УДК 631.4,556.5

ЗАСОЛЕННЫЕ ПОЧВЫ РОСТОВСКОЙ НИЗИНЫ (ЯРОСЛАВСКАЯ ОБЛАСТЬ): МОРФОЛОГИЯ, ГЕНЕЗИС И ДИНАМИКА ЗАСОЛЕНИЯ В ГОДОВОМ ГИДРОЛОГИЧЕСКОМ ЦИКЛЕ

© 2018 г. Ю. В. Симонова*, А. В. Русаков, А. Г. Рюмин

Санкт-Петербургский государственный университет
Россия, 199034 Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9
**https://orcid.org/0000-0001-5835-5099, e-mail: uvsim@yandex.ru*

Имеющиеся в литературе данные о засоленных почвах Ростовской низины Ярославского Поволжья и котловины оз. Неро основываются на наблюдениях начала прошлого столетия. Современные исследования потенциальных ареалов засоления в этом районе отсутствуют. В результате проведения многолетних этапов по снижению уровня грунтовых вод в пределах Ростовской низины на фоне известных тенденций изменения климата вопрос существования здесь феномена засоления остается открытым. По итогам годового цикла мониторинговых исследований 2016–2017 гг. произведена оценка засоления отдельного субаквального ландшафта II террасы оз. Неро. Обоснована возможность образования гидроморфных солончаков, рассмотрены факторы и условия их формирования и относительно устойчивого функционирования в гумидном климате южно-таежной подзоны. На примере двух почвенных разрезов импактной зоны соленого родника (бывшего центра солеварения) выявлена сезонная динамика профильного распределения легкорастворимых солей, карбонатов, гипса и запасов солей корнеобитаемого слоя. В концепции определения направления многолетней динамики засоления Варницкого ландшафта проанализированы данные о химизме воды источника, грунтовых вод и почв за столетний временно́й интервал спорадических наблюдений. Для выяснения активности процесса привноса солей водами Варницкого источника разрезы импактной зоны сравнивали с фоновым участком. Данные современного этапа мониторинга свидетельствуют о незатухающих процессах пульсации содержания солей в почвах ландшафта и миграции солей за пределы почвенной толщи в связанную систему водотоков бассейна оз. Неро.

Ключевые слова: озеро Неро, засоленные почвы, мониторинг, соленый источник, Варницы

DOI: 10.19047/0136-1694-2018-93-40-74

ВВЕДЕНИЕ

Ареалы распространения (и встречаемости) засоленных почв в пределах Русской равнины относятся к степной и отчасти лесостепной зоне, по которой проходит их северная граница (Панкова и др., 2017). Гораздо меньше известно об ареалах засоленных почв гумидных ландшафтов таежной зоны, где преобладание стока над испарением приводит к развитию процессов выщелачивания, а на слабодренируемых участках скорее представляет опасность заболачивания, чем появления ареалов засоленных почв. Между тем в последнее время появился ряд работ о влиянии выходов минеральных источников и близкого залегания высокоминерализованных грунтовых вод (**ГВ**) на почвенный покров тайги и лесостепи, где они становятся мощным фактором формирования засоленных интразональных почв (Лопатовская, 2009; Лопатовская и др., 2011; Hulisz, 2008; Якимов и др., 2014; Парамонова и др., 2017; Убугунов и др., 2017).

Существование ареалов засоленных почв в настоящей статье показано для котловины оз. Неро Ростовской низины Ярославского Поволжья, располагающейся в подзоне южной тайги. Ростовский район Ярославской области и г. Ростов – местность, исторически известная во времена Новгородского княжества на Руси как “ростовские варничные земли” (Черкасова, 1995). Развитию солеварения на территории способствовали многочисленные естественные соленые ключи.

Как известно, геоморфологическая и гидрогеологическая микрозональность в любой природной зоне может настолько серьезно сказываться на составе ГВ, что способна превращать их в основного геологического агента для передачи, накопления и выделения соли (Salama et al., 1999). Так, на отдельных участках создаются нетипичные для биоклиматической зоны соотношения между интенсивностью выноса солей и их накоплением в почвенной толще. Характерные для бассейна оз. Неро выходы соленых вод и гидрохимические аномалии, проявляющиеся в резком сокращении зоны пресных гидрокарбонатно-кальциевых ГВ, – есть признаки тектонических нарушений региональной гидродинамики артезианских структур (Новский, 1975; Лобанов, 2002). Рост минерализации при движении грунтового потока от водораздела к озеру сопровождается сменой гидрохимических фаций в сторону увеличения доли

Na^+, SO_4^{2-} и Cl^-. Ростовская котловина, дренирующая грунтовый водоносный комплекс вышележащих поверхностей, сама по себе является областью распространения ГВ с уровнем минерализации, превышающим региональную фоновую величину (300 мг/л) (Лобанов, 2002) и среднюю величину для районов избыточного увлажнения (250 мг/л) (Зверев, 2013). На участках смешения ГВ с водами, перетекающими из подстилающих водоносных комплексов, минерализация возрастает уже до 1000 мг/л и более. Таким образом, близкое залегание (0.3–1.0 м) на низких террасах озера напорных жестких, солоноватых и даже соленых ГВ вызывает, с одной стороны, развитие почвенного гидроморфизма, с другой – процессов соленакопления.

Воздействие сильноминерализованных вод в Ростовской низине, области умеренного климата, как и в гумидных ландшафтах резко континентального климата Западной Сибири, приводит к трансформации дерново-глеевых и глееватых, аллювиальных, лугово-болотных, болотных почв в соответствующие засоленные разности и гидроморфные солончаки различного типа засоления. Для таких почв характерна пятнистость ареалов, а в случаях точечного излива источника (скважины) – ограниченность его импактной зоной, динамичность процессов соленакопления, тесно связанная с режимом ГВ, зависимость от химического состава выгружаемой с минерализованными водами солевой массы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Геоморфология и почвенное районирование. Участок исследования (рис. 1а, в) расположен в пределах Ростовской низины (абс. отм. 95−125 м) Ярославского Поволжья, на II террасе оз. Неро, и входит в совершенно особый Ростовский приозерный подрайон темноцветных заболоченных и солончаковатых почв Ростово-Борисоглебского почвенного района Среднерусской провинции среднесуглинистых почв южно-таежной почвенной подзоны. Водораздельные пространства здесь заняты дерново-подзолистыми средне- и тяжелосуглинистыми почвами на покровных суглинках, а в озерной котловине (абс. отм. 95−105 м) наиболее типичными представителями в структуре почвенного покрова являются суглинистые разновидности дерново-глеевых и глееватых почв (География почв…, 1972).

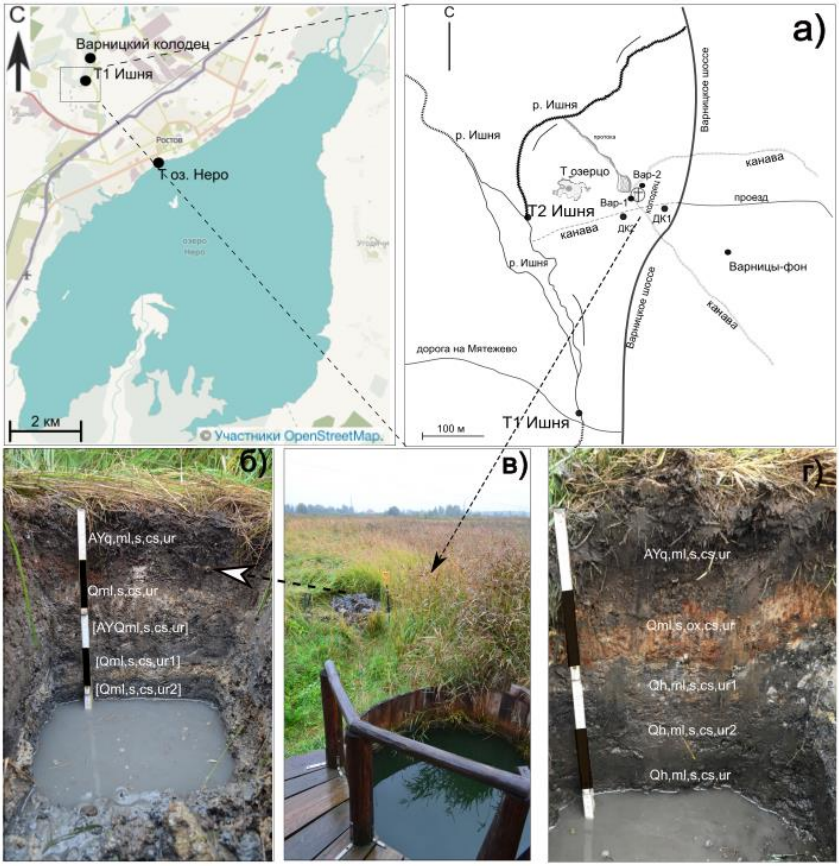

Рис. 1. Схема расположения участка исследований и точек отбора проб, фотографии ландшафта и почвенных профилей: а – схема участка исследований с местами почвенных разрезов и точками отбора проб воды: Т – точки отбора проб воды; ДК – точки отбора проб воды из канавы, дренирующей участок исследований; Вар-1, Вар-2, Варницы-фон – почвенные разрезы Варницы-1, Варницы-2 и фоновый разрез соответственно; б – фото почвенного профиля разр. Варницы-1; в – фото Варницкого колодца; г – фото почвенного профиля разр. Варницы-2.

Объекты исследования находятся в геохимически подчиненном субаквальном ландшафте, имеющим вид старицеобразного понижения (абс. отм. 97–99 м). Микрорельеф плоско-западинный, закочкаренный, нарушенный насыпями

техногенного характера. По отношению к участку исследования долина р. Ишни, огибающая его с севера и запада, является местным базисом дренирования. Река имеет непостоянную ширину (2−20 м), меандрирующее русло, широкую заболоченную пойму и слабо врезанную ложбину стока; водоток берет начало на заболоченном массиве севернее участка исследования и впадает в оз. Неро. Как и все реки Ярославской области, Ишня относится к восточно-европейскому типу с выраженным весенним половодьем, летней и зимней меженью. Орографическая замкнутость участка, низкий уклон в сторону реки создает условия для развития здесь процессов заболачивания. В целях усиления дренирования участок был прорезан канавой.

Климат. Климат Ярославской области умеренно-континентальный и характеризуется избыточным неустойчивым увлажнением (КУ = 1.25−1.50). Среднегодовая сумма осадков – 500−600 мм. Среднегодовая температура – 4.6°С. Наиболее частые температуры самого холодного месяца года (январь) – –8…–10°С, самого теплого (июль) – 15−18°С (Экологический атлас …, 2015). Многолетние наблюдения в бассейне Верхней Волги, которому принадлежит оз. Неро, показали устойчивый рост температуры, начиная с середины прошлого столетия, с наиболее заметными изменениями в интервале 1976−2000 гг. За холодный период повышение температуры составило 2.0°С, за теплый – 1.4°С. Для бассейна Верхней Волги, и для оз. Неро в том числе, свойственна глобальная тенденция роста суммарного годового количества осадков за счет увеличения испарения с поверхности Мирового океана, и в то же время уменьшение их в теплый сухой период года на фоне общего сокращения испарения с поверхности континентальных водоемов вне зависимости от фазы гидрологического цикла (Бикбулатов, Лазарева, 2008).

Данные о температуре и осадках по метеостанции Ростов Великий за 2016–2017 гг. получены с электронного ресурса https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Ростове. Климатические данные из архива за 1988 и 1990 гг. предоставлены Ярославским ЦГМС, за что авторы выражают сотрудникам Центра и его Руководителю искреннюю благодарность. Среднемесячные температуры и суммы осадков за период современного мониторинга 2016–2017 гг. и двух лет точечных наблюдений почвенного профиля – 1988 и 1990 гг. при-

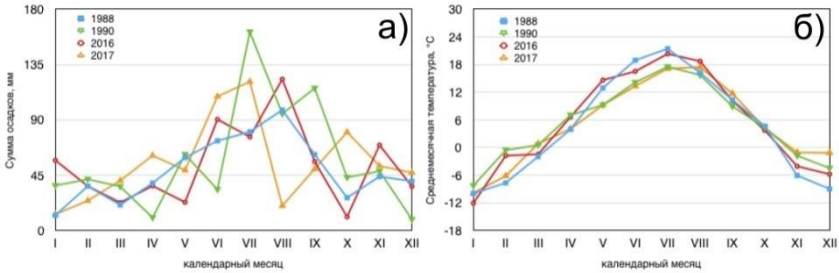

Рис. 2. Климатические характеристики района исследований: а – график хода среднемесячной суммы осадков за 1988, 1990, 2016 и 2017 гг. исследований; б – график хода среднемесячной температуры за 1988, 1990, 2016 и 2017 гг. исследований.

ведены на графике (рис. 2). Среднегодовая температура в указанные годы (4.5–5.4 °С) превышает среднюю многолетнюю температуру (3.4 °С) первой половины XX столетия (Справочник по климату…, 1964), а среднегодовая сумма осадков (590–829 мм) подтверждает общий тренд усиления увлажнения.

Гидрогеологические особенности бассейна оз. Неро. Грунтовые воды современных аллювиальных отложений, слагающих пойменные и надпойменные террасы оз. Неро, питаются преимущественно за счет атмосферных осадков и паводковых вод, но во многих местах, кроме того, за счет подтока из дочетвертичных отложений. В случаях, где наблюдается связь аллювиального водоносного горизонта с более минерализованными водами нижних гидродинамических этажей, минерализация вод возрастает до 1000 мг/л и более.

Гидравлическая связь между пресными водами водоносных горизонтов четвертичных отложений с глубоко залегающими минерализованными водами коренных пород пермско-триасового возраста может осуществляться в бассейне оз. Неро на участках гидрогеологических окон – зонах повышенной трещиноватости и отсутствия юрского водоупора, роль которого в гидрогеологическом разрезе играет келловей-кимериджский горизонт (рис. 3).
Кроме того, гидрогеологические окна часто бывают приурочены к погребенным долинам рек, в палеоврезах которых встречается разгрузка соленых вод нижних горизонтов в вышележащие (Кирюхин, Норова, 2009). Система доледниковых палеодолин пересекает Рос-

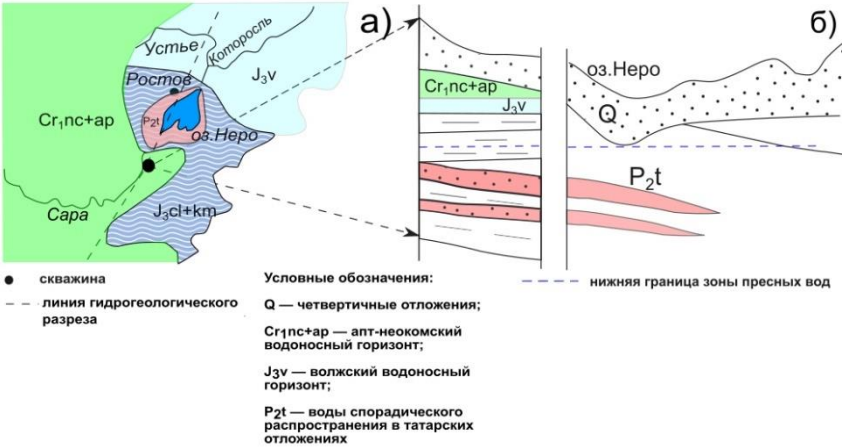

Рис. 3. Гидрогеологическая ситуация района исследований (Гидрогеология СССР…, 1966): а – местоположение скважины на гидрогеологической карте дочетвертичных отложений; б – стратиграфическое расчленение по скважине.

товскую котловину в нескольких местах (Государственная гео-логическая карта…, 2015). Глубокие размывы погребенныхречных долин в Ростовской низине вскрывают мощные горизонты не только пресных, но и минеральных подземных вод (Новский, 1975). На пути перемещения солей с водным потоком палеоканалы могут выступать транзитом с последующей разгрузкой в понижениях, приводя к образованию засоленных почв и пятен просачивания. В региональном масштабе в закрытых бассейнах этот процесс может создавать соленые озера (Salama et al., 1999).

Варницкий соленый источник является родником восходящего типа, по-видимому, питающийся водами, заключенными в отложениях татарского яруса верхней перми, имеющего стратиграфический индекс P_2t. Отложения татарского яруса пестры по составу, представлены глинами и алевритами с прослоями и линзами песчаников, песков, мергелей, известняков, доломитов и гипсов. Эти отложения не представляют единого водоносного горизонта, а имеют линзовидное залегание (Гидрогеология СССР…, 1966).

Режим грунтовых вод. Грунтовые воды участка исследований слабонапорные, большую часть года залегают на глубине 30–35 см. Поток ГВ направлен к руслу р. Ишни; величина уклона

зеркала ГВ незначительна, что создает условия для развития гидроморфизма. Наиболее заметные колебания уровня ГВ связаны с выпадающими атмосферными осадками, а весной и с периодами снеготаяния и увеличенного притока со стороны окружающей котловину озера Борисоглебской возвышенности (абс. отм. 200 м и более). За период наблюдений 2016–2017 гг. максимально высокий уровень ГВ (30 см) приходился на конец сентября 2016 г. и май 2017 г. Максимально низкий уровень (70 см) зафиксирован в конце сентября 2017 г. Как и ожидалось, пики подъемов ГВ соответствовали наибольшему количеству выпавших осадков или периоду интенсивного снеготаяния. В зимнюю межень, когда инфильтрация атмосферных осадков прекращается, сколько-нибудь значительного понижения уровня воды не наблюдается за счет подземного питания.

Растительность. По ботанико-географической характеристике Ярославской области бассейн оз. Неро находится в подзоне смешанных лесов с хвойными и широколиственными породами. На лугах, расположенных вблизи оз. Неро, в местах выходов соленых источников произрастают виды, связанные с засоленными почвами: *Triglochin maritimum, Juncus gerardii, Trifolium fragiferum, Cnidium dubium* (Воронин и др., 2005). В растительном сообществе участка исследований преобладает лугово-болотная растительность. Наличие засоления отражается на составе видов и характере растительных сообществ; во флоре Варницкого ветланда (водно-болотные угодья) встречаются галофильные виды, например, *Juncus gerardii, Puccinellia distans.* В некоторых местах выхода на поверхность ГВ сформировались небольшие стоячие озерки (поды) глубиной до 0.3 м, пересыхающие во время периодов низкого стока и оставляющие белый налет солей на поверхности. Подобные озерки являются местообитанием *Triglochin maritimum*.

История изучения. В административном отношении участок исследований принадлежит Ростовскому району Ярославской области и располагается в 1 км от Троице-Сергиева Варницкого мужского монастыря. В 1966 г. ему присвоен статус ландшафтного регионального памятника природы “Соляной источник Варницы”. Одновременно участок находится на территории археологического памятника – производственной зоны солеваренного промысла в составе Варницкой слободы (Каретников, 2008). Полагают, что

добыча соли продолжалась здесь несколько веков и прекратилась в XVIII веке. В государственном архиве древних актов сохранился план соляного завода XVII в., откуда известно, что завод состоял из четырех больших варниц, колодца, ларя, большого двора и двух больших соляных амбаров (Вахрина, 2014). Уже на начало XX столетия от объектов завода остался только колодец с соленой водой, однако место продолжает привлекать внимание исследователей.

Первые данные химического анализа воды Варницкого колодца найдены в очерке Б.Л. Бернштейна (1915). Немногим позже, в 1917 г., химический анализ воды колодца выполнен с целью геологоразведки в лаборатории Петроградского Горного Института (табл. 1).

Уже спустя десятилетия пробы воды соленого родника анализировались в рамках регионального гидрогеологического картографирования (Гидрогеология СССР…, 1966), а в период крупномасштабного почвенного картографирования Ярославского Поволжья (1988–1990 гг.) экспедицией кафедры почвоведения ЛГУ были исследованы два почвенных разреза вблизи Варницкого источника (Русаков, 1993). В этот же период отобрали пробы воды из Варницкого источника, ГВ на участке исследования, дренажных вод из мелиоративной канавы участка исследования (ДК1), р. Ишни (Т1 Ишня) и оз. Неро со стороны устья Ишни (Т озеро). Пробы речной воды отбирали в створе, расположенном вниз по течению от источника и ниже спуска дренажных вод. Расположение точек опробования показано на карте (рис. 1а).

Накопленные за 100-летний период материалы наблюдений позволяют косвенно оценивать динамику компонентов и индикаторов состояния уникального Варницкого ландшафта, что решило выбор в пользу данного участка как ключевого полигона мониторинга засоления Ростовской котловины.

Таблица 1. Результаты анализа воды Варницкого источника (Горский, 1926)

Удельный вес	Сухой остаток	SO_4^{2-}	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
	найдено в 100 вес. частях						
1.0065	1.24	0.20	0.60	0.09	0.04	0.294	0.0079

Современный этап мониторинговых исследований. Отправной точкой современного этапа почвенного мониторинга стали разрезы, заложенные в конце сентября 2016 г. Разр. Варницы-1 (57.21004 N, 39.37966 E) и Варницы-2 (57.21008 N, 39.37977 E) расположены в 4 м на запад и в 5 м на восток от Варницкого колодца, соответственно (рис. 1б-г). Далее образцы почвы отбирали максимально близко к исходным разрезам с периодичностью 1 раз в сезон. Гидрохимические исследования проводили в течение года с периодичностью 1 раз в сезон и чаще, с сохранением схемы отбора 1990 г. Предложенная схема позволяет реализовать гидропедологический подход (Bouma, 2005), важный для оценки трансформации химического состава воды в системе глубинные подземные воды–грунтовые воды–почвенный раствор–поверхностные водоемы. По сравнению с 1990 г. в отдельные сезоны мониторинга для получения более полной картины влияния участка на миграцию химических элементов в гидрографическую сеть схема отбора была расширена: в дополнительных точках отбирали пробы речной воды (Т2 Ишня), дренажных вод (ДК2 и воды из периодически пересыхающего места выхода на поверхность ГВ, условно обозначенного на карте Т озерцо (рис. 1а).

Для учета вклада подземного притока солей в импактной зоне источника был заложен разрез фоновой почвы Варницы-фон. Пробы из разреза отбирали однократно 31.05.2017 г. Необходимо оговориться, что уникальность объекта исследования создало сложности при выборе чистого фона, связанные с отсутствием среди сопредельных ландшафтно-территориальных единиц топографически эквивалентной позиции.

Разрез фоновой почвы (57.20930 N, 39.38192 E, абс. отм. 99.8 м) располагается на территории бывшей пашни, отделенной от участка исследования Варницким шоссе, в 150 м от колодца (рис. 1а), и представляет собой агрозем темный глееватый постагрогенный (Классификация…, 2004). Для понижения уровня ГВ по периметру фонового участка в 1960-е гг. были организованы глубокие открытые дренажные канавы. В настоящее время уровень ГВ фиксируется на глубине 105 см.

Методы исследований. Для почвенных образцов выполнен комплекс исследований, включающий определение $C_{общ}$ на анализаторе LECO CHN628, содержания карбонатов и гипса – весовым

методом, гранулометрического состава – пипет-методом с предварительной пирофосфатной обработкой. Углерод органических соединений ($C_{орг}$) рассчитывали по разнице валового и углерода карбонатов. Анализ поверхностных, грунтовых вод и водной вытяжки почвы (почва : вода 1 : 5) выполняли традиционными методами (Аринушкина, 1970), в том числе величину pH определяли потенциометрически, плотного остатка и SO_4^{2-} – весовым, Cl^- – аргентометрическим, общая щелочность и щелочность от растворимых карбонатов в почве – титриметрическим методами. Содержание анионов CO_3^{2-} и HCO_3^- в воде исследовали в полевых условиях титриметрическим методом (с 0.05 н. раствором HCl). Концентрацию Ca^{2+} и Mg^{2+} в воде и водной почвенной вытяжке определяли комплексонометрическим методом, Na^+ и K^+ – в непрерывном пламени на приборе Shimadzu AA-7000, работающем в режиме эмиссии. Расчет запаса солей производили исходя из данных общей суммы солей и данных о плотности сложения, определенной методом врезных цилиндров.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Территория участка обнаруживает все признаки области разгрузки подземных вод, где установившийся на момент опробования гидрохимический режим имеет исключительное значение как регулирующего фактора почвообразования гидроморфных солончаков. Всего в объем исследований современного этапа мониторинга, охваченного настоящей статьей, вошли годовой цикл гидрологических и почвенных наблюдений с сентября 2016 г. по сентябрь 2017 г.

Наши исследования воды Варницкого источника в этот период показали, что источник относится к хлоридно-натриевому типу. Формула Курлова, в которую входит значение минерализации (г/л) и величины макрокомпонентов (экв.%), усредненные за период исследований, для вод источника имеет вид:

$$M12.89\frac{Cl78SO_4 21}{Na65Ca22Mg14}$$

Уровень воды в колодце большую часть года находится на глубине 30–35 см и тесно связан с положением зеркала грунтовых вод. Состав выщелачиваемой и выносимой на дневную поверхность соляной массы с водой Варницкого родника можно считать

относительно устойчивым, если сравнивать с данными более ранних анализов, сделанных в период 1903–2016 гг. Величина плотного остатка и содержание некоторых ионов подвержены колебаниям, но в силу временных разрывов между наблюдениями их можно отнести, во-первых, на разницу в методах определения отдельных показателей, и, во-вторых, на сезонные различия в составе воды, что совершенно нормально при такой небольшой глубине колодца (165 см). Тем не менее уровень минерализации и соотношение ионов в воде сохраняется, а современный химический состав в пределах сезонных вариаций хорошо сопоставим с данными химического анализа воды колодца, выполненными в 1917 г.

В течение поквартальных исследований 2016–2017 гг. размах флуктуаций по концентрациям отдельных ионов (за исключением HCO_3^-) в воде Варницкого источника не принимал сколько-нибудь значительных размеров. На диаграмме Пайпера все сезонные точки мониторинга воды колодца ложатся в область хлоридно-натриевого типа химизма (рис. 4). Максимального уровня за год (13 400 и

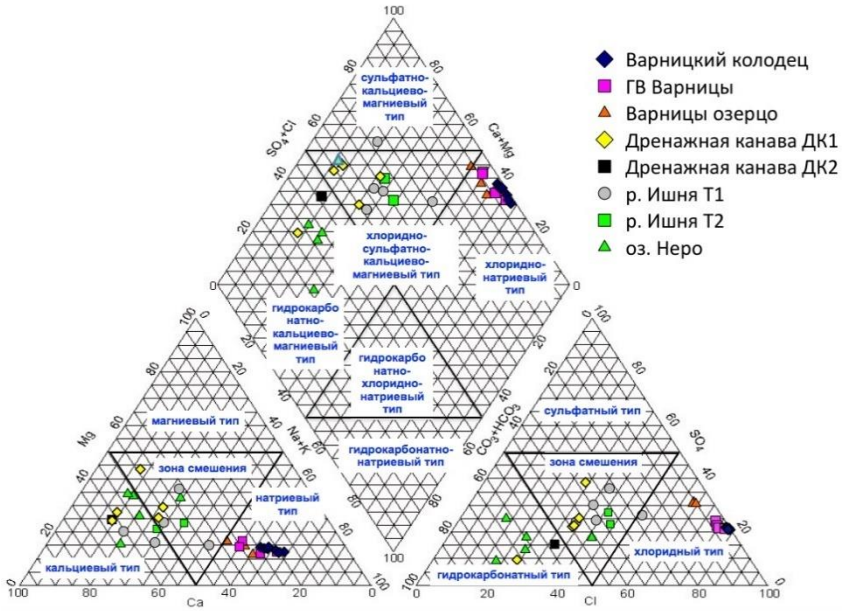

Рис. 4. Диаграмма химического состава природных вод (диаграмма Пайпера) для всех точек маршрута гидрологических исследований.

13 600 мг/л) минерализация достигала в конце весны и начале лета, в даты отбора 31.05.2017 г. и 12.06.2017 г.В макрокомпонентном химическом составе ГВ (согласно данным за 1990 и 2016–2017 гг.) по сравнению с генетически связанными подземными водами отмечены меньшее содержание Cl^- и Na^+ и относительный прирост SO_4^{2-}, Ca^{2+} и HCO_3^- . Среднегодовые величины минерализации грунтовых и родниковых вод практически совпадают, и в то же время максимум минерализации ГВ (14600 мг/л) превышает максимум этой величины для вод источника (13600 мг/л). По сравнению с водой колодца амплитуда сезонных колебаний химического состава ГВ значительно шире.

Почвенные профили участка исследования осложнены не только галогенезом, но и серией погребенных слоев и артефактов солеварения в виде угольков, древесины, кирпичной крошки, солеваренного шлака. Реакция среды в водной вытяжке почв разр. Варницы-1 и Варницы-2 варьирует от нейтральной до слабощелочной во всем профиле, величина pH возрастает с глубиной и в среднем имеет более высокое значение по сравнению с фоновой почвой, где реакция среды нейтральная и близкая к нейтральной, а величина pH убывает вниз по профилю (табл. 2). Разрезы вблизи колодца заметно отличаются от фона высоким содержанием $C_{орг}$, который в большом количестве содержится не только в гумусовых горизонтах, но и нижележащих квазиглеевых. Гумусовые, и в меньшей степени квазиглеевые, горизонты оторфованы, содержат слаборазложившиеся растительные остатки, что является следствием консервации органического вещества, в первую очередь, в условиях гидроморфизма и, во вторую – соленакопления. Морфологические особенности разрезов и физико-химическая характеристика профилей первого сезона мониторинга приводились ранее (Симонова, Рюмин, 2017).

В гранулометрическом составе профилей преобладают генетически обусловленные фракции современных озерных отложений крупной пыли и песка. Варьирование по содержанию крупных фракций связано с литологическим фактором слоистости озерных суглинков (Русаков, 1993), что особенно обращает на себя внимание супесчаной прослойкой окисленно-квазиглеевого гор. Qox в

Таблица 2. Физико-химическая характеристика почвенных профилей

Горизонт	Глубина, см	pH	$C_{орг}$, %	Содержание фракций (мм),%						
				1.00–0.25	0.25–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001	<0.001	<0.01
Варницы-1 (22.09.2016)										
Дернина	0+6	–	33.7*	–	–	–	–	–	–	–
AYq,ml,s,cs,ur	0–10	6.6	7.3	17	25	41	5	8	4	17
Qml,s,cs,ur	10–20	7.2	0.6	4	16	59	1	5	15	21
[AYQml,s,cs,ur]	20–25	7.0	1.7	10	14	55	1	5	15	21
[Qml,s,cs,ur1]	25–35	7.5	0.7	1	26	51	1	5	16	22
[Qml,s,cs,ur2]	35–45	7.4	1.0		26	46	1	4	15	20
Варницы-2 (22.09.2016)										
Дернина	0+5	–	45.6*	–	–	–	–	–	–	–
AYq,ml,s,cs,ur	0–6	7.1	11.8	13	29	40	6	10	2	18
Qml,s,ox,cs,ur	6–13	6.8	1.2	39	33	15	2	5	6	13
Qh,ml,s,cs,ur1	13–25	7.3	3.5	11	21	48	1	5	14	20
Qh,ml,s,cs,ur2	25–43	7.3	7.2	10	19	50	2	7	12	21
Qml,s,cs,ur	43–50	7.4	0.6	16	23	43	0		13	18
Варницы-фон (31.05.2017)										
PUg,s,pa1	0–12	6.8	3.2	23	33	25	5	12	2	19
PUg,pa2	12–30	6.3	3.7	21	29	24	6	13	7	26
Cg1	30–40	6.6	0.3	23	30	27	4	10	6	20
2Cg2	40–60	6.1	0.2	6	23	37	5	12	17	34
2Cg3	60–80	6.3	0.3	1	43	17	5	12	22	39
2Cg4	80–105	5.9	0.1	2	24	39	6	11	18	35

* Величина потери при прокаливании, прочерк – значение не определяли.

разр. Варницы-2. Фоновая почва, слабодифференцированная в верхней части, имеет двучленное строение профиля. Тем не менее супесчаный крупнопылевато-песчаный состав всех трех почв позволяет не учитывать текстурные различия при оценке состояния засоления.

Несмотря на хлоридно-натриевый тип химизма ГВ (Cl^- – 6000 мг/л, Na^+ – 3000 мг/л), заданный подтоком из нижележащих водоносных комплексов, высокая концентрация SO_4^{2-} (более 2000 мг/л) и Ca^{2+} (1000 мг/л) обеспечивает преобладание этих ионов в водной вытяжке почвы. Механизм относительного и абсолютного обогащения почвы и неглубоких подземных вод сульфатами на фоне хлоридно-натриевого химизма обязан выпадению их из раствора и закреплению при пониженных температурах в фазы повышенной водности, способствующие интенсивному вымыванию Cl^- (Ковда, 1946). Образующийся в результате суброзии подземных отложений избыток SO_4^{2-} и Ca^{2+} осаждается из раствора почвенно-грунтовых вод в твердой фазе почвы в виде гипса вторым после карбоната кальция. Аккумуляции карбонатов и гипса представлены в почвенном профиле в виде прослоев, линз, и более мощных выделений – горизонтов карбонатно-гипсовых гажевых отложений, на которых сформированы почвенные профили разрезов Варницы-1 и Варницы-2. Неоднократно встреченные в замкнутых понижениях залежи луговой извести и мергеля исследователи Ростовской приозерной котловины относят к отложениям подземных вод, связанных с коренными породами пермской системы (Чижиков, 1956).

В гидроморфных и полугидроморфных почвах аккумуляция гипсовых новообразований является результатом внутрипрофильных почвенных процессов (Ямнова, Панкова, 2013). Согласно разработанной авторами классификации гипсовых новообразований, форма найденного в разрезах гипса относится к мергелистому подтипу мучнистого морфотипа. Максимум накопления гипса наблюдается в средней части профиля и на границе капиллярной каймы, где его содержание в отдельные сезоны достигает 50–70%.

Максимумы карбонатов (вместе с максимумами солей) чаще всего приурочены к поверхностным и богатым органическим веществом горизонтам, там они могут быть представлены в виде отдельных карбонатных гнезд; содержание карбонатов в течение

года может достигать 40%.

Карбонатно-гипсовые линзы и слои имеют неравномерную окраску от желтовато-палевой до чисто белой при подсыхании с пятнами ожелезнения (5YR 8/1, 7,5YR 8/1, 5YR 5/6). Разр. Варницы-2 морфологически отличается наличием окисленно-квазиглеевого гор. Qox, неоднородно окрашенного, желтовато-палево-охристого цвета с обилием ржавых пятен (5YR 6/6, Gley1 8/10Y). В обоих случаях сочетание карбонатно-гипсовых и гумусовых прослоев создает своеобразный морфологический облик почвенного профиля (рис. 1б, г).

Для всех сезонов наблюдений 2016–2017 гг. построены диаграммы распределения солей, карбонатов и гипса по профилю (рис. 5, 6), приведены значения суммы солей (∑сол) и суммы токсичных солей (∑токс) (табл. 3). В солевых профилях обращает на себя внимание наличие нескольких максимумов солей, которые

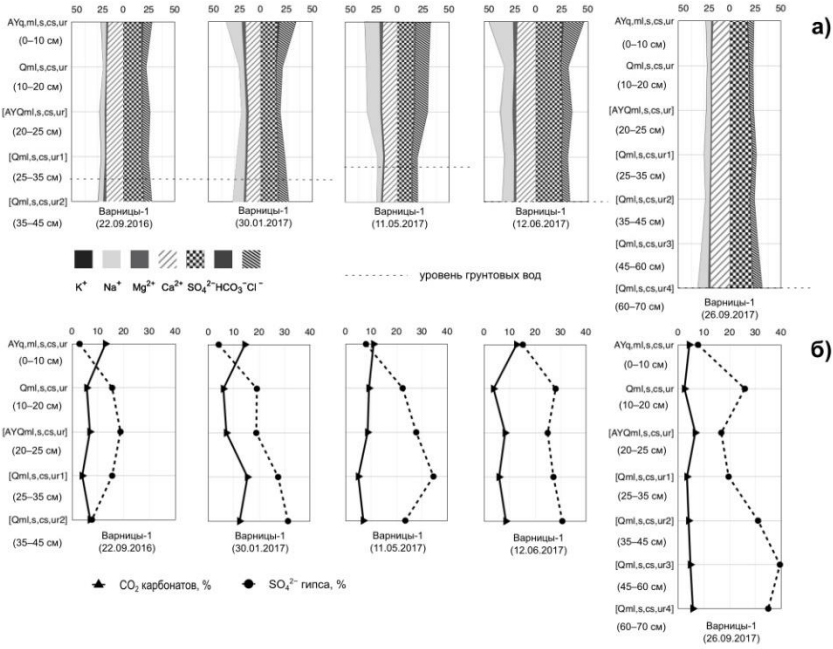

Рис. 5. Диаграммы распределения по профилю разр. Варницы-1 в годовом цикле наблюдений: а – легкорастворимых солей (ммоль-экв/100 г почвы); б – CO_2 карбонатов (%) и SO_4^{2-} гипса (%).

нередко приходятся на гумусовую (оторфованную толщу), а наибольший максимум – на верхний гумусовый горизонт. Нижний максимум, который также можно наблюдать в течение большей части года, расположен непосредственно над водоносным горизонтом. В отличие от остальных макрокомпонентов солевого состава SO_4^{2-} и Ca^{2+} имеют относительно равномерное распределение в почвенном профиле, и их содержание подвержено сезонной изменчивости в меньшей степени.

Необходимо сразу указать на разницу солевых профилей параллельно исследуемых и расположенных рядом с колодцем разр. Варницы-1 и Варницы-2. Разрез Варницы-1 весьма чувствительно реагирует на смену фаз гидрологического цикла. Почва разр. Варницы-2 проявляет сравнительно слабые сезонные вариации солевого профиля и засоление в его профиле не находит такого мощного выражения, как в первом разрезе. С учетом единообразия остальных факторов разницу в солевых профилях приходится отно-

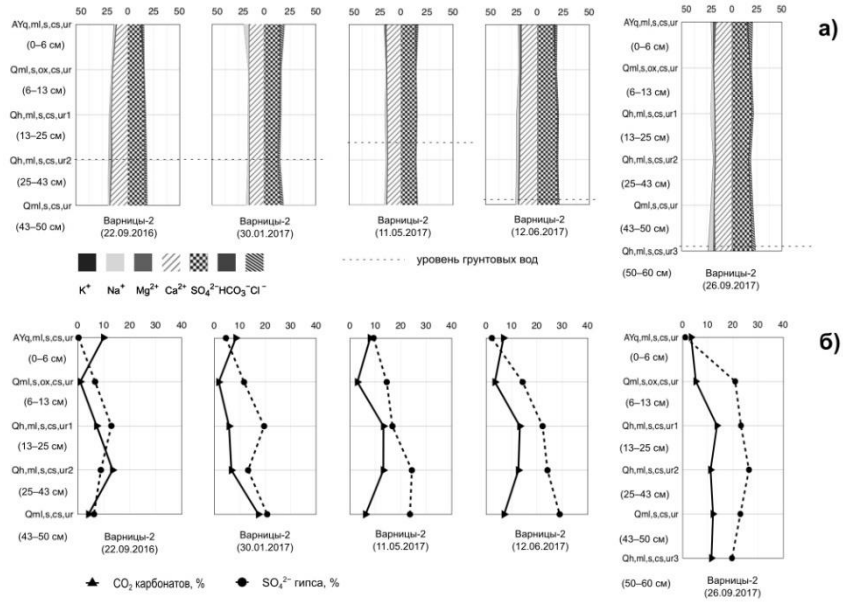

Рис. 6. Диаграммы распределения по профилю разр. Варницы-2 в годовом цикле наблюдений: а – легкорастворимых солей (ммоль-экв/100 г почвы); б – CO_2 карбонатов (%) и SO_4^{2-} гипса (%).

сить на высокую степень неоднородности микрорельефа участка исследований. Подчеркивая важность микрорельефа в перераспределении солей (для этого достаточно перепада высот в 10–20 см на расстоянии 25–50 м), В.А. Ковда (1946) рассматривает микроповышения как очаги современного засоления. Между тем в сценарии, где процессам испарения отводится второстепенная роль в засолении почвы, более высокое положение уровня ГВ в разр. Варницы-1, обеспечиваемое уклоном зеркала воды в сторону дренажной канавы и русла Ишни, сильнее сказывается и на динамичности солевого профиля, и на степени засоления. Разница в несколько сантиметров в глубине залегания ГВ по отношению к почвенному профилю (отметка ГВ в разр. Варницы-2 в среднем на 5 см ниже их отметки в разр. Варницы-1) напрямую влияет на высоту зоны аэрации, а колебания уровня ГВ приводят к смещению ее границы. В итоге появляются отдельные участки окисления и окисленно-квазиглеевые горизонты, которые характеризуются низкой способностью накапливать соли. На протяжении всего современного этапа мониторинга в гор. Qox разр. Варницы-2 отмечается самое низкое содержание солей; в отдельные сезоны оно не превосходит порог отнесения к засоленным почвам, в остальные – соответствует слабой степени засоления. На пути восходящего раствора, содержащего соли, гор. Qox замедляет перемещение солей в вышележащий гор. AY, так что для разр. Варницы-2 основная масса солей сосредоточена ниже окисленно-квазиглеевого горизонта. Единственный сезон, когда максимум засоления фиксируется в верхнем гор. AY второго разреза, – это зимняя межень, по-видимому, за счет того, что профиль долгое время не получает атмосферного питания.

В первый сезон современных мониторинговых исследований (22.09.2016 г.) профили обоих разрезов оказались сравнительно промытыми. Большая часть годового объема осадков, выпавших за лето (гидротермический коэффициент за период с $t > 15°C = 1.42$), уже успела пополнить запасы подземных вод. Отметка уровня ГВ в дату отбора проб 22.09.2016 г. находилась на глубине 35 см. В равномерно прогретой почвенной толще просачивающаяся метеорная вода имеет максимальную растворяющую способность, результатом чего явилось исчезновение верхних солевых максимумов, выравнивание концентрации солей по профилю и перенос солевой нагрузки к месту соприкосновения почвенного профиля с ГВ. Разр.

Варницы-1 и Варницы-2 демонстрируют в этот период предельно низкий в годовом цикле мониторинга уровень засоления. ∑сол и ∑токс в верхнем гумусовом горизонте – 1.68 и 1.02%, в нижнем квазиглеевом – 1.72 и 1.26% соответственно (табл. 3).

Совсем другая картина рисуется в маловодную фазу, соответствующую периоду зимней межени (дата отбора 30.01.2017 г.). Мощность снежного покрова в период опробования на участке исследования составляла 55 см. Установившийся в первой декаде ноября 2016 г. снежный покров не стаивал до апреля 2017 г., вследствие чего почва практически не промерзла. Зимой почва разр. Варницы-1 имеет очень сильную степень засоления по величине ∑сол (2.14%) и ∑токс (1.14%) в гор. AY, а разр. Варницы-2 – очень сильную по ∑сол (1.30%) и среднюю по ∑токс (0.34%) степени засоления. В годовом гидрологическом цикле зимняя межень, характеризуемая перерывом в питании атмосферными осадками, рассматривается как период соленакопления. Рост доли хлоридно-натриевого участия (как более подвижных ионов) в сумме солей, широкое отношение $Cl^-/SO_{4\ токс}$, определяющее хлоридный тип засоления, пик

Таблица 3. Сумма солей и сумма токсичных солей по сезонам

Горизонт	Глубина, см	22.09.2016		30.01.2017		11.05.2017		12.06.2017		26.09.2017	
		∑сол	∑токс	∑сол	∑токс	∑сол	∑токс	∑сол	∑токс	∑сол	∑токс
Варницы-1											
AYq,ml,s,cs,ur	0–10	1.68	0.68	2.14	1.14	2.00	1.07	2.93	1.71	1.53	0.43
Qml,s,cs,ur	10–20	1.41	0.32	1.35	0.41	1.91	0.91	2.02	0.73	1.50	0.30
[AYQml,s,cs,ur]	20–25	1.63	0.52	1.22	0.45	1.86	0.87	2.26	0.97	1.55	0.37
[Qml,s,cs,ur1]	25–35	1.53	0.40	1.51	0.66	1.25	0.44	2.02	0.74	1.72	0.51
[Qml,s,cs,ur2]	35–45	1.72	0.60	1.73	0.77	1.28	0.33	2.15	0.86	1.58	0.32
[Qml,s,cs,ur3]	45–60	–	–	–	–	–	–	–	–	1.79	0.52
[Qml,s,cs,ur4]	60–70	–	–	–	–	–	–	–	–	2.05	0.77
Варницы-2											
AYq,ml,s,cs,ur	0–6	1.02	0.27	1.30	0.34	1.11	0.14	1.28	0.22	1.35	0.26
Qml,s,ox,cs,ur	6–13	1.07	0.09	1.09	0.11	0.99	0.08	1.23	0.19	1.33	0.11
Qh,ml,s,cs,ur1	13–25	1.18	0.12	1.08	0.13	1.05	0.17	1.39	0.25	1.46	0.33
Qh,ml,s,cs,ur2	25–43	1.23	0.21	1.03	0.11	0.99	0.13	1.35	0.21	1.26	0.16
Qml,s,cs,ur1	43–50	1.26	0.11	1.21	0.26	1.08	0.16	1.42	0.21	1.42	0.24
Qml,s,cs,ur2	50–60	–	–	–	–	–	–	–	–	1.57	0.45

концентрации солей в верхнем гумусовом горизонте, высокий уровень ГВ – все это свидетельствует о восходящем направлении движения почвенного раствора зимой при возрастающей доле участия в гидрохимии ГВ напорных вод нижележащих водоносных горизонтов. Весной с установлением положительной температуры сходит снежный покров. На пик весеннего половодья (дата отбора проб воды 16.04.2017 г.) приходится максимум разбавления поверхностных водотоков талыми водами. Суммарное содержание солей в годовом срезе в этот период минимально для всех точек маршрута гидрохимических наблюдений и составляет для дренажных вод 247 мг/л , в створе р. Ишни – 333 мг/л, в прибрежной зоне оз. Неро – 276 мг/л.

Во второй декаде мая (11.05.2017 г.) почва была еще насыщена талыми водами, нивелирующими процессы соленакопления. Избыток воды уходил в ГВ и далее в речную сеть, часть воды расходовалась на пополнение баланса подземных вод. Уровень ГВ в период весеннего опробования (11.05.2017 г.) на 5 см выше среднегодовой отметки в 35 см. Снижение величины минерализации ГВ (10 700 мг/л) после весеннего половодья обязано их разбавлению инфильтрационным стоком, что нашло свое отражение в уменьшении общей суммы солей в зоне насыщения почвенного профиля обоих разрезов. Тем не менее постепенно увеличивающийся поток тепла усиливает испарение и наряду с отдельными жаркими днями в начале мая создает в разр. Варницы-1 нехарактерный для остальных периодов наблюдений градиент концентраций солей между нижней и верхней частями профиля. ∑сол и ∑токс в горизонте их максимума AY – 2 и 1.07%. Верхняя часть профиля по содержанию и составу солей практически не дифференцирована, в нижнем квазиглеевом горизонте их содержание резко уменьшается до 1.28 и 0.33% соответственно. Как уже было сказано, солевой профиль разр. Варницы-2 гораздо меньше подвержен колебаниям под влиянием метеорологических условий, и в нем такого выраженного аккумулятивного распределения солей наблюдать не удавалось.

С середины мая, после спада половодья, начинает устанавливаться летняя межень. В это время во всех водотоках и оз. Неро концентрация солей за счет увеличения доли минерализованного грунтового стока возрастает в 1.5–2.0 раза по сравнению с пиком половодья. На участке исследований впервые обнаружено и

опробировано озерцо – место выхода ГВ на дневную поверхность. Озерцо соленое с минерализацией 6525 мг/л по состоянию на 11.05.2017 г. В макрокомпонентном составе преобладают Cl^- и Na^+, все точки наблюдений воды озерца сосредоточены в области хлоридно-натриевого химизма, хотя доля SO_4^{2-} и Ca^{2+} в составе солей выражена еще сильнее, чем в ГВ.

В конце мая (31.05.2017 г.) отобраны пробы из разреза фоновой почвы Варницы-фон. Водные вытяжки почвы для всего профиля, за исключением самого верхнего гумусового горизонта, демонстрируют отсутствие засоления. В верхнем пахотном горизонте залежной почвы ∑сол составила 0.11%, а ∑токс – 0.06%, что при хлоридном типе химизма соответствует слабой степени засоления. Морфологически в профиле засоление никак не выражено. Аналитически обнаруженные легкорастворимые соли в количестве, соответствующем слабой степени засоления, в почвенном профиле фоновой почвы могут быть признаком остаточного засоления, а их концентрирование в верхнем горизонте – результатом подтягивания почвенных растворов к поверхности в теплый период. Можно предположить, что в прошлом участок подвергался засолению, а рассоление было достигнуто понижением уровня ГВ в ходе осушительных мелиораций.

В период низкого стока (12.06.2017 г.) на участке исследований глубина залегания ГВ находилась на отметке 45 см, что заметно ниже среднегодового уровня. Разр. Варницы-1 в это время демонстрировал максимум засоления за весь период наблюдений. Сумма солей в верхнем гумусовом горизонте достигала 2.93%, что при хлоридном химизме засоления соответствует очень сильной степени засоления. В летний период интенсивного испарения в верхнем гумусовом горизонте отмечены особенно высокие концентрации токсичных ионов (∑токс 1.71%). В разр. Варницы-2 также происходило накопление солей по сравнению с весенним профилем, но их максимум был сосредоточен в средней части, что дополнительно может свидетельствовать о задержке миграции солей на границе Qox.

Летнюю межень, которая длится в Ярославском Поволжье со второй декады мая до конца сентября, застали отбором проб воды в конце мая, середине июня и конце сентября 2017 г. В гидрохимии водоемов она выделяется одновременным ростом концентрации

всех растворенных солей. В конце весны (31.05.2017 г.) вода характеризуется высоким уровнем минерализации на всех точках маршрута: ГВ – 13400 мг/л, озерцо – 8100 мг/л, дренажные воды – 650 мг/л, два створа Ишни – до 800 мг/л, оз. Неро – 440 мг/л. Близкие значения минерализация принимает в июньский отбор, но за счет более интенсивного выноса солей с грунтовым стоком в конце мая ее величина немного выше, чем в июне, во всех точках наблюдений.

В первой декаде осени 2017 гг. (26.09.2017 г.) оба почвенных профиля во многом повторяют тенденции распределения солей осени 2016 г.. Карбонатный и гипсовые профили, как содержащие менее растворимые соли, более устойчивы к избыточному атмосферному увлажнению и сохраняются относительно июньской картины распределения, за исключением верхнего корнеобитаемого слоя, выщелачивание из которого происходит с большей скоростью. В гор. AY содержание карбонатов в сентябре 2017 г. снизилось относительно июньских значений в 3 раза, гипса – в 2 раза. Накопленные за лето легкорастворимые соли, частично гипс и карбонаты оказываются выщелочены из почвенного профиля в ГВ с последующим поступлением в гидрографическую сеть. Минерализация ГВ Варницкого ландшафта (14600 мг/л) и воды на всех точках маршрута гидрологических исследований (дренажная канава, р. Ишня, оз. Неро) настолько высока (1177, 1709, 640 мг/л соответственно), что превосходит эту величину для условно пресноводных водотоков. Диаграмма Пайпера отражает этот процесс сменой типа химизма воды. Увеличение концентрации солей в водных объектах осенью (в дату отбора 26.09.2017 г.) стоит связывать именно с поступлением солей из почвенной толщи, а не с увеличением доли глубокого подземного питания, так как концентрация солей в воде Варницкого источника не изменилась в большую сторону, а даже уменьшилась относительно июньской.

Вследствие невысокой влагообеспеченности, выраженной значением гидротермического коэффициента 1.15 за период с $t > 15°C$, за счет аномально низкого количества осадков в августе 2017 г., осенний сезон наблюдений в 2017 г. отличался от 2016 г. экстремально низким уровнем ГВ. Отметка уровня ГВ 26.09.2017 г. опустилась до 70 см, что позволило исследовать почвенный профиль на бóльшую глубину. В обоих разрезах в это время можно

было наблюдать результат смещения границы зоны аэрации к низу – светлую, почти белую, окраску глеевых горизонтов с палевыми и желтоватыми линзами и пятнами ожелезнения. Тем не менее увеличение доли инфильтрационного питания обеспечило отчасти рассоление профиля Варницы-1 на фоне годового цикла наблюдений. Разр. Варницы-2, наоборот, демонстрирует в этот период предельно высокий для себя уровень засоления (в гор. AY – 1.35%, в нижнем глеевом – 1.57%). Увеличение доли Cl^- определяет хлоридно-кальциевый химизм засоления, тогда как в июне при близком содержании солей (в гор. AY – 1.28%, в нижнем глеевом – 1.42%) химизм засоления охарактеризован как хлоридно-сульфатно-кальциевый.

Разницу в содержании легкорастворимых солей двух почвенных профилей между собой, а также разницу, связанную с фазами водности гидрологического цикла, хорошо демонстрируют диаграммы запаса солей (рис. 7). Послойный запас солей рассчитан на основании данных плотности сложения первого сезона наблюдений (22.09.2016 г.) и суммы солей по каждому сезону. В слое 0–25 см разр. Варницы-1 запасы составляют от 29.5 т/га в зимний период до 45 т/га в июне, а в слое 0–20 см разр. Варницы-2 колеблются в интервале от 14.5 т/га в мае до 19.8 т/га в сентябре. За счет более высокой плотности сложения минеральные горизонты почвы являются носителями основного запаса солей.

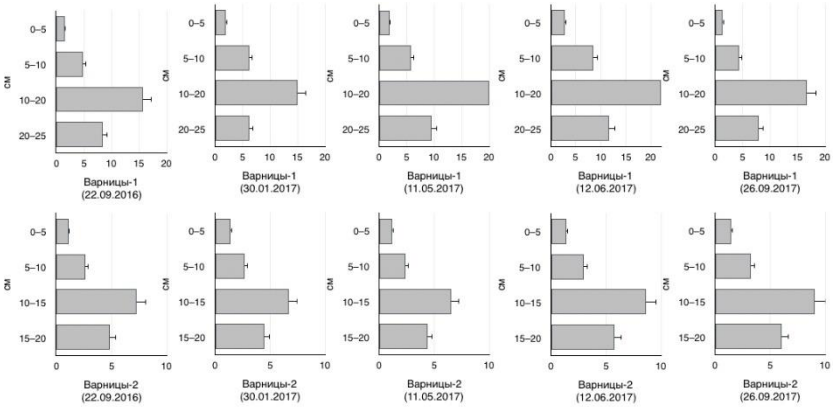

Рис. 7. Диаграммы запасов солей по сезонам наблюдений, т/га.

Очень непростым оказалось решение вопроса многолетнего тренда засоления. Объективность оценки весьма осложняют неоднородности вертикального и горизонтального простирания, особенно в связи с тем, что современные разрезы расположены не строго идентично относительно исходных разр. 57 ПМР и 70 РГ.

Разр. 57 ПМР был заложен на 10 м севернее Варницкого колодца 20.07.1988 г., сухим и жарким летом, когда в отдельные дни температура доходила до 30–40 °С. Уровень ГВ находился на отметке 57 см. В описании профиля отмечены друзы гипса с пятнами ожелезнения, что может говорить о сильном окислении зоны аэрации почвенной толщи. За счет летних испарительных процессов солевой максимум сосредоточен в гор. AY1 (0–7 см), на поверхности почвы выступают корочки солей. В водной вытяжке стандартно преобладают SO_4^{2-} и Ca^{2+}, и все же максимум проявляется за счет увеличения анионов HCO_3^- и Cl^-, а среди катионов, в первую очередь, – за счет Na^+, а Ca^{2+} и SO_4^{2-} распределены по профилю равномерно (рис. 8а). ∑сол в AY1 – 1.51%, ∑токс – 0.50%, что соответствует очень сильной и сильной степеням засоления. SO_4^{2-} присутствует в токсичных количествах. Химизм засоления рассчитан как хлоридно-кальциевый. Максимум карбонатов смещен относительно солевого максимума в гор. AY2 (7–26 см), но также расположен в верхней гумусовой толще. Гипс тяготеет к линии водоносного горизонта. Солевой профиль разр. 57 ПМР в очертаниях повторяет июньское распределение солей разр. Варницы-1, но по ∑сол серьезно уступает ему за счет меньшего содержания Cl^- и Na^+.

Разр. 70 РГ заложен в 3 м на Ю-В от колодца 23.09.1990 г. В этот многоводный год уровень ГВ находился на высокой отметке 37 см. Очертаниями и общим содержанием водорастворимых компонентов солевой профиль почвы напоминает осенний вариант профиля Варницы-2 (рис. 8б). В водной вытяжке преобладают SO_4^{2-} и Ca^{2+}. Солевой максимум смещен относительно поверхности в среднюю часть на глубину 35–52 см. ∑сол и ∑токс в этом горизонте составляют 2.02 и 0.63% соответственно. К этому же горизонту приурочен максимум накопления карбонатов. В горизонте максимума солей SO_4^{2-} в токсичных количествах отсутствует, так что максимум ∑токс обеспечивается содержанием HCO_3^- и резким увеличением Cl^- и Na^+.

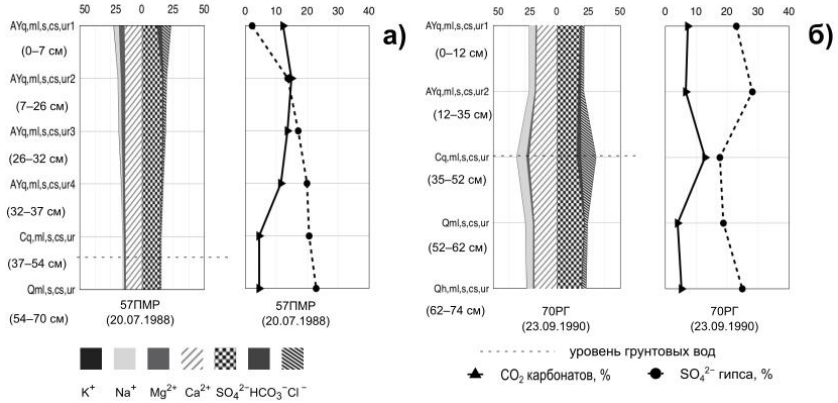

Рис. 8. Диаграммы распределения по профилю легкорастворимых солей (ммоль-экв/100 г почвы), CO_2 карбонатов (%) и SO_4 гипса (%): а – разр. 57 ПМР (20.07.1988 г.); б – разр. 70 РГ (23.09.1990 г.)

Исходя из увеличения прогнозного показателя Cl^-/SO_4^{2-}, общепринятого для оценки направления процесса засоления–рассоления, при движении вверх по профилю, можно было бы сделать заключение об актуальном процессе соленакопления в пределах индивидуальной ландшафтно-территориальной единицы. Но, принимая во внимание условность сравнения разрезов, исследованных с разницей почти в 30 лет в отсутствие систематических наблюдений, вывод о прогрессивном засолении не является однозначным, так как ∑сол и, что немаловажно, ∑токс в исходных разрезах меньше, чем в разр. Варницы-1, но превосходит по этим показателям разр. Варницы-2 в любой временно́й точке современного этапа мониторинга.

В аспекте стабилизации состава солей и собственно процессов соленакопления безусловна роль ионов SO_4^{2-} и Ca^{2+}. Но, несмотря на их количественное доминирование в водной вытяжке, тесная корреляционная взаимосвязь ∑сол и ∑токс установлена с содержанием Cl^- и Na^+ (рис. 9а, б). Отсюда очевидно, что Cl^- и Na^+ играют определяющую роль для степени и химизма засоления. Вместе с тем концентрации именно этих ионов в наибольшей степени подвержены сезонным колебаниям и обусловливают динамичность солевого профиля. Они же активно мигрируют из почвенной толщи в поверхностные водные артерии в период более интенсивного латерального стока.

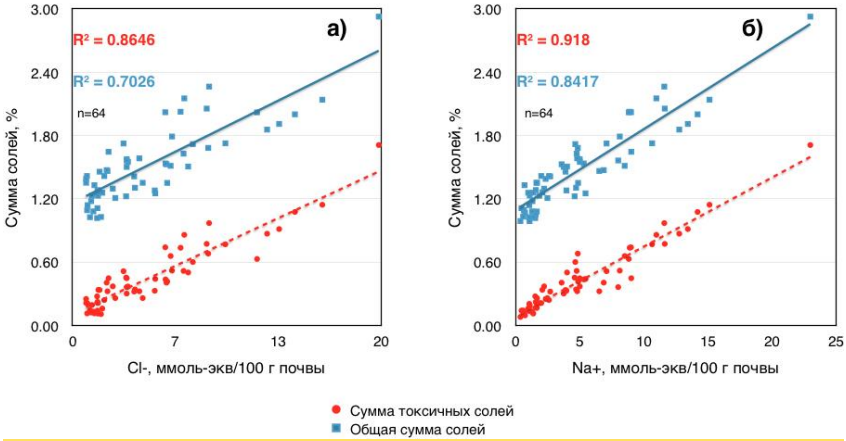

Рис. 9. График зависимости общей суммы и суммы токсичных солей от содержания ионов: а – Cl^-; б – Na^+.

Для вод р. Ишни, второго по величине притока оз. Неро и базиса местного дренирования участка почвенных исследований, свойственна высокая величина минерализации и необычное для большинства пресноводных рек соотношение макрокомпонентов $Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+}$ и $Cl^- > SO_4^{2-}$ (Бикбулатов, 2003). Состав речных вод изменчив на протяжении периода мониторинга, но вышеуказанное соотношение в течение большей части года выдержано. Степень минерализации обратно пропорциональна водности периодов наблюдения. В момент прохождения пика весеннего половодья (16.04.2017 г.) минерализация воды в реке минимальна (333 мг/л), ионы Ca^{2+} и HCO_3^- являются преобладающими. Наибольшие значения минерализации (500–860 мг/л) соответствуют периоду летней межени. Рост общей концентрации солей отодвигает на второй план участие HCO_3^- в химическом составе воды, в это время возрастает роль SO_4^{2-} и Ca^{2+}. Аномально высокая степень минерализации за весь период наблюдений (1709 мг/л) зафиксирована 26.09.2017 г. В это время HCO_3^- приобретает подчиненное значение, в составе воды начинают преобладать Na^+ и Cl^-. Сокращение доли поверхностного стока и увеличение доли подземного стока в питании реки в зимнюю межень также должно увеличивать содержание солей, но, вследствие отсутствия гидрологических наблюдений в зимнее время года, пока не подтверждено собственными

данными. Усиление роли отдельных катионов и анионов с ростом концентрации речных вод соответствует общим закономерностям, принятым в гидрологии суши.

Воды оз. Неро характеризуются гидрокарбонатно-кальциевым химизмом со среднегодовой величиной минерализации 240 мг/л, сезонные различия в основном не превышают 2.0–2.5 раз (Бикбулатов, Лазарева, 2008). По данным собственных исследований в сентябре 1990 г. и мае 2012 г. минерализация составила 244 и 222 мг/л соответственно. В период гидрохимических исследований 2016–2017 гг. только во второй декаде апреля, в пик половодья, минерализация находилась на уровне средней многолетней, остальные сезоны она была значительно выше, порядка 400 мг/л. Но для обозначения тенденции повышения минерализации озерной воды данных одного поста далеко недостаточно, тем более, что в отдельные годы величина минерализации может меняться до 4 раз и более (Бикбулатов, Лазарева, 2008). На протяжении большей части года сохранялся гидрокарбонатно-кальциевый тип химизма. Факт смены типа химизма воды оз. Неро в течение года описан в монографии Э.С. Бикбулатова с соавт. (2003) как случай единичный и исключительный для озер средней полосы Русской равнины. В этой связи любопытно, что по соотношению ионов воды оз. Неро в конце мая 2017 г. были отнесены нами к кальциевому типу со смешанным анионным составом, а в конце сентября 2017 г., при самом высоком уровне минерализации (640 мг/л), – к гидрокарбонатному типу со смешанным катионным составом. Такой разброс соотношения макрокомпонентов в годовом цикле говорит о заметном участии солоноватоводных рек (в том числе Ишни) и минерализованного грунтового стока в формировании химического состава озерной воды. Тем не менее оз. Неро продолжает оставаться пресным водоемом, для чего, помимо собственно проточности, существует целый ряд механизмов биогеохимической буферизации экосистемы, таких как: сульфатредукция, осаждение карбонатных солей за счет биогенного декальцирования (Бикбулатов и др., 2003), задержка и накопление солей в почвенной толще луговой террасы, которая отчасти принимает на себя нагрузку ионного стока бассейна озера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На протяжении одного календарного года (2016–2017 гг.) проведены наблюдения за почвенными профилями засоленного ландшафта памятника природы “Соляной источник Варницы” и связанными с участком водотоками. Региональные гидрогеологические особенности оз. Неро, вызванные тектонической обстановкой в геологическом прошлом, в областