	2,13	0,88	4,70	0,11	0,14	3,26	3,26
Коэффициент вариации, %	58,4	4,3	10,99	21,5	78,95	91,60	18,81	13,74	50,81	95,07	56,32	9,20	41,02	41,02

Таблица 2. Таблица корреляций между ERи и параметрами засоленности почв

pH	Сух. ост.	Прокал. ост.	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ сол	CO ₂ карб	SO ₄ ²⁻ гипса
%												
-0,30	-0,71	-0,62	-0,19	-0,46	-0,69	-0,67	-0,54	-0,48	-0,26	-0,70	-0,50	-0,52

Таблица 3. Таблица корреляций между ERи и данными макрокомпонентного состава исследованных вододелов и грунтово-дренажных вод

pH	Сух. ост.	Прокал. ост.	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Минерализация
0,15	-0,84	-0,84	-0,14	-0,83	-0,88	-0,87	-0,85	-0,83	-0,84	-0,85

3.2. Результаты горизонтального электрического профилирования участка

При помощи программы ArcGIS версии 10.2.1 создана карта, на которой отмечены значения ER_k для первой и второй линий измерений ГЭП, соответствующих расстояниям между электродами 0,5 и 1,0 м (рис. 4, а и б). В качестве растровой основы для нанесения точек УЭС использовалась описанная выше ЦМР (см. рис. 2).

В пределах массива данных ER_k для обоих электрических профилей выявлено пять пар точек с экстремально высокими (90–500 Ом·м) для данной территории значениями УЭС. Эти точки воспринимались как «выбросы», относящиеся к элементам техногенных нарушений рельефа. Остальные значения генеральной совокупности значений ER_k укладываются в диапазон 0–90 Ом·м, а наиболее часто встречающиеся значения — в диапазон 0–20 Ом·м (155 точек из 265) для профиля с расстоянием между электродами 0,5 м. Для профиля с расстоянием между электродами 1,0 м значения ER_k лежат в интервале 0–51 Ом·м, а наиболее часто встречающиеся значения — в интервале 0–20 Ом·м (201 точка из 265) и примерно половина значений из совокупности принадлежит интервалу 0–10 Ом·м (124 точки из 265). Мода для межэлектродного расстояния 0,5 м составила 23 Ом·м, а для 1,0 м — 11 Ом·м. Оценка разности средних сопряженных выборок из рядов ER_k (0,5 м) и ER_k (1,0 м) показала, что различия между ними значимы. Существенность разности оценивалась по t -критерию Стьюдента. В 83% случаев ряд значений ER_k при расстоянии между электродами 1,0 м представлен более низкими значениями УЭС по сравнению с рядом значений ER_k при расстоянии между электродами 0,5 м. Коэффициент корреляции между рядами — 0,94, взаимосвязь рассматривается как тесная, он значим для 1%-го уровня значимости (расчетный t -критерий больше теоретического).

В ходе анализа выяснено, что генеральная совокупность данных ER_k для межэлектродного расстояния 0,5 и 1,0 м не соответствует требованиям существенной корреляции между измеренными значениями высот и кажущимся УЭС. Коэффициенты корреляции равны 0,22 и 0,25 для межэлектродного расстояния 0,5 м и 1,0 м, соответственно. Учитывая многофакторный характер показателя УЭС, есть основания предполагать неоднородность дисперсии этой величины, вызванную процессами почвообразования, вертикальной и латеральной миграцией солей, влиянием микрорельефа и антропогенных включений, очаговыми выходами солевых вод, поэтому из экспериментальных данных были исключены 5 пар значений (из 265) в точках измерений, где измеряемая толщина включала фрагменты артефактов, из-за чего скачкообразно увеличивались значения ER_k . В то же время перепад высот на участке очень мал, поэтому данные, полученные при детальной топографической съемке, были преобразованы в стратифицированную выборку, содержащую только 152 значения абсолютных высотных отметок из 265, как наиболее «контрастные». В этом случае коэффициенты корреляции абсолютных высот с соответствующими им значениями ER_k составили 0,56 и 0,58 при межэлектродном расстоянии 0,5 и 1,0 м соответственно; коэффициент корреляции значим для 1%-го уровня значимости. При дальнейшем сужении диапазона выборки абсолютных высот до 40 значений, наиболее близких к максимуму и минимуму, коэффициент

