

Процессы засоления почв импактной зоны выходов минерализованных вод в Ярославском Поволжье*

Ю. В. Симонова¹, А. В. Русаков¹, Е. А. Коркина²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9

² Нижневартровский государственный университет,
Российская Федерация, 628605, Тюменская область, Ханты-Мансийский автономный округ — Югра, Нижневартовск, ул. Ленина, 56

Для цитирования: Симонова, Ю. В., Русаков, А. В., Коркина, Е. А. (2020). Процессы засоления почв импактной зоны выходов минерализованных вод в Ярославском Поволжье. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 65 (4), 662–680.
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.404>

Впервые в профилно-генетическом аспекте почвоведения рассмотрено влияние высокоминерализованных вод артезианских скважин на зональные (дерново-подзолистые) и интразональные (аллювиальные) почвы в Ярославском Поволжье (центральная часть Русской равнины). Установлено, что в почвах импактной зоны изливов скважин происходит накопление солей по сравнению с почвенными разностями, формирующимися в сходных ландшафтных позициях. Выявлены общие черты и особенности развития климатически не обусловленного засоления. Несмотря на высокую концентрацию солей в артезианских водах, почвы, подверженные трансформации в результате техногенного галогенеза в условиях гумидного климата, содержат соли в количестве, не превышающем 1%. Засоление характеризуется нейтральным типом хлоридного, хлоридно-сульфатного или сульфатного химизма, признаки солонцового процесса отсутствуют. Своеобразие солевого профиля почв и химизма засоления в каждом конкретном случае зависит от локальных факторов почвообразования: генетического типа отложений, режима поступления солей, положения в рельефе. С помощью полевых измерений удельного электрического сопротивления показано, что по форме своего проявления засоление не имеет широкого площадного распространения и носит характер точечного с приуроченностью к ложу стока. Исследованные засоленные почвы имеют общие морфологические черты с зональными и интразональными незасоленными аналогами. На рассмотренных примерах был сделан вывод о том, что засоление в гумидном климате не является основным почвообразующим процессом и может считаться наложенным. Изменение свойств почв под действием солевого загрязнения фиксируется на уровне признака и не затрагивает классификационное положение почв в пределах генетического типа.

Ключевые слова: артезианские скважины, Верхняя Волга, удельное электрическое сопротивление, техногенный галогенез.

* Лабораторные исследования частично выполнены в ресурсном центре Научного парка СПбГУ «Методы анализа состава вещества» (проект 108-8100).

1. Введение

На территории Русской равнины в районах гумидного климата засоление почв имеет ограниченное распространение и связано в основном с маршевым засолением. В то же время ее север и центральная часть издавна известны своими минеральными источниками, которые располагались в областях разгрузки подземных вод пермских и девонских соленосных бассейнов и использовались для вываривания знаменитых рассолов (Лихарев, 1924). Пришедший в упадок варничный промысел большинство из них превратил в заброшенные ключи, на месте которых в 60-е гг. прошлого столетия были открыты геологоразведочные скважины. Масштабное глубокое бурение в бассейне Верхней Волги привело к тому, что незатампонированные скважины стали источником перемещения солей из глубинных вод в зону активного водообмена и почвенный профиль.

Отмечаемое в последние десятилетия исследователями засоление почв в районах гумидного климата относится как к проявлению техногенного галогенеза (Солнцева, 1998), так и к естественному засолению. Имеется ряд работ, посвященных влиянию минеральных природных источников и минерализованных вод скважин на почвенный покров и сопряженные компоненты экосистем на территории Западной и Восточной Сибири (Chernousenko and Yamnova, 2004; Lopatovskaya, 2009; Якимов и др., 2014; Парамонова и др., 2017). В отдельных случаях влияние минерализованных вод приводит к появлению солончаков, солонцов и подтипов засоленных почв на месте дерново-глеевых, аллювиальных и дерново-подзолистых почв. Однако нередко засоление достаточно слабое и не изменяет морфологический облик, основные свойства и тип почвы, тогда соленакопление представляет собой наложенный процесс (в терминологии работы (Lebedeva et al., 2012)), который не приводит к формированию новых горизонтов и модифицирует свойства почвы на подтиповом уровне.

Техногенный галогенез в нефтеносных районах США, Канады и Австралии нанес значительный ущерб почвенным (brine affected soils), лесным и водным ресурсам (Murphy et al., 1988; Auchmoody, 1989; Pessarakli, 1991; Rengasamy, 2006; Gibson et al., 2013). Основные проблемы, возникающие при солевом загрязнении хлоридно-натриевым раствором с концентрацией солей, в несколько раз превышающей их концентрацию в морской воде, связаны с фитотоксичностью ионов, присутствующих в рассоле, ухудшением структуры почвы, снижением ее водопроницаемости (Keiffer and Ungar, 2001). В 1960–1980 гг. на севере и юго-востоке США рассолы с концентрацией более 50 г/л из малобедитовых нефтяных скважин выгружались на рельеф и в близлежащие поверхностные водотоки в объеме 300 м³ в сутки (Marsi and Evangelou, 1991), вызывая появление техногенно засоленных ландшафтов. Такая проблема затронула не только территории с засушливым климатом, но и районы с высоким уровнем атмосферного увлажнения.

Влияние солевого загрязнения в нефтедобывающих районах таежной и тундровой зон Западной Сибири, рассмотренное на примерах торфяных, торфяно-глеевых почв и подзолов иллювиально-железистых (Solntseva and Sadov, 1997; 2000), привело к трансформации естественных почв в средней и сильной степени засоленные разности и в некоторых случаях — в солончаки с содержанием солей в торфяных горизонтах свыше 1%. Результаты мониторинга засоления в указанных

ландшафтах, проведенного спустя десятки лет с момента загрязнения, демонстрировали увеличение доли натрия в составе обменных катионов почвы, смещение солевого максимума в нижнюю часть профиля и длительную сохранность ореолов загрязнения, что заставляет говорить о техногенном галогенезе как о типоморфном процессе, ответственном за свойства почв и ландшафтов.

«Нетипичные» засоленные почвы, сформированные под действием природного (минерализованные грунтовые воды в местах выходов соленосных пород, морские воды) и антропогенного (влияние отходов производства соды, шахтных вод и отвалов) факторов в условиях гумидного климата, изучены на территории Польши и Германии. В работах (Hulisz, 2008; 2016; Hulisz et al., 2010; 2013) показаны свойства почв, обязанные химизму источников поступления солей, и характерные черты в сравнении с типичными солончаками и солонцами, большое внимание уделено их классификационному положению. Почвы характеризовались нейтральной и слабощелочной реакцией среды, значительно варьирующим в зависимости от источника загрязнения содержанием солей (от 0.6 до 6.0 %), высокой и очень высокой долей натрия (17–70 %) в составе обменных катионов (Hulisz et al., 2010). Согласно критериям солёности, принятым в США (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954), почвы были отнесены к нейтральному (saline) и щелочному (saline-sodic) типам засоления. В случаях слабозасоленных почв засоление рассматривалось как вторичный, наложенный процесс, существенно не изменяющий морфологию профиля (Hulisz, 2008). По международной классификации почв WRB (IUSS Working Group WRB, 2015) засоленные разности были диагностированы как Histosols, Fluvisols и Gleysols, а особенности засоления изученных почв принимались авторами на более низком таксономическом уровне. Почвы техногенного засоления с высоким содержанием солей, вмещающие многочисленные производственные артефакты, классифицировались по WRB как Technosols (Hulisz et al., 2010).

Поступление минерализованных вод в природные ландшафты приводит к изменению солевого состава почвенно-грунтовых вод и смене геохимического класса водной миграции в ландшафте (Solntseva and Sadoy, 1997), трансформации кислотно-основных и водно-физических свойств почв (Marsi and Evangelou, 1991; Solntseva and Sadoy, 2000; Evangelou and Marsi, 2003), снижению видового разнообразия биоценозов (Березин и др., 2008), деградации качества поверхностных вод и подземных водоносных горизонтов (Moskovchenko et al., 2017). В аридных и полуаридных условиях, при плохопроницаемых грунтах почве, насыщенной рассолом, требуется как минимум 100-кратное разбавление пресной водой или десятки и сотни лет для естественного рассоления после снятия солевой нагрузки (Murphy et al., 1988), чтобы снизить содержание солей до уровня, обеспечивающего удовлетворительный рост растений (Munn and Steward, 1989), при этом миграция рассола с латеральным стоком так или иначе вызывает распространение загрязнения в корнеобитаемом слое на большие площади. Между тем в условиях промывного типа водного режима и хорошем дренаже уже через 10 лет после прекращения поступления солей уровень засоления заметно снижается (Murphy et al., 1988), а лесные участки, поврежденные разливами рассола, могут быстро восстанавливаться без специальных мероприятий (Auchmoody, 1989). Вероятно, по этой причине проблеме засоления гумидных ландшафтов уделяется намного меньше внимания, чем в аридном и полуаридном климате (Ронжина и Кречетов, 2013), хотя, как показывает литератур-

ный обзор, засоленные почвы таких ландшафтов могут подвергаться глубокой трансформации и отличаются специфичностью галогенеза, а площади вторичного засоления в период посттехногенеза расширяются (Solntseva and Sadov, 2000).

Цель настоящего исследования состоит в выявлении типа и интенсивности засоления почв импактной зоны выходов высокоминерализованных вод в гумидных ландшафтах на примере Ярославского Поволжья, определении классификационного положения засоленных почв, степени контрастности с сопредельными незасоленными разностями и особенностей, связанных с климатически не обусловленным засолением.

2. Материалы и методы исследований

2.1. Характеристика участков исследований

Всего на территории бассейна Верхней Волги рассмотрены три участка, расположенные в административных границах Ярославской области. Климат области умеренно континентальный со среднегодовой температурой 4.6°C. По условиям влагообеспеченности территория относится к области избыточного увлажнения (Департамент..., 2015). Район исследования располагается в пределах подзоны южной тайги с высокой долей суходольных мелкозлаково-разнотравных лугов. В почвенном покрове преобладают дерново-подзолистые почвы, занимая выровненные участки водоразделов. Значительные площади освоены в сельскохозяйственном отношении (География..., 1972).

Участок «Некрасовское». Участок расположен в п. Некрасовское, в пределах тектонически образованной Ярославско-Костромской низины с а. о. 82–115 м, в долине р. Волги, выполненной аллювиальными отложениями (География..., 1972). Солёный «родник» находится недалеко от устья р. Солоницы (57°41'46.5»N, 40°20'23.7»E) и фактически представляет собой самоизливающуюся скважину с низким дебитом. Артезианская вода рассольной концентрации хлоридно-натриевой группы является источником поступления солей на поверхность почвы. Сток воды из скважины неорганизованный, по естественному уклону в р. Волгу. Почвенный разрез заложен в 3 м от выступающей трубы скважины и в 10 м от уреза воды на береговом склоне, принимающем основную солевую нагрузку.

Гидрогеологическое строение территории дало начало богатой истории солеварения п. Некрасовское (ранее — Большие Соли). В XVI в. по берегам р. Солоницы существовало 19 варниц, рассол для которых добывался из неглубоких колодцев, поскольку подземные соленые воды во многих местах сами выходили на поверхность, а следы засоления почвы имелись как вблизи варниц, так и вдоль всего русла р. Солоницы (Лаговский, 1861). Таким образом, современное засоление почвы водами скважины нельзя воспринимать как антропогенное в полном смысле, оно обусловлено разгрузкой рассолов коренных пород территории и имеет историческое прошлое.

Участок «Конгора». Второй участок исследования расположен в п. Андреевское на левом берегу р. Конгоры. В геоморфологическом отношении изученная территория охватывает низкие западные отроги Шекснинско-Костромского междуречья с а. о. 100–120 м. На пониженных элементах рельефа распространены мо-

ренные валунные суглинки, супеси, пески. Врезы заполнены аллювиальными отложениями (География..., 1972).

Обнаруженный нами источник с соленой водой находится на высокой надпойменной террасе р. Конгоры в 7 м от русла. О происхождении источника известно, что он является следствием геологоразведочного бурения в 60-е гг. прошлого столетия. Поступление солей с самоизливающейся водой продолжается уже около 60 лет. Просачиваясь в почвенную толщу и грунтовые воды, избыток воды ручьем стекает в реку. Влияние засоления рассмотрено на двух разрезах, расположенных в 2 м (58°36'19.9»N, 38°42'05.8»E) и в 7 м от источника (58°36'19.8»N, 38°42'05.5»E).

В литературе (Лихарев, 1924) имеются данные о наличии в Пошехонском районе естественных выходов минерализованных вод, — в частности, известны такие на р. Конгоре. Поэтому, вероятно, точка бурения скважины соответствует местоположению одного из таких выходов и имеет в этом районе аналоги природного происхождения.

Участок «Ясная Поляна». Третий участок исследования расположен в Пошехонском районе Ярославской области и относится к территории Шекснинско-Костромского междуречья с а. о. от 104 до 132 м. В составе почвообразующих пород на территории преобладают покровные и моренные суглинки и двучленные отложения в виде покровных суглинков на морене (География..., 1972).

Почвенные разрезы «Ясная Поляна-1» и «Ясная Поляна-2» заложены в 150 м от эксплуатационной водозаборной скважины. Вода, добытая из скважины, вследствие высокой минерализации (260 г/л) и хлоридно-натриевого состава используется для полива дорог как жидкий противогололедный реагент.

Разрез «Ясная Поляна-1» (58°28'49.7»N, 39°05'42.3»E) заложен на краю пашни, в нижней части пологого склона Ю-З экспозиции, разрез «Ясная Поляна-2» (58°28'49.3»N, 39°05'43.4»E) — в 15 м от первого разреза. Растительность на краю поля «выгоревшая», изреженная. Пролиты и утечки из скважины поверхностным стоком стекают в р. Ветху и далее — в Рыбинское водохранилище.

Образцы почвы и воды были отобраны в июне — августе 2017 г. Отбор воды из скважины в с. Ясная Поляна Пошехонского района Ярославской области был выполнен в феврале 2018 г.

2.2. Методы исследований

Содержание углерода ($C_{орг}$) и азота ($N_{общ}$) в образцах почвы определялось на анализаторе CHN628 LECO Corporation (США). Гранулометрический состав почв выполнен методом пипетки по Качинскому. Тип химизма засоления рассчитывался по соотношению миллимолей эквивалентов анионов и катионов, извлеченных методом водных вытяжек из почвы. Степень засоления оценивалась по содержанию всех найденных в водной вытяжке ионов ($\Sigma_{сол}$) и сумме токсичных солей ($\Sigma_{токс}$). Расчет $\Sigma_{токс}$ производился исходя из допущения, что ионы Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} переходят в водную вытяжку в результате растворения токсичных солей, а ионы HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} — в результате растворения как токсичных, так и нетоксичных солей (Засоленные почвы..., 2006). По степени засоления почвы классифицировались в зависимости от типа химизма засоления (Базилевич и Панкова, 1972). Отдельные ионы

в водной вытяжке из почвы (1:5) определялись по стандартным методикам, принятым в почвоведении (Аринушкина, 1970). В образцах воды ионы HCO_3^- определялись титриметрическим методом, SO_4^{2-} — весовым методом, Cl^- — аргентометрическим методом, Ca^{2+} и Mg^{2+} — комплексонометрическим методом. Концентрации Na^+ , K^+ в водной вытяжке почвы и воде определялись на атомно-абсорбционном спектрометре AA-7000 Shimadzu (Япония) с атомизацией в непрерывном пламени в ресурсном центре СПбГУ «Методы анализа состава вещества».

Выявление шлейфа солевого загрязнения удобно проводить быстрыми неразрушающими методами (Samouëlian et al., 2005), поэтому для полевой диагностики засоления почвы использовался метод измерения удельного электрического сопротивления (ERк) с помощью четырехэлектродного датчика со схемой AMNB и расстоянием между соседними электродами 2.5 см. Измерения ERк проводились в полевых условиях при естественной влажности по каждой стенке почвенного разреза (боковой, лицевой, правой) с равным шагом по горизонтали через каждые 5 см по глубине. Данные измерений ERк представлялись в виде профильной диаграммы, построенной с помощью программы GoldenSurfer с интерполяцией методом крикинга.

Для устранения влияния различий во влажности почв, с которым неизбежно приходится сталкиваться при измерениях в полевых условиях, удельное электрическое сопротивление определялось также в образцах почвы, увлажненных дистиллированной водой до состояния пасты и помещенных в кювету с площадными электродами. В кювете с площадными электродами АВ в образце создается однородное электрическое поле, поэтому измеряемый показатель называют «истинным сопротивлением» (ERи). Приготовление водонасыщенной пасты выполнялось из влажной, не высушенной до воздушно-сухого состояния почвы, измельченной до уровня агрегатов, без пропускания через сито. Увлажнение почвы производилось до состояния нижнего предела текучести или верхнего предела пластичности (Позднякова и др., 2018). В таком состоянии влажность уже не является фактором, сколько-нибудь значительно влияющим на удельное электрическое сопротивление (McCarter, 1984; Pozdnyakov, 2008). Показания удельного электрического сопротивления, измеряемого в кювете, снимались в пятнадцатикратной повторности. Измерения удельного электрического сопротивления в поле по стенке разреза и в лабораторных условиях проводились с помощью прибора LandMapper производства фирмы LandViser (Россия, США) (Теория..., 2007; Позднякова и др., 2018).

3. Результаты исследований

Участок «Некрасовское». По величине минерализации и полученному соотношению ионов вода из скважины на участке «Некрасовское» отнесена к слабым рассолам хлоридно-натриевой группы. Обозначение солевого комплекса по преобладающим катионам и анионам (% мг-экв) представлено в виде формулы Курлова:

$$M73.77 = \frac{\text{Cl}94[\text{SO}_46]}{\text{Na}82[\text{Ca}10\text{Mg}8]} \text{pH}6.5,$$

где М — величина минерализации (г/л); ионы, содержание которых не превышает 25 % мг-экв, приводятся в квадратных скобках.

Почва разреза «Некрасовское» (прил. 1.1¹) на береговом склоне вблизи источника сформирована на древнеаллювиальных супесчаных отложениях. В непосредственной близости от источника и вдоль ложа ручья на поверхности образуются солевые выцветы (прил. 1.1).

Содержание $C_{орг}$ и $N_{общ}$ в профиле рассмотренной почвы убывает с глубиной постепенно (прил. 1.2), а соотношение C:N демонстрирует высокую обогащенность гумусовых горизонтов азотом. В гранулометрическом составе почвы преобладает фракция мелкого песка, текстурная дифференциация по профилю не выражена и заметна только для частиц размерностью 1–0.25 мм (прил. 1.2).

Состав водной вытяжки почвы, подвергающейся воздействию соленого источника, приведен в прил. 1.3. Почва имеет нейтральную и слабощелочную реакцию среды. Отношение Cl^- к SO_4^{2-} в нижней части профиля значительно превышает таковое в верхней, что свидетельствует об отсутствии прогрессивного накопления солей. По степени засоления профиль условно делится на две части: в верхних 30 см почва имеет слабую степень засоления, в нижележащей толще — сильную и очень сильную (прил. 1.4). Общее содержание солей ($\Sigma_{сол}$), как и сумма токсичных солей ($\Sigma_{токс}$), возрастает с глубиной и имеет наиболее высокие значения в зоне водонасыщения. По глубине залегания максимума солей (60–70 см) почва относится к виду солончаковатых. Тип химизма в горизонте соленакопления — хлоридный натриевый, что соответствует типу воды источника.

Электрические параметры почвы ER_i и ER_k , измеренные в водонасыщенной почвенной пасте в кювете и в полевых условиях при естественной влажности соответственно, обратно пропорциональны содержанию солей и следуют за тенденцией распределения солей по профилю (прил. 1.5). Начиная с глубины 30 см, и далее вниз по профилю, величины ER_i и ER_k не превышают 10 Ом·м, а уже в слое 60–70 см значения ER_k не превышают 1 Ом·м.

По классификации почв России (Классификация..., 2004) изученная почва диагностирована как аллювиальная серогумусовая (дерновая) урби-стратифицированная солончаковатая очень сильнозасоленная супесчаная. По международной классификации почв WRB (IUSS Working Group WRB, 2015) почва названа Orthofluvic Fluvisol (Hemic, Loamic, Endosalic, Technic).

Участок «Конгора». По характеру минерализации воды источника на берегу р. Конгора хлоридно-сульфатные кальциево-натриевые, сильносоленые. Формула Курлова для вод источника выглядит следующим образом:

$$M10.49 = \frac{SO_4 58 Cl 41}{Na 46 Ca 40 [Mg 14]} pH 6.3.$$

Согласно почвенной карте, составленной на этот участок, разрезы располагаются в границах выдела аллювиальных дерновых намытых глеевых почв (рис. 1). Грунтовые воды появляются на глубине 65–75 см. В обоих разрезах (рис. 1) присутствуют признаки гидроморфизма — обилие сизых и ржавых пятен.

Гранулометрический состав обеих почв характеризуется заметной обессоленностью и высоким содержанием фракций мелкого и крупного песка (прил. 1.6).

¹ Здесь и далее приложения 1.1–1.16 можно найти по электронному адресу: <https://escjournal.spbu.ru/article/view/5514/6789>. Приложения даны в авторской редакции.

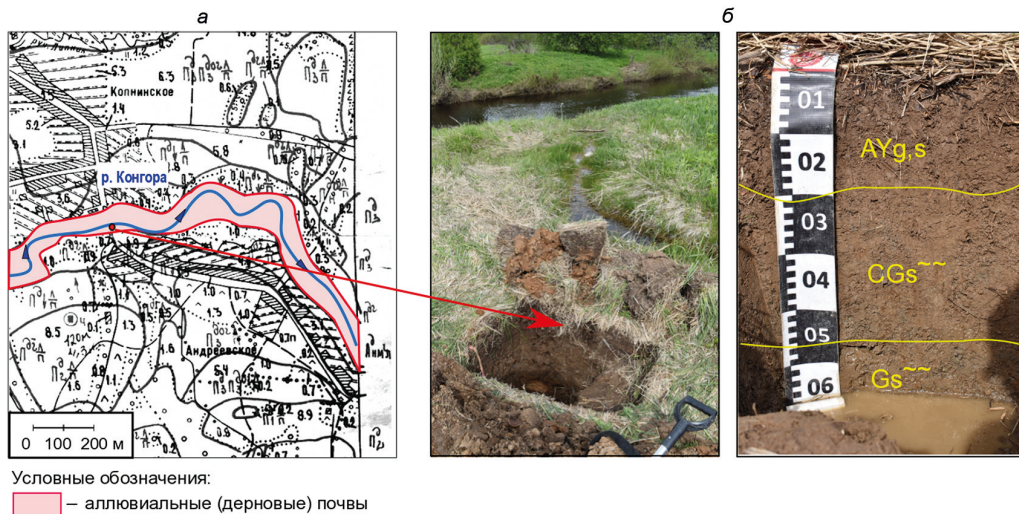


Рис. 1. Участок исследования «Конгора»:

а — фрагмент почвенной карты района исследований (М. 1:10 000). Карта землепользования хозяйств Пошехонского района Ярославской области составлена сотрудниками Биологического НИИ ЛГУ (СПбГУ) по заказу Ярославского филиала Центргипрозем в 1988 г. Картографический материал хранится на кафедре почвоведения и экологии почв СПбГУ;

б — почвенный разрез рядом с соленым источником (слева) и профиль незасоленной почвы (справа)

Дифференциация профиля разреза «Конгора-1» по гранулометрическому составу прослеживается с глубины 50 см, где переход от аллювиальных отложений к морене сопровождается резким увеличением количества частиц размерности 1–0.25 мм и уменьшением доли фракции крупной пыли. Обе почвы относятся к легкосуглинистым. В разрезе «Конгора-2» смена пород наблюдается на глубине 75 см. Рассмотренные почвы богаты органическим веществом и азотом, что в сочетании с постепенно убывающим гумусовым профилем и неблагоприятно широким отношением С:N характерно для почв гидроморфных и полугидроморфных позиций.

Почва разреза «Конгора-1» вблизи источника имеет реакцию среды от слабокислой до близкой к нейтральной, фоновая почва — слабокислую по всему профилю (прил. 1.7). Карбонаты в почве отсутствуют. Распределение солей по профилю имеет бимодальный характер: помимо их аккумуляции в горизонте AYg,s (0–20 см) наблюдается концентрирование солей в зоне водонасыщения непосредственно над горизонтом грунтовых вод, на границе смены пород, представляющей локальный моренный водоупор. На глубине 50–65 см $\Sigma_{\text{сол}}$ и $\Sigma_{\text{токс}}$ максимальны и составляют 0.36 и 0.35 % соответственно (прил. 1.8). По глубине залегания солевого горизонта почва относится к солончаковой со средней степенью засоления.

Почва диагностирована как аллювиальная серогумусовая (дерновая) глеевая солончаковая средnezасоленная легкосуглинистая на аллювиальных отложениях, подстилаемых мореной (Классификация..., 2004). По международной классификации (IUSS Working Group WRB, 2015) почва относится к Orthofluvic Gleyic Fluvisol (Humic, Siltic, Endosalic, Raptic). Разрез почвы, расположенный на 5 м дальше выхода минерализованной воды источника, относится уже к незасоленной аллювиальной серогумусовой (дерновой) глеевой легкосуглинистой почве (Классифика-

ция..., 2004), или Orthofluvic Gleyic Fluvisol (Humic, Siltic, Raptic) в соответствии с международной классификацией почв.

Значения электрического параметра E_{Ri} образцов из генетических горизонтов разреза «Конгора-1», измеренные в водонасыщенной пасте (прил. 1.9), находятся в диапазоне, свойственном солончакам. В электрическом профиле почвы выделяется горизонт с величиной 9.7 Ом·м, который, несмотря на максимум содержания в нем солей, имеет более высокую величину электрического сопротивления по сравнению с остальными горизонтами профиля, обязанную смене характера отложений и значительному увеличению крупного песка в гранулометрическом составе (прил. 1.6).

Очаговый характер влияния соленого источника на почвенный покров хорошо демонстрируется на диаграмме распределения E_{Rk} в профиле разреза «Конгора-1» (прил. 1.10) с четко выделяющейся правой стенкой, ближайшей по отношению к «ложбине» стока соленой воды. Величины E_{Rk} по правой стенке лежат в диапазоне 4–10, по лицевой — 10–30, по левой — 15–60 Ом·м. Значения E_{Ri} в разрезе «Конгора-2» более высокие по сравнению с первой почвой, а горизонтальная неоднородность проявляется значительно меньше (прил. 1.10).

Участок «Ясная Поляна». По химическому составу воды скважины, эксплуатируемой на участке, представляют собой хлоридный натриевый рассол:

$$M259.54 = \frac{Cl99}{Na75[Ca18Mg7]} pH5.4.$$

Временные изолированные лужи, возникающие в итоге проливов и утечек при раскачке по поливальным машинам, соединяются ручьями с р. Ветхой, оставляя при подсыхании солевые выцветы на поверхности почвы. Почва в этих местах лишена растительного покрова, а $\Sigma_{\text{сол}}$ в слое (0–10 см) достигает 0.87 % (прил. 1.11).

Разрезы «Ясная Поляна-1» и «Ясная Поляна-2» (прил. 1.11) заложены на расстоянии 15 м друг от друга в нижней части полого распахиваемого склона, граничащего с «руслom» временного водотока, создаваемого утечками скважины. Почвы сформированы на покровных суглинках, в гранулометрическом составе которых преобладает фракция крупной пыли (прил. 1.12). Во втором разрезе отмечается двучленное строение профиля, граница покровных суглинков с мореной проходит на глубине 40 см. Значения $S_{\text{орг}}$ и $N_{\text{общ}}$ обеих почв (прил. 1.12) характерны для пахотных вариантов дерново-подзолистых почв.

По результатам анализа водной вытяжки обе почвы оказались засоленными. В составе солей преобладают ионы SO_4^{2-} и Na^+ , максимум солей сосредоточен в горизонте BEL (прил. 1.13). По глубине залегания солевого максимума и содержанию солей почвы относятся к виду солончаковатых со средней степенью засоления, с натриевым сульфатным типом химизма засоления (прил. 1.14).

В соответствии с Классификацией почв России (Классификация..., 2004) первая почва была диагностирована как агродерново-подзолистая глееватая солончаковатая средnezасоленная среднесуглинистая на покровных суглинках, вторая — как агрозем светлый солончаковатый средnezасоленный легкосуглинистый на покровных суглинках, подстилаемых бескарбонатной мореной. По международной классификации почв WRB (IUSS Working Group WRB, 2015) первая почва названа

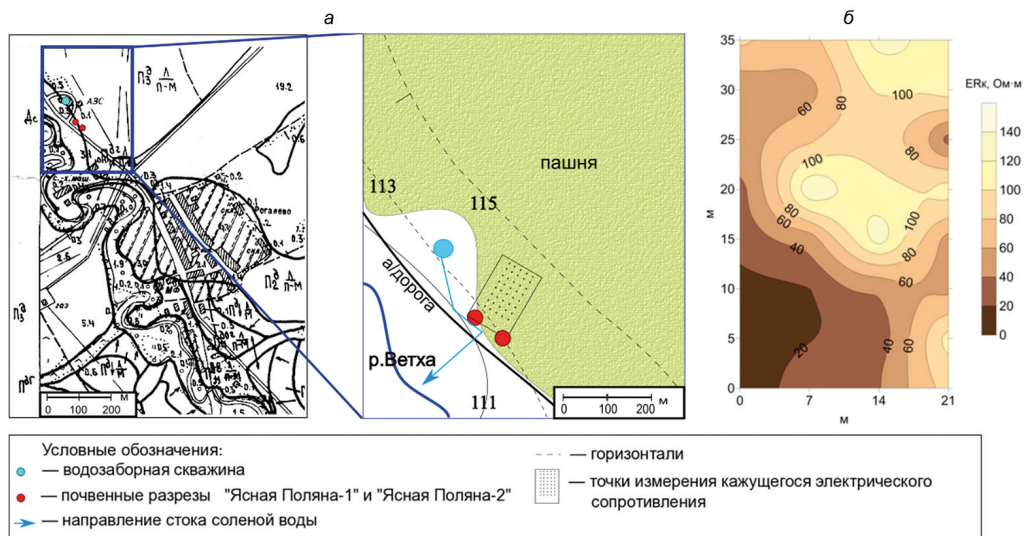


Рис. 2. Участок «Ясная Поляна»:

а — фрагмент почвенной карты участка исследований (М.1:10 000). Карта землепользования хозяйств Пошехонского района Ярославской области составлена сотрудниками Биологического НИИ ЛГУ (СПбГУ) по заказу Ярославского филиала Центргипрозем в 1988 г. Слева — картографический материал (хранится на кафедре почвоведения и экологии почв СПбГУ), справа — расположение точек измерения ER_к;

б — карта распределения значений ER_к по площади в пахотном горизонте почвы

Amphistagnic Albic Retisol (Siltic, Anoaric, Cutanic, Endosalic), вторая — Albic Retisol (Siltic, Anoaric, Cutanic, Endosalic, Raptic).

Средние значения E_{Ри} и ER_к, измеренные в профиле разреза «Ясная Поляна-1», лежат в интервале 12–26 Ом·м, уменьшаясь с глубиной почти в два раза относительно верхней прогумусированной части (прил. 1.15). Четкой взаимосвязи между варьированием значений ER_к и E_{Ри} по профилю и содержанием солей не установлено, но это не всегда является обязательным (Scudiero et al., 2017), так как электрические параметры отзывчивы на целый ряд базовых свойств почвы, особенно на фоне невысокого содержания солей. Тем не менее общая неоднородность почвенного морфона по электрическим параметрам с заметно меньшими значениями ER_к, измеренными на правой стенке разреза (прил. 1.15), ориентированной по направлению движения солевого раствора, отражает приуроченность пятна засоления к ложу стока.

В разрезе «Ясная Поляна-2» вертикальная профильная дифференциация значений E_{Ри} выражена нерезко. Обращает на себя внимание увеличение электрического сопротивления на глубине 35–40 см, которое, вероятно, обусловлено литологической неоднородностью (прил. 1.16). Величина ER_к почвы ненарушенного сложения уменьшается вниз по профилю от 54 до 18 Ом·м, проявляя заметную горизонтальную неоднородность в верхней пахотной части и на границе смены отложений.

Рассмотренные разрезы относятся к дерново-подзолистым почвам, для которых обычно характерны высокие значения электрических параметров, достигаю-

щие 1000 Ом·м. В то же время в окультуренных аналогах таких почв электрические параметры снижаются до 50–100 Ом·м (Pozdnyakov, 2008). Таким образом, полученные нами значения $E_{Rи}$ и $E_{Rк}$ находятся в интервале, который может обеспечиваться свойствами почвы, не связанными с засолением.

Для определения границ засоления были выполнены измерения $E_{Rк}$ в слое 0–15 см на участке пашни, прилегающей к изученным разрезам. Полученная диаграмма пространственного варьирования данных поверхностного электротзондирования (рис. 2) говорит об ограниченном распространении засоления и его тяготении к ложу солевого стока.

Ранее упоминалось, что отбор почвенных образцов производился в июне, тогда как основная нагрузка на почвенный покров от солевого загрязнения приходится на зимние и ранневесенние месяцы в период технологической эксплуатации скважины. В условиях избыточного атмосферного увлажнения можно предполагать, что к началу летнего сезона основная масса солей вынесена талыми водами и данные водной вытяжки отражают остаточное содержание солей в почве.

4. Обсуждение результатов исследований

Результаты изученных нами почв импактной зоны выходов высокоминерализованных артезианских вод показали, что степень, характер и особенности солевого профиля в каждом отдельном случае определяются локальными условиями почвообразования, но имеются общие тенденции протекания процессов засоления, отличные от известных для аридного и полуаридного климата.

Во всех почвах импактной зоны скважин верхняя гумусовая часть профиля засолена слабо. Максимум накопления солей (второй или единственный) находится в средней или нижней части профиля, что позволяет отнести их к виду солончаковатых. Принципы строения почвенного профиля имеют в данном случае сходство с таковыми у соленых маршей гумидного и семигумидного климата, у которых верхняя часть профиля представлена зональным типом почвообразования, а нижняя — засоленной толщей (Lavado and Taboada, 1988).

На участке «Некрасовское», представленном разрезом аллювиальной серогумусовой (дерновой) почвы, тенденцию нисходящего вертикального распределения солей в профиле усиливают супесчаный слабо дифференцированный гранулометрический состав аллювиальных отложений, на которых сформирована почва, склоновая позиция и близость базиса дренирования территории. В итоге при интенсивном поступлении солей с высокоминерализованной (73.77 г/л) водой почва имеет сильную степень засоления ($\Sigma_{\text{сол}}$ — 0.84 %) только в нижней части, на границе с уровнем грунтовых вод. Соли, поступающие на поверхность, в почвах легкого гранулометрического состава в отсутствие водоупора не задерживаются и быстро вымываются из профиля. Засоление почвы происходит преимущественно за счет подъема солей на высоту пленочно-капиллярного увлажнения из неглубоко залегающих грунтовых вод. Таким образом, нижняя часть профиля оказывается наиболее засоленной, а зона аэрации при этом сильнее подвергается сезонной динамике засоления-опреснения в годовом цикле. Принимая во внимание, что отбор проб производился летом, в период максимального испарения, можно предположить, что большую часть года выщелачивание солей из верхних горизонтов преобладает.

Для почв импактной зоны скважин на участках «Конгора» и «Ясная Поляна», помимо интенсивного выщелачивания легкорастворимых соединений во время влажных эпизодов года, выявлены сходства в характере движения и задержки солей, связанные с генезисом почвы и литологической неоднородностью почвообразующей породы. Почвы обоих участков сложены на двучленных отложениях лессовидного облика, подстилаемых мореной: в первом случае — на аллювиальных, в значительной мере облессованных, во втором — на покровных. Для засоленной аллювиальной серогумусовой (дерновой) глеевой почвы на участке «Конгора» характерно два максимума соленакопления, что свидетельствует о процессе сезонной миграции солей и смене периодов засоления/рассоления. Первый максимум объясняется влиянием испарительного концентрирования, а второй — задержкой солей на границе смены отложений при установлении промывного режима увлажнения.

В агродерново-подзолистой глееватой среднесуглинистой почве (разрез «Ясная Поляна-1») и агроземе текстурно-дифференцированном легкосуглинистом (разрез «Ясная Поляна-2») установлено залегание солевого максимума не на поверхности, а на глубине 30–50 см. Тип распределения солей по профилю — преимущественно равномерный с регрессивным верхом. Образование иллювиального по отношению к растворимым солям горизонта происходит благодаря текстурной дифференциации профиля в процессе педогенеза. Отсутствие выраженного верхнего максимума обязано летнему перерыву в поступлении солей вследствие технологического режима работы скважины. Следует отметить, что в водной вытяжке почвы из горизонта максимального соленакопления преобладают ионы SO_4^{2-} и Na^+ (прил. 1.13). Если на участке «Конгора» это имеет прямое отношение к химическому составу воды источника, в которой данные ионы также преобладают, то в почве участка «Ясная Поляна» накопление сернокислых солей может быть объяснимо с точки зрения их меньшей растворимости и подвижности относительно других ионов. Увеличение доли SO_4^{2-} в составе солей и общего их содержания в средней части профиля возможно при наличии условий для временной задержки влаги в пределах почвенной толщи. Концентрирование солей происходит на сорбционно-седиментационном барьере, характеризующемся утяжелением гранулометрического состава и/или наличием в почвенном профиле текстурных горизонтов (Глазовская, 1997).

При сравнении всех рассмотренных объектов с гидроморфными почвами аридных территорий обращает на себя внимание факт снижения концентрации солей в почвах импактной зоны по сравнению с концентрацией солей в источниках их поступления. Если в сухом климате количество солей в почвенной толще может увеличиваться относительно источника гидроморфного засоления до 10 раз (Voettinger and Richardson, 2001), то в условиях влажного климата, как демонстрируют наши данные водной вытяжки, концентрация солей в почве заметно снижается по сравнению с артезианскими водами. Даже для случаев длительного (более 50 лет) воздействия минерализованных вод на почвы, как, например, на участках «Некрасовское» и «Конгора», содержание солей в них не превышает 1 %.

Рассмотренные почвы отличаются от типичных засоленных почв аридного и полуаридного климата отсутствием морфологически различимых солевых корочек и выцветов на поверхности, они заметны только вдоль ложа стока минерализованной воды. Другой особенностью изученных почв можно отметить развитие признаков гидроморфизма, сопровождаемого реакциями восстановления железа,

которые хорошо прослеживаются в профилях разрезов «Конгора-1» и «Ясная Поляна-1», в то время как в аридных гидроморфных солончаках эти признаки стираются за счет высокого содержания солей и низкого содержания органического вещества (Boettinger and Richardson, 2001; Handbook..., 2018). Изученные засоленные разности не испытывают дефицита органического вещества и азота по сравнению с почвами соответствующих генетических типов, что подтверждает тенденцию, установленную другими исследователями для засоленных почв зоны гумидного климата (Pessarakli, 1991; Charzyński et al., 2013).

Несмотря на преимущественно хлоридный натриевый состав и высокий показатель SAR источников засоления (воды из скважин на участке «Некрасовское» и «Ясная Поляна» имеют показатели SAR — 68 и 100 соответственно), почвы характеризуются отсутствием внешних признаков проявления осолонцевания — горизонта с вертикально-призматической структурой и натечными кутанами. Тем не менее рядом авторов отмечается возможность «парасолонцового технопедогенеза» засоленных почв гумидного климата (Солнцева, 1998), выражающемся в увеличении доли обменного натрия в составе поглощенных катионов (Chernousenko et al., 2003; Hulisz et al., 2010) и длительном сохранении натрия в обменном состоянии в посттехногенный период (Солнцева, 1998) на фоне отсутствия уплотнения и столбчато-призматической структуры почвенных горизонтов. Отдельными авторами также сообщалось, что пороговое значение доли обменного натрия, оцениваемое по показателю ESP (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954), установленное для почв засушливых территорий, должно быть другим для почв гумидной зоны, так как они отличаются своим поведением в отношении физической стабильности и натрий-кальциевого обмена. Под действием солевых растворов невысокой концентрации они могут иметь даже большее сродство к натрию в реакциях ионного обмена (Evangelou and McDonald, 1999; Evangelou and Marsi, 2003).

Таким образом, засоленные почвы в гумидном климате отличаются от хорошо изученных аридных вариантов, даже тогда, когда засоление приобретает типоморфный характер, а почвы классифицируются как солончаки. В нашем случае засоление оценивается как вторичное и имеет статус наложенного процесса (Lebedeva et al., 2012) на уже сформированные профили. Развитие процесса педогалогенеза в климатических условиях, не предполагающих его появление, определяют его специфичность, заключающуюся в записи сочетаний экстразональных и зональных признаков и функционировании почвенного тела с неустойчивыми быстро эволюционирующими свойствами (Солнцева, 1998).

5. Выводы

1. Под действием техногенного галогенеза естественные (аллювиальные) и патотные (агродерново-подзолистые) почвы, развивающиеся в гумидном климате таежных ландшафтов, трансформируются в соответствующие засоленные разности средней и сильной степеней засоления, нейтрального типа химизма, солончакового вида.

2. При положении в рельефе, обеспечивающем возможность солеудаляющего действия, и водопроницаемых грунтах, поступление солей не оказывает значительного воздействия на корнеобитаемую часть профиля.

3. Индивидуальность солевому профилю придают локальные факторы, связанные с литологической неоднородностью, профилно-генетическими особенностями типа почв, водно-солевым режимом.

4. В изученных почвах галоморфизм на уровне макроморфологической организации выражен слабо. В почвообразовании доминируют зональные почвообразующие процессы или интразональный гидроморфный аспект, в связи с чем в классификационном положении засоление учитывается на уровне признака.

Литература

- Аринушкина, Е. В. (1970). *Руководство по химическому анализу почв*. Москва: Изд-во Московского ун-та.
- Базилевич, Н. И., Панкова, Е. И. (1972). Опыт классификации почв по содержанию токсичных солей и ионов. *Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева*, 5, 36–40.
- Березин, А. Е., Базанов, В. А., Минеева, Т. А., Березина, Л. А. (2008). Влияние высокоминерализованных вод на почвенно-растительный покров в районах нефтедобычи. *Вестник Томского государственного университета. Биология*, 306, 142–148.
- География почв и почвенное районирование центрального экономического района СССР*. (1972). Москва: Изд-во Московского ун-та.
- Глазовская, М. А. (1997). *Методологические основы оценки эколого-геохимической устойчивости почв к техногенным воздействиям*. Москва: Изд-во Московского ун-та.
- Департамент охраны окружающей среды и природопользования Ярославской области. (2015). *Экологический атлас Ярославской области*. Ярославль.
- Засоленные почвы России*. (2006). Москва: ИКЦ «Академкнига».
- Классификация и диагностика почв России*. (2004). Смоленск: Ойкумена.
- Лаговский, Е. (1861). *Описание Больших Солей (посада Костромской губернии)*. Кострома: Типография П. Андроникова.
- Лихарев, Б. К. (1924). Северные губернии Европейской России. *Естественные производительные силы России. Полезные ископаемые. Каменная соль и соляные озера*, 4 (35), 41–64.
- Парамонова, А. Е., Убугунова, В. И., Черноусенко, Г. И., Убугунов, В. Л., Балданов, Б. Ц., Цыремполов, Э. Г. (2017). Засоленные почвы поймы среднего течения реки Иркут: морфогенетические и агрохимические свойства. *Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В. Р. Филитова*, 2 (47), 30–38.
- Позднякова, А. Д., Поздняков, Л. А., Анциферова, О. Н. (2018). Универсальный прибор для измерений электрических свойств почв. *Бюллетень науки и практики*, 4 (4), 232–245. <http://doi.org/10.5281/zenodo.1218483>
- Ронжина, Т. В., Кречетов, П. П. (2013). Изменение кислотно-основного состояния почв в результате реализации механизмов геохимической буферности при импактном воздействии минерализованных вод на дерново-подзолистые почвы. *Фундаментальные исследования*, 6 (10), 1293–1296.
- Солнцева, Н. П. (1998). *Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов*. Москва: Изд-во Московского ун-та.
- Теории и методы физики почв*. (2007). Москва: Гриф и К.
- Якимов, А. С., Сванидзе, И. Г., Казанцева, М. Н., Соромотин, А. В. (2014). Изменение свойств почв речных долин южной тайги Западной Сибири под действием минерализованных артезианских вод. *Почвоведение*, 3, 364–374. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14030137>
- Auchmoody, L. R. (1989). Revegetation of a brine-killed forest site. *Soil Science Society of America Journal*, 52, 277–280.
- Boettinger, J. L. and Richardson, J. L. (2001). Saline and wet soils of wetlands in dry climates. In: J. L. Richardson, M. J. Verpraskas, ed., *Wetland soils: genesis, hydrology, landscapes, and classification*, 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 383–390. <https://doi.org/10.1201/9781420026238>
- Charzyński, P., Bednarek, R., Greinert, A., Hulisz, P. and Uzarowicz, Ł. (2013). Classification of technogenic soils according to WRB system in the light of Polish experiences. *Soil Science Annual*, 64 (4), 145–150. <https://doi.org/10.2478/ssa-2013-0023>

- Chernousenko, G. I. and Yamnova, I. A. (2004). About the genesis of soil salinity in the western part of the Transbaikal region. *Eurasian Soil Science*, 37 (4), 341–355.
- Chernousenko, G. I., Yamnova, I. A. and Skripnikova, M. I. (2003). Anthropogenic salinization of soils in Moscow. *Eurasian Soil Science*, 36 (1), 92–100.
- Evangelou, V. P. and Marsi, M. (2003). Influence of ionic strength on sodium-calcium exchange of two temperate climate soils. *Plant and Soil*, 250 (2), 307–313. <https://doi.org/10.1023/A:1022871204018>
- Evangelou, V. P. and McDonald, L. M. (1999). Influence of Sodium on Soils of Humid Regions. In: M. Pessarakli, ed., *Handbook of Plant and Crop Stress*, 2nd ed. New York and Basel: Marcel Dekker Inc., 17–50.
- Gibson, J. J., Fennell, J., Birks, S. J., Yi, Y., Moncur, M. C., Hansen, B. and Jasechko, S. (2013). Evidence of discharging saline formation water to the Athabasca River in the oil sands mining region, northern Alberta. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 50 (12), 1244–1257. <https://doi.org/10.1139/cjes-2013-0027>
- Handbook for saline soil management*. (2018). Rome and Moscow: FAO, Moscow State University.
- Hulisz, P. (2008). Quantitative and qualitative differentiation of soil salinity in Poland. *Berichte der DBG*, 1, 1–4.
- Hulisz, P. (2016). Coastal marsh soils in Poland: characteristics and problems of classification. *Soil Science Annual*, 67 (1), 37–44. <https://doi.org/10.1515/ssa-2016-0006>
- Hulisz, P., Charzyński, P. and Giani, L. (2010). Application of the WRB classification to salt-affected soils in Poland and Germany. *Polish Journal of Soil Science*, 43 (1), 81–92.
- Hulisz, P., Sowiński, P. and Felińczak-Drabik, A. (2013). Soils contaminated by brine spills in Sędowo. In: P. Charzyński, P. Hulisz, R. Bednarek, ed., *Technogenic soils of Poland*. Torun: Polish Society of Soil Science, 157–170.
- IUSS Working Group WRB. (2015). *World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. World Soil Resources Reports No 106. Rome: FAO.
- Keiffer, C. H. and Ungar, I. A. (2001). The effect of competition and edaphic conditions on the establishment of halophytes on brine affected soils. *Wetlands Ecology and Management*, 9, 469–481. <https://doi.org/10.1023/A:1012280611727>
- Lavado, R. S. and Taboada, M. A. (1988). Water, salt and sodium dynamics in a Natraquoll in Argentina. *Catena*, 15 (6), 577–594. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(88\)90008-2](https://doi.org/10.1016/0341-8162(88)90008-2)
- Lebedeva, I. I., Ovechkin, S. V., Korolyuk, T. V. and Gerasimova, M. I. (2012). Soil-genetic zoning: Principles, goals, structure, and applications. *Eurasian Soil Science*, 45 (7), 639–650. <https://doi.org/10.1134/S1064229312050079>
- Lopatovskaya, O. G. (2009). Soils in the zone affected by mineral water springs at the foothills of the Eastern Sayan Ridge. *Eurasian Soil Science*, 42 (8), 844–849. <https://doi.org/10.1134/S106422930908002X>
- Marsi, M. and Evangelou, V. P. (1991). Chemical and physical behavior of two kentucky soils: I. Sodium-calcium exchange. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 26 (7), 1147–1176. <https://doi.org/10.1080/10934529109375691>
- McCarter, W. J. (1984). The electrical resistivity characteristics of compacted clays. *Geotechnique*, 34 (2), 263–267.
- Moskovchenko, D. V., Babushkin, A. G. and Ubaidulaev, A. A. (2017). Salt pollution of surface water in oil fields of Khanty-Mansi Autonomous Area-Yugra. *Water Resources*, 44 (1), 128–138. <https://doi.org/10.1134/S0097807817010109>
- Munn, D. A. and Stewart, R. (1989). Effect of oil well brine on germination and seedling growth of several crops. *Ohio J. Science*, 89, 92–94.
- Murphy, E. C., Kehew, A., Groenewold, G. and Beal, W. (1988). Leachate generated by an oil-and-gas brine pond site in North Dakota. *Groundwater*, 26 (1), 31–38. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1988.tb00365.x>
- Pessarakli, M. (1991). Formation of saline and sodic soils and their reclamation. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 26 (7), 1303–1320. <https://doi.org/10.1080/10934529109375698>
- Pozdnyakov, A. I. (2008). Electrical parameters of soils and pedogenesis. *Eurasian Soil Science*, 41 (10), 1050–1058. <https://doi.org/10.1134/S1064229308100062>
- Rengasamy, P. (2006). World salinization with emphasis on Australia. *Journal of Experimental Botany*, 57 (5), 1017–1023. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj108>
- Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A. and Richard, G. (2005). Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil and Tillage research*, 83 (2), 173–193. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004>

- Scudiero, E., Skaggs, T.H. and Corwin, D.L. (2017). Simplifying field-scale assessment of spatiotemporal changes of soil salinity. *Science of the Total Environment*, 587–588, 273–281. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.136>
- Solntseva, N.P. and Sadov, A.P. (1997). The effect of saline waste water on soils near the Urengoi oil and condensed gas deposit (Western Siberia). *Eurasian Soil Science*, 30 (3), 277–283.
- Solntseva, N.P. and Sadov, A.P. (2000). Technogenic halogenesis in the soils of forest-tundra and northern taiga ecosystems in Western Siberia. *Eurasian Soil Science*, 33 (9), 987–1000.
- U.S. Salinity Laboratory Staff. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. USDA Handbook No 60. Washington, DC.

Статья поступила в редакцию 4 августа 2019 г.
Статья рекомендована в печать 12 октября 2020 г.

Контактная информация:

Симонова Юлия Владимировна — uvsim@yandex.ru
Русаков Алексей Валентинович — a.rusakov@spbu.ru
Коркина Елена Александровна — lana_d_nv@mail.ru

Soil salinization processes in the impact zone of mineralized water discharge by the case study in the Yaroslavl Volga region, Russia*

Yu. V. Simonova¹, A. V. Rusakov¹, E. A. Korkina²

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

² Nizhneartovsk State University,
56, ul. Lenina, Nizhneartovsk, Khanty-Mansiysk Autonomous Area — Yugra, 628605, Russian Federation

For citation: Simonova, Yu. V., Rusakov, A. V., Korkina, E. A. (2020). Soil salinization processes in the impact zone of mineralized water discharge by the case study in the Yaroslavl Volga region, Russia. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 65 (4), 662–680. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.404> (In Russian)

Humid conditions do not encourage the formation of salt-affected soils due to leaching salts out of soil profiles. Nevertheless, the occurrence of salt-affected soils in a humid climate is evident as a result of other factors excluding the climate. Soil salinity in these landscapes is caused by anthropogenic salinization. The objective of this study was to identify types of chemical composition and salinity level of soils forming within the impact zone of artesian water discharge. We also determined the degree of contrast to adjacent non-saline soils and salt contamination boundaries. Soil and water samples were collected from three sites located in the Yaroslavl' region, the Upper Volga. Sampling was done in June 2017. In the Upper Volga region high-mineralized water rises from saline aquifers via abandoned exploration wells drilled in the 1960s. These soils are found under an average annual rainfall of about 500–700 mm in the taiga zone. This type of climate and vegetation cover normally should lead to the formation of Albic Retisols. Saline waters affecting soils are dominantly Na-Cl or Ca-Na-Cl-SO₄ brines. Total dissolved solids in the saline waters range from 10000 to 259500 mg·L⁻¹. Salt-affected soils have from low to high salinity (0.1–0.8%) but salt content does not exceed 1%. In the study areas, maximum salinity in the investigated soils was fixed near the water table or was

* This research was partially performed at the Research Park of the St. Petersburg State University Center for Chemical Analysis and Materials Research, project 108-8100.

associated with lithic discontinuity or abrupt textural change. Salt leaching from the upper horizons prevails in the course of the annual cycle and that is what differs these soils from hydro-morphic saline soils formed in arid climates. Field electrical surveys of salinity indicated the local zones of salinization. The salinization phenomenon in humid climates is not part of the main pedogenic processes, but an additional process. The upper horizons of salt-affected soils tend to have similar morphological features to zonal and intrazonal soils. The salt-affected soils studied were classified according to WRB as Orthofluvic Fluvisol (Humic, Loamic, Endosalic, Technic), Orthofluvic Gleyic Fluvisol (Humic, Siltic, Endosalic, Raptic), Amphistagnic Albic Retisol (Siltic, Anoaric, Cutanic, Endosalic) and Albic Retisol (Siltic, Anoaric, Cutanic, Endosalic, Raptic).

Keywords: artesian wells, Upper Volga, electrical resistivity, technogenic halogenesis.

References

- Arinushkina, E. V. (1970). *Handbook on the chemical analysis of soils*. Moscow: Moscow University Press. (In Russian)
- Auchmoody, L. R. (1989). Revegetation of a brine-killed forest site. *Soil Science Society of America Journal*, 52, 277–280.
- Bazilevich, N. I. and Pankova, E. I. (1972). Soil classification by the content of soluble salts and ions. *Biulleten' Pochvennogo instituta im. V. V. Dokuchaeva*, 5, 36–40. (In Russian)
- Berezin, A. E., Bazanov, V. A., Mineeva, T. A. and Berezina, L. A. (2008). Influence of highly mineralised water on soil and vegetation cover in oil-producing areas. *Tomsk State University Journal of Biology*, 306, 142–148. (In Russian)
- Boettinger, J. L. and Richardson, J. L. (2001). Saline and wet soils of wetlands in dry climates. In: J. L. Richardson, M. J. Vepraskas, ed., *Wetland soils: genesis, hydrology, landscapes, and classification*, 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 383–390. <https://doi.org/10.1201/9781420026238>
- Charzyński, P., Bednarek, R., Greinert, A., Hulisz, P. and Uzarowicz, Ł. (2013). Classification of technogenic soils according to WRB system in the light of Polish experiences. *Soil Science Annual*, 64 (4), 145–150. <https://doi.org/10.2478/ssa-2013-0023>
- Chernousenko, G. I. and Yamnova, I. A. (2004). About the genesis of soil salinity in the western part of the Transbaikal region. *Eurasian Soil Science*, 37 (4), 341–355.
- Chernousenko, G. I., Yamnova, I. A. and Skripnikova, M. I. (2003). Anthropogenic salinization of soils in Moscow. *Eurasian Soil Science*, 36 (1), 92–100.
- Classification and Diagnostics of Soils of Russia*. (2004). Smolensk: Ojkumena Publ. (In Russian)
- Department for environmental protection and management of Yaroslavl Oblast. (2015). *Ekologicheskij atlas Yaroslavskoj oblasti*. Yaroslavl. (In Russian)
- Evangelou, V. P. and Marsi, M. (2003). Influence of ionic strength on sodium-calcium exchange of two temperate climate soils. *Plant and Soil*, 250 (2), 307–313. <https://doi.org/10.1023/A:1022871204018>
- Evangelou, V. P. and McDonald, L. M. (1999). Influence of Sodium on Soils of Humid Regions. In: M. Pessarakli, ed., *Handbook of Plant and Crop Stress*, 2nd ed. New York and Basel: Marcel Dekker Inc., 17–50.
- Gibson, J. J., Fennell, J., Birks, S. J., Yi, Y., Moncur, M. C., Hansen, B. and Jasechko, S. (2013). Evidence of discharging saline formation water to the Athabasca River in the oil sands mining region, northern Alberta. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 50 (12), 1244–1257. <https://doi.org/10.1139/cjes-2013-0027>
- Glazovskaya, M. A. (1997). *Methodological basis for assessing the ecological and geochemical resistance of soils to anthropogenic impacts*. Moscow: Moscow University Press. (In Russian)
- Handbook for saline soil management*. (2018). Rome and Moscow: FAO, Moscow State University.
- Hulisz, P. (2008). Quantitative and qualitative differentiation of soil salinity in Poland. *Berichte der DBG*, 1, 1–4.
- Hulisz, P. (2016). Coastal marsh soils in Poland: characteristics and problems of classification. *Soil Science Annual*, 67 (1), 37–44. <https://doi.org/10.1515/ssa-2016-0006>
- Hulisz, P., Charzyński, P. and Giani, L. (2010). Application of the WRB classification to salt-affected soils in Poland and Germany. *Polish Journal of Soil Science*, 43 (1), 81–92.

- Hulisz, P., Sowiński, P. and Felińczak-Drabik, A. (2013). Soils contaminated by brine spills in Sędowo. In: P. Charzyński, P. Hulisz, R. Bednarek, ed., *Technogenic soils of Poland*. Torun: Polish Society of Soil Science, 157–170.
- IUSS Working Group WRB. (2015). *World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. World Soil Resources Reports No 106. Rome: FAO.
- Keiffer, C. H. and Ungar, I. A. (2001). The effect of competition and edaphic conditions on the establishment of halophytes on brine affected soils. *Wetlands Ecology and Management*, 9, 469–481. <https://doi.org/10.1023/A:1012280611727>
- Lagovskij, E. (1861). *Description of the Great Salts (Posad of Kostroma Province)*. Kostroma: Tipografia P. andronikova Publ. (In Russian)
- Lavado, R. S. and Taboada, M. A. (1988). Water, salt and sodium dynamics in a Natraquoll in Argentina. *Catena*, 15 (6), 577–594. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(88\)90008-2](https://doi.org/10.1016/0341-8162(88)90008-2)
- Lebedeva, I. I., Ovechkin, S. V., Korolyuk, T. V. and Gerasimova, M. I. (2012). Soil-genetic zoning: Principles, goals, structure, and applications. *Eurasian Soil Science*, 45 (7), 639–650. <https://doi.org/10.1134/S1064229312050079>
- Liharev, B. K. (1924). Northern provinces of European Russia. *Estestvennyye proizvoditel'nye sily Rossii. Poleznye iskopaemye. Kamennaia sol' i soliane ozera*, 4 (35), 41–64. (In Russian)
- Lopatovskaya, O. G. (2009). Soils in the zone affected by mineral water springs at the foothills of the Eastern Sayan Ridge. *Eurasian Soil Science*, 42 (8), 844–849. <https://doi.org/10.1134/S106422930908002X>
- Marsi, M. and Evangelou, V. P. (1991). Chemical and physical behavior of two kentucky soils: I. Sodium-calcium exchange. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 26 (7), 1147–1176. <https://doi.org/10.1080/10934529109375691>
- McCarter, W. J. (1984). The electrical resistivity characteristics of compacted clays. *Geotechnique*, 34 (2), 263–267.
- Moskovchenko, D. V., Babushkin, A. G. and Ubaidulaev, A. A. (2017). Salt pollution of surface water in oil fields of Khanty-Mansi Autonomous Area-Yugra. *Water Resources*, 44 (1), 128–138. <https://doi.org/10.1134/S0097807817010109>
- Munn, D. A. and Stewart, R. (1989). Effect of oil well brine on germination and seedling growth of several crops. *Ohio J. Science*, 89, 92–94.
- Murphy, E. C., Kehew, A., Groenewold, G. and Beal, W. (1988). Leachate generated by an oil-and-gas brine pond site in North Dakota. *Groundwater*, 26 (1), 31–38. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1988.tb00365.x>
- Paramonova, A. E., Ubugunova, V. I., Chernousenko, G. I., Ubugunov, V. L., Baldanov, B. C. and Tsyrempirov, E. G. (2017). Saline soils of the floodplain of the upper reaches of the Irkut river: morphogenetic and agrochemical properties. *Vestnik Buriatskoi gosudarstvennoi sel'skokhoziaistvennoi akademii im. V. R. Filippova*, 2 (47), 30–38. (In Russian)
- Pessaraki, M. (1991). Formation of saline and sodic soils and their reclamation. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 26 (7), 1303–1320. <https://doi.org/10.1080/10934529109375698>
- Pozdnyakov, A. I. (2008). Electrical parameters of soils and pedogenesis. *Eurasian Soil Science*, 41 (10), 1050–1058. <https://doi.org/10.1134/S1064229308100062>
- Pozdnyakova, A. D., Pozdnyakov, L. A. and Antsiferova, O. N. (2018). Universal device for measuring electrical properties of soils. *Bulletin of Science and Practice*, 4 (4), 232–245. <http://doi.org/10.5281/zenodo.1218483> (In Russian)
- Rengasamy, P. (2006). World salinization with emphasis on Australia. *Journal of Experimental Botany*, 57 (5), 1017–1023. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj108>
- Ronzhina, T. V. and Krechetov, P. P. (2013). Changes in soil acid-base composition as a result of geochemical buffering due to highly mineralized water impact on spod-podzolic soils. *Fundamental research*, 6 (10), 1293–1296. (In Russian)
- Salt-affected soils of Russia*. (2006). Moscow: IKC Akademkniga Publ. (In Russian)
- Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A. and Richard, G. (2005). Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil and Tillage research*, 83 (2), 173–193. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004>
- Scudiero, E., Skaggs, T. H. and Corwin, D. L. (2017). Simplifying field-scale assessment of spatiotemporal changes of soil salinity. *Science of the Total Environment*, 587–588, 273–281. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.136>

- Soil geography and soil zoning of the central economic region of the USSR.* (1972). Moscow: Moscow University Press. (In Russian)
- Solntseva, N. P. (1998). *Oil mining and geochemical transformation of landscapes.* Moscow: Moscow University Press. (In Russian)
- Solntseva, N. P. and Sadv, A. P. (1997). The effect of saline waste water on soils near the Urengoi oil and condensed gas deposit (Western Siberia). *Eurasian Soil Science*, 30 (3), 277–283.
- Solntseva, N. P. and Sadv, A. P. (2000). Technogenic halogenesis in the soils of forest-tundra and northern taiga ecosystems in Western Siberia. *Eurasian Soil Science*, 33 (9), 987–1000.
- Theories and Methods of Soil Physics.* (2007). Moscow: Grif i K Publ. (In Russian)
- U.S. Salinity Laboratory Staff. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.* USDA Handbook No 60. Washington, DC.
- Yakimov, A. S., Svanidze, I. G., Kazanceva, M. N. and Soromotin, A. V. (2014). Change in soil properties of river valleys in the southern taiga of Western Siberia under the action of mineralized artesian waters. *Eurasian Soil Science*, 3, 364–374. (In Russian)

Received: August 4, 2019
Accepted: October 12, 2020

Contact information:

Yulia V. Simonova — uvsim@yandex.ru
Alexey V. Rusakov — a.rusakov@spbu.ru
Elena A. Korkina — lena_d_nv@mail.ru