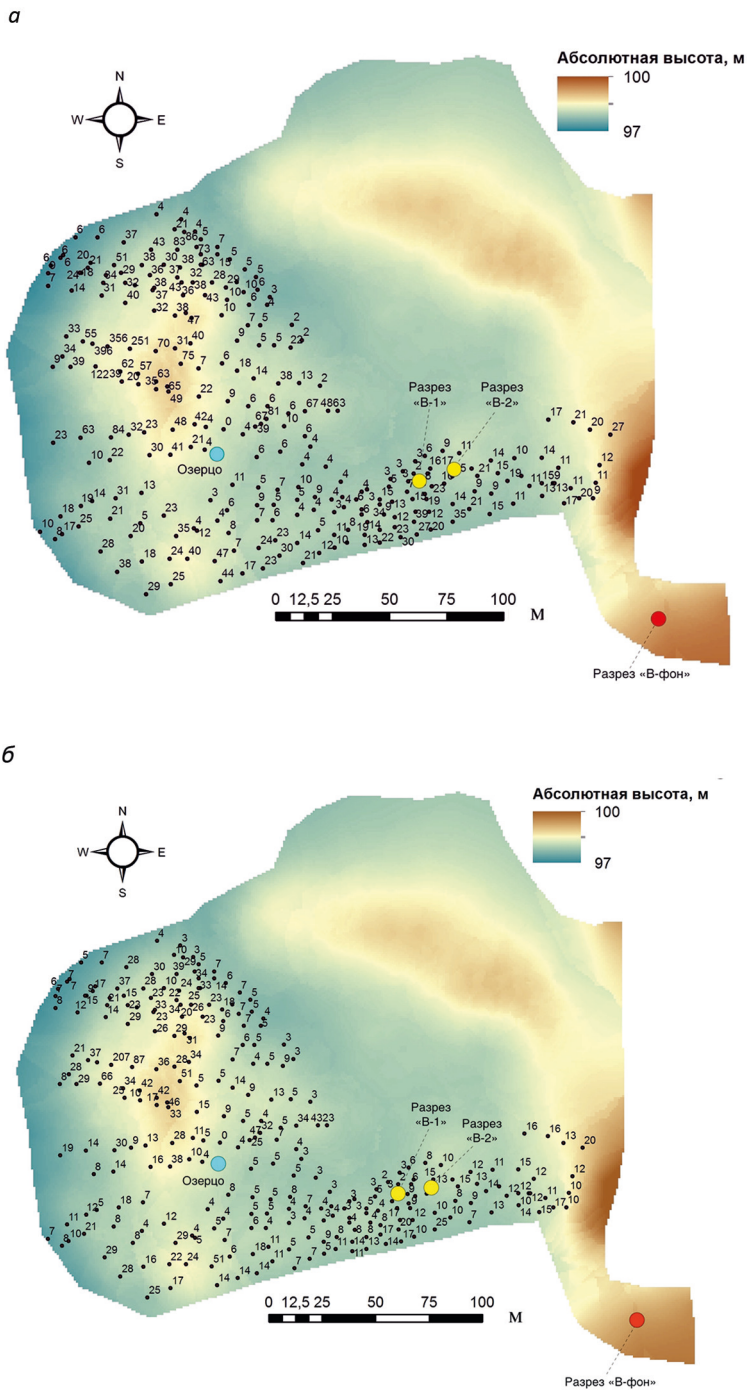


Рис. 4. Результаты ГЭП на территории исследования, Ом · м.

Значения округлены до целых чисел и совмещены с картой высот;
а и б — для межэлектродного расстояния 0,5 и 1,0 м соответственно

корреляции увеличился до 0,75 (что значимо для 1 %-го уровня значимости), это позволяет говорить о зависимости ER_k от параметров рельефа.

4. Обсуждение результатов

4.1. Истинное удельное электрическое сопротивление

Проведенные в течение пяти сезонов мониторинга электрофизические исследования двух почвенных разрезов в пределах гидроморфного Варницкого ландшафта демонстрируют значения ER_i в интервале 1–25 Ом · м (табл. 1), характерном для солончаков (Pozdnyakov, 2008a). В то же время в гумидном климате, в условиях которого засоление почв — редкость, по литературным данным, такие низкие значения УЭС могут быть получены в глинах (1–100 Ом · м) (Майнштейн, 2002; Поздняков, 2009), глеевых (30–50 Ом · м) (Pozdnyakov, 2008a) и торфяных (11–37 Ом · м) горизонтах гидроморфных почв (Pozdnyakov, 2008b). Кроме того, данные, полученные в ходе электрофизической съемки методом вертикального электрического зондирования в прибрежной полосе оз. Неро, в границах г. Ростова Великого (Smernikov et al., 2008), показали близкие к нашим значениям ГЭП и ER_i (менее 25 Ом · м в грунтовой толще). Однако в отсутствие информации о засолении почвы на изучаемой территории упомянутые авторы интерпретировали низкие значения этих параметров как результат переувлажнения почвенно-грунтовой толщи

Таким образом, измеренные нами значения ER_i покрывают диапазон и засоленных почв, и почв болотного типа почвообразования, поэтому важно было выяснить, насколько электрические параметры в данном случае соответствуют именно засоленности, а не являются результатом гидроморфной консервации органического вещества, глеевого процесса и/или тяжелого гранулометрического состава.

В качестве аргумента в пользу того, что низкие значения УЭС обусловлены процессами ландшафтного засоления, можно принять следующее: для интересующего нас показателя ER_i статистически установлено наличие тесной обратной корреляции с сухим и прокаленным остатком, общей суммой солей, содержанием ионов SO_4^{2-} и Ca^{2+} , обеспечивающих метастабильное солевое состояние профиля. К этому добавляется значительное стандартное отклонение ER_i в течение годового цикла исследований, которое указывает на зависимость электрических параметров главным образом от какого-либо динамично изменяющегося во времени показателя, характеризующего свойства почвы. Такой динамичной величиной могла бы быть влажность, но в силу принятого методологического подхода при измерении УЭС в диапазоне капиллярной и гравитационной влаги последняя не оказывает значимого влияния на ER_i (McCarter, 1984; Pozdnyakov et al., 2006). Тем не менее, в гидроморфных позициях водный режим почвы, установившийся на момент обследования, задает направление перемещения солей в почвенном профиле и, если исходить из представления о засоленности, как об основном факторе, определяющем УЭС, то ясно, что в экспериментальном ряду, полученном для двух разрезов участка исследований, изменения значений ER_i должны иметь сезонный характер. Действительно, наиболее низкие значения ER_i принимает в периоды зимней и летней межени, когда сумма солей во всех горизонтах профиля велика, а наиболее высокие — в периоды повышенного стока и нисходящей миграции солей. Та же тен-

денция, только еще более выраженная, отмечается для грунтово-дренажных вод и исследованных водотоков.

Попутно отметим, что для почвы в отличие от водотоков отсутствует тесная корреляция ER_u с содержанием активных ионов Cl^- и Na^+ , обеспечивающим динамичность почвенного солевого профиля в течение года. Объяснение этому авторы видят в «электрическом забуферивании» почвы, которое, по мнению А.И. Позднякова (2008), имеет место в почвах черноземного, органо-аккумулятивного, гидроморфного и солончакового типов, поскольку им присуще накопление вещества и отсутствие текстурной дифференциации почвенного профиля. Причиной электрического забуферивания почвы в нашем случае можно считать ее формирование в условиях ландшафта аккумулятивного типа. Преобладание накопления веществ (органических, легкорастворимых солей, карбонатов, гипса, соединений железа) над их выносом подразумевает менее дифференцированный электрический профиль, который менее чувствителен к сезонной миграции растворов, чем профиль распределения солей.

4.2. Горизонтальное электрическое профилирование

В результате электрофизической почвенной съемки участка исследований методом ГЭП получены низкие значения ER_k для большинства точек измерений (рис. 5). Средние значения ER_k при межэлектродном расстоянии 0,5 м — 20,6 Ом·м, при межэлектродном расстоянии 1,0 м — 13,7 Ом·м.

Низкие значения ER_k , как и в случае с ER_u , мы связываем с засоленностью почвы. Действительно, химический состав ГВ на участке исследований формируется за счет инфильтрации метеорных вод и подпитки высокоминерализованными водами с более глубоких водоносных горизонтов. Собственно минерализация ГВ и их уровень залегания, т. е. положение зеркала ГВ в почвенном профиле, рассматриваются здесь как основной фактор засоления почвенного покрова.

Вследствие гидроморфности условий почвообразования микрорельеф регулирует границу зоны насыщения и аэрации в почвенном профиле, а значит, и уровень засоления, особенно он будет влиять на перенос солевых масс и перераспределение солей в верхней полуметровой толще. Таким образом, при интерпретации варьирования значений ER_k в горизонтальном простирании предполагалось, что на уровне элементарного пониженного ландшафта, литологически и минералогически однородного, различие значений УЭС, полученных путем последовательных измерений с помощью электродной матрицы постоянной геометрии, может быть вызвано латеральным перемещением ГВ (Gunn et al., 2015) и, следовательно, будет зависеть от высоты поверхности в точке измерения. Однако корреляционный анализ не выявил тесной связи между абсолютными высотами и значениями УЭС, измеренными методом ГЭП. Мы предполагаем, что полученные низкие коэффициенты корреляции связаны с незначительным перепадом абсолютных отметок на участке исследования и малым уклоном депрессионной кривой уровня ГВ — абсолютные высотные отметки поверхности, на которой проводилось ГЭП, меняются от 97,2 до 98,9 м (см. рис. 5). Контраст высот в пределах изученной поверхности оказался недостаточным, чтобы выявить неоднородности в площадном засолении, связанные непосредственно с рельефом. Значения сигнала, полученные при помо-

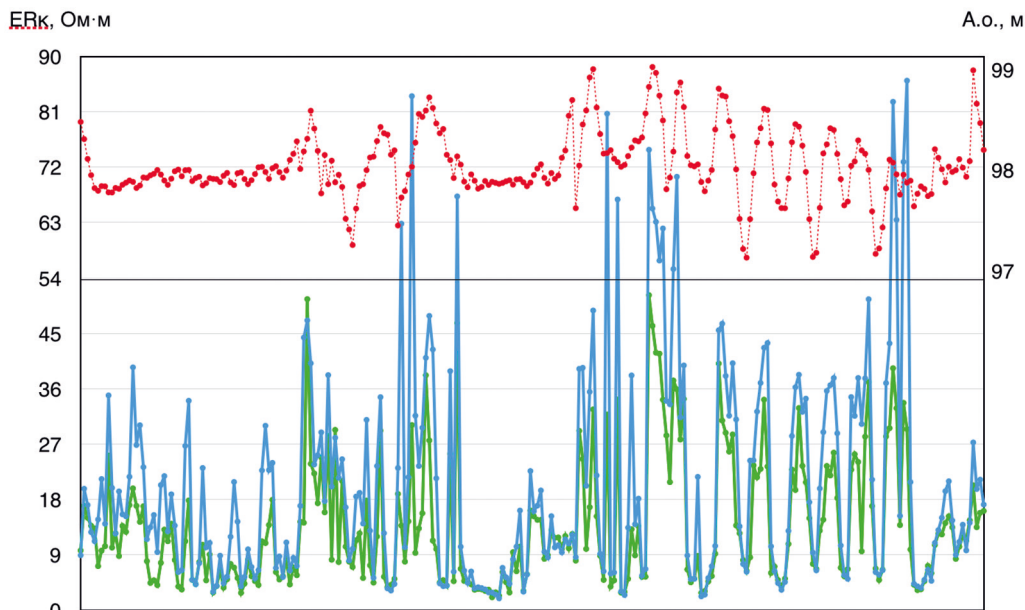


Рис. 5. Вариограмма значений ER_k (для межэлектродного расстояния 0,5 (голубая кривая) и 1,0 м (зеленая кривая) и для абсолютной высоты (красная кривая) на участке исследований

щи ГЭП, отражают и горизонтальную, и вертикальную неоднородность характеристик влажности почвы, плотности ее сложения, текстурной дифференциации, содержания органического вещества и др. Эти переменные вносят высокий фоновый шум, препятствующий установлению тесной корреляции ER_k с абсолютными отметками высот.

Бóльшие значения как самих ER_k , так и коэффициента корреляции между ER_k и высотными отметками для первой линии ГЭП по сравнению с теми же показателями для второй линии ГЭП объясняются при допущении, что псевдоглубина измерений (или радиус полусферического пространства, охватываемого измерениями) оценивается приблизительно как $1/3$ расстояния между питающими электродами АВ (см. рис. 3). В преобладающем большинстве точек первой линии ГЭП (псевдоглубина 0,5 м) измерения охватывают вадозную зону, на второй линии ГЭП (псевдоглубина 1,0 м) в объем исследования включаются водоносный горизонт и нижележащие минеральные квазиглеевые горизонты. Неоднородность УЭС среды при заданном масштабе измерений является артефактом, вызванным усреднением различных значений электрического сопротивления отдельных слоев почвенного профиля (Yeh et al., 2002). Поскольку УЭС каждого слоя может варьироваться в зависимости от разных переменных, то соответствующим образом будет меняться значение усредненного объемного УЭС. При небольшой разнице в содержании солей по профилю с высокой долей вероятности это значение УЭС будет меньше для второй линии ГЭП с учетом измерений в среде, более насыщенной поровой влагой с высокой минерализацией.

Выводы

1. При одновременном протекании в почве процессов соленакопления, торфообразования, оглеения низкие значения УЭС (менее 10 Ом·м в органических горизонтах и 5–10 Ом·м в нижних квазиглеевых горизонтах) обусловлены в первую очередь содержанием солей, а потом уже всеми остальными указанными факторами. В поддержку этого утверждения выступает то, что полученные экспериментальные ряды характеризовались значимыми коэффициентами корреляции ER_u с показателями засоленности почвы участка исследований, грунтово-дренажных вод и прилегающих водотоков. Это обстоятельство наряду с откликом ER_u на изменение степени засоленности почвы и уровня минерализации воды в течение года, подтверждает, что ER_u является диагностическим критерием ландшафтного засоления.
2. В качестве инструмента при рекогносцировочных исследованиях для выявления ареалов засоления в гумидной зоне, получения данных о степени засоленности и распределении солей в рельефе обосновано применение показателя ER_k .
3. С учетом многофакторности показателя УЭС, при слабой степени почвенного засоления содержание солей не оказывает ощутимого влияния на его значения по сравнению с другими базисными свойствами почвы.
4. Эффект электрического забуферивания в почве (в отличие от воды) мешает установить четкую связь ER_u с содержанием активных агентов гидроморфного типа засоления — ионов Cl^- и Na^+ .
5. Ареал засоления гидроморфного солончакового ландшафта определяется путем ГЭП по обоим профилям (для межэлектродных расстояний 0,5 и 1,0 м), обеспечивающим измерение до глубины грунтовых вод и ниже. Тесной взаимосвязи значений ER_k и рельефа (по абсолютным отметкам высот), которая отражала бы зависимость между степенью засоления и уровнем грунтовых вод, установить не удалось. Измерения проводились на площади с незначительным перепадом высот, поэтому разрешение значений ER_k было недостаточным для выделения рельефа в качестве основного фактора, обуславливающего пространственное варьирование электрических параметров почвы. В то же время полученные коэффициенты линейной корреляции между этими величинами не позволяют отрицать влияния фактора рельефа на перераспределение солей.

Литература

- Вашукевич Н. В., Гюлалыев Ч. Г., Куклина С. Л., 2017. Диагностика почв зоны экологического мониторинга озера Байкал с использованием электрофизического метода. Аграрный вестник Урала 156, 14–19.
- Кондрашкин, Б. Е., Поздняков, А. И., Самсонова, В. П., Кондрашкина, М. И., 2011. Оценка зависимости удельного электрического сопротивления от базисных свойств агросерых почв Брянского ополья. Вестник Моск. ун-та. Серия 17: Почвоведение (2), 36–39.
- Кошелев, А. А., Щербаков, С. И., Елизаров, Ю. Е., 2012. Картографирование почв полей методом электрического зондирования. Нива Поволжья 4, 51–57.
- Манштейн, А. К., 2002. Малоглубинная геофизика. Изд-во Новосибирск. ун-та Новосибирск.
- Новский, В. А., 1975. Плейстоцен Ярославского Поволжья. Наука, Москва.

- Поздняков, А. И., 2009. Электрофизические методы исследования почв, методическое пособие. Москва.
- Поздняков, А. И., Елисеев, П. И., Русаков, А. В., 2012. Электрическое сопротивление как возможный показатель окультуренности пахотных супесчаных почв гумидной зоны. Вестник Моск. ун-та. Серия 17. Почвоведение 2, 54–60.
- Рохмистров, В. Л., 1968. Подземные воды Ярославского района. Краеведение. Ученые записки ЯГПИ 71, 73–92.
- Субботина, М. Г., Хорхе, Б. С., 2013. Об электропроводности почв в современных исследованиях. Пермский аграрный вестник 3(3), 28–33.
- Gunn, D. A., Chambers, J. E., Uhlemann, S., Wilkinson, P. B., Meldrum, P. I., Dijkstra, T. A., Haslam, E., Kirkham, M., Wragg, J., Holyoake, S., Hughes, P. N., Hen-Jones, R., Glendinning S., 2015. Moisture monitoring in clay embankments using electrical resistivity tomography. Construction and Building Materials 92, 82–94. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.007>
- McCarter, W. J., 1984. The electrical resistivity characteristics of compacted clays. Geotechnique 34(2), 263–267.
- Pozdnyakov, A. I., 2008a. Electrical parameters of soils and pedogenesis. Eurasian Soil Science 41(10), 1050–1058. URL: <https://doi.org/10.1134/S1064229308100062>
- Pozdnyakov, L. A., 2008b. Estimation of the biological activity of peat soils from the specific electrical resistance. Eurasian Soil Science 41(10), 1077–1082. URL: <https://doi.org/10.1134/S1064229308100098>
- Pozdnyakov, A. I., Pozdnyakova, L. A., Karpachevskii, L. O., 2006. Relationship between water tension and electrical resistivity in soils. Eurasian Soil Science 39(1), 78–83. URL: <https://doi.org/10.1134/S1064229306130138>
- Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., Richard, G., 2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review. Soil and Tillage research 83(2), 173–193. URL: <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004>
- Smernikov, S. A., Pozdnyakov, A. I., Shein, E. V., 2008. Assessment of soil flooding in cities by electrophysical methods. Eurasian Soil Science 41(10), 1059–1065. URL: <https://doi.org/10.1134/S1064229308100074>
- Soil salinity assessment: Methods and interpretation of electrical conductivity measurements, 1999. FAO Irrigation and Drainage Paper 57. FAO, Rome. URL: <http://www.fao.org/docrep/019/x2002e/x2002e.pdf> (дата обращения: 25.01.2019).
- Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual, 2014. Soil Survey Investigations Report 51(2). URL: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1244466.pdf (дата обращения: 25.01.2019).
- Status of the World's Soil Resources (SWSR). Main Report, 2015. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome.
- Yeh, T. C. J., Liu, S., Glass, R. J., Baker, K., Brainard, J. R., Alumbaugh, D., LaBrecque, D., 2002. A geostatistically based inverse model for electrical resistivity surveys and its applications to vadose zone hydrology, Water Resources Research 38(12), 14–1–14–13. URL: <https://doi.org/10.1029/2001WR001204>

Статья поступила в редакцию 17 июля 2018 г.
Статья рекомендована в печать 7 декабря 2018 г.

Контактная информация:

Симонова Юлия Владимировна — uvsim@yandex.ru
 Русаков Алексей Валентинович — a.rusakov@spbu.ru
 Рюмин Александр Георгиевич — a.ryumin@spbu.ru
 Беляев Владимир Ростиславович — vladimir.r.belyaev@gmail.com

Diagnosis and character of hydromorphic salinization of the “Varnicy” landscape (Rostov Veliky, Yaroslavskaia oblast’): experience and methodology of geo-electric methods application

J. V. Simonova¹, A. V. Rusakov¹, A. G. Ryumin¹, V. R. Belyaev²

¹ Saint Petersburg State University,
7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

² Moscow State University,
1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russian Federation

For citation: Simonova, J. V., Rusakov, A. V., Ryumin, A. G., Belyaev, V. R., 2019. Diagnosis and character of hydromorphic salinization of the “Varnicy” landscape (Rostov Veliky, Yaroslavskaia oblast’): experience and methodology of geo-electric methods application. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 64 (1), 81–99. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.105> (In Russian)

The main objective of this study is to find out the application of electrical resistivity measured in water saturated soil (ER) as a proxy to soil salinity assessment within a humid climate landscape located in the center of the Russian plain. The issue is not the only salinization, but some other processes controlling the soil formation can influence the ER significantly. These processes attributed to the phreatic water salinization are waterlogging, soil organic carbon accumulation, carbonate and gypsum sedimentation. For evaluation of landscape salinity of the nature reserve “Solyanoj istochnik Varnicy”, where saline spring discharging, soil and water samples were collecting five times during an annual monitoring study (2016–2017). The samples from the two soil pits and water samples from the spring, groundwater and surface water draining the local catchment were analyzed in terms of the relationship between the ER values and major ions concentrations. Correlation analysis revealed a close relationship between the values of ER and TDS, calcium and sulfate content in the soil water extract. At the same time, parametric statistical analysis found that seasonal fluctuations of ER were due to short-term fluctuations in sodium and chloride concentrations. The ER values measured in the drainage and groundwater of the study site were more sensitive as compared with the soil to changes in the salinity level during the annual hydrological cycle. A high correlation coefficient was observed between the ER and both the total salt content and the major ions concentrations in water samples. Geospatial salinity variation and salinization area were detected by horizontal electric profiling (HEP) within the site previously covered with detailed geodetic surveys. With an example of the hydromorphic Varnicky section in the humid climate it was shown that high soil salinity plays a main role in the resistivity value formation compared with other factors. The electrophysical parameters can be reliable indicators in monitoring studies of landscape salinity.

Keywords: Varnicy, Nero lake, soil salinity mapping, specific electric resistivity, horizontal electric profiling, soil, salinity, humid climate.

References

- Gunn, D. A., Chambers, J. E., Uhlemann, S., Wilkinson, P. B., Meldrum, P. I., Dijkstra, T. A., Haslam, E., Kirkham, M., Wragg, J., Holyoake, S., Hughes, P. N., Hen-Jones, R., Glendinning S., 2015. Moisture monitoring in clay embankments using electrical resistivity tomography. *Construction and Building Materials* 92, 82–94. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.007>.
- Kondrashkin, B. E., Pozdnyakov, A. I., Samsonova, V. P., Kondrashkina, M. I., 2011. Otsenka zavisimosti udel'nogo elektricheskogo soprotivleniia ot bazisnykh svoistv agroserykh pochv Brianskogo opol'ia [Electrical resistivity of arable grey forest soils at Bryansk Opol'e region]. *Vestnik Mosk. un-ta. Seriya 17. Pochvovedenie* [Vestnik of Moscow University. Series 17. Soil Science] (2), 36–39. (In Russian)
- Koshelev, A. A., Shcherbakov, S. I., Elizarov, Yu. E., 2012. Kartografirovaniye pochv polei metodom elektricheskogo zondirovaniia [Mapping of soil fields by the method of electrical sounding]. *Niva Povolzh'ia* 4, 51–57. (In Russian)

- Manshtejn, A. K.*, 2002. Maloglubinnaia geofizika [Shallow geophysics]. Izd. Novosibirsk. un-ta, Novosibirsk. (In Russian)
- McCarter, W. J.*, 1984. The electrical resistivity characteristics of compacted clays. *Geotechnique* 34(2), 263–267.
- Novskij, V. A.*, 1975. Pleistotsen Iaroslavskogo Povolzh'ia [Pleistocene in the Upper Volga region]. Nauka, Moscow. (In Russian)
- Pozdnyakov, A. I.*, 2008a. Electrical parameters of soils and pedogenesis. *Eurasian Soil Science* 41(10), 1050–1058. URL: <https://doi.org/10.1134/S1064229308100062>
- Pozdnyakov A. I.*, 2009. Elektrofizicheskie metody issledovaniia pochv [Electrophysical methods of soil investigation]. Izd-vo Mosk. un-ta, Moscow. (In Russian)
- Pozdnyakov, A. I., Eliseev, P. I., Rusakov, A. V.*, 2012. Elektricheskoe soprotivlenie kak vozmozhnyi pokazatel' okul'turennosti pakhotnykh supeschanykh pochv gumidnoi zony [Electrical resistivity as a possible index of cultivation of arable sandy loamy soils of the humid zone]. *Vestnik Mosk. un-ta (Serii Pochvedenie)* [Vestnik of Moscow University (Series Soil Science)] 2, 54–60. (In Russian)
- Pozdnyakov, A. I., Pozdnyakova, L. A., Karpachevskii, L. O.*, 2006. Relationship between water tension and electrical resistivity in soils. *Eurasian Soil Science* 39(1), 78–83. URL: <https://doi.org/10.1134/S1064229306130138>
- Pozdnyakov, L. A.*, 2008b. Estimation of the biological activity of peat soils from the specific electrical resistance. *Eurasian Soil Science* 41(10), 1077–1082. <https://doi.org/10.1134/S1064229308100098>
- Rohmistrov, V. L.*, 1968. Podzemnye vody Iaroslavskogo raiona. [Subsurface waters of the Yaroslavl region]. *Kraevedenie. Uchenye zapiski IaGPI* [Scientific notes of YAGPI] 71, 73–92. (In Russian)
- Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., Richard, G.*, 2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil and Tillage research* 83(2), 173–193. URL: <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004>
- Smernikov, S. A., Pozdnyakov, A. I., Shein, E. V.*, 2008. Assessment of soil flooding in cities by electrophysical methods. *Eurasian Soil Science* 41(10), 1059–1065. URL: <https://doi.org/10.1134/S1064229308100074>
- Soil salinity assessment: Methods and interpretation of electrical conductivity measurements, 1999. FAO Irrigation and Drainage Paper 57. FAO, Rome. URL: <http://www.fao.org/docrep/019/x2002e/x2002e.pdf> (date accessed: 25.01.2019).
- Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual, 2014. Soil Survey Investigations Report 51(2). URL: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1244466.pdf (date accessed: 25.01.2019).
- Status of the World's Soil Resources (SWSR). Main Report, 2015. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome.
- Subbotina, M. G., Horhe, B. S.*, 2013. Ob elektroprovodnosti pochv v sovremennykh issledovaniakh. [Soil electroconductivity in current research]. *Permskii agrarnyi vestnik* [Perm Agrarian Journal] 3(3), 28–33. (In Russian)
- Vashukevich N. V., Gyulalyev Ch. G., Kuklina S. L.*, 2017. Diagnostika pochv zony ekologicheskogo monitoringa ozera Baikal s ispol'zovaniem elektrofizicheskogo metoda. [Electrophysical method in the soils diagnosis of the Lake Baikal environmental monitoring zone]. *Agrarnyi vestnik Urala* [Ural Agrarian Journal] 156, 14–19. (In Russian)
- Yeh, T. C. J., Liu, S., Glass, R. J., Baker, K., Brainard, J. R., Alumbaugh, D., LaBrecque, D.*, 2002. A geostatistical-based inverse model for electrical resistivity surveys and its applications to vadose zone hydrology. *Water Resources Research* 38(12), 14-1–14-13. URL: <https://doi.org/10.1029/2001WR001204>

Received: July 8, 2018
Accepted: December 7, 2018

Author's information:

Julija V. Simonova — uvsim@yandex.ru
Aleksej V. Rusakov — a.rusakov@spbu.ru
Aleksandr G. Ryumin — a.ryumin@spbu.ru
Vladimir R. Belyaev — vladimir.r.belyaev@gmail.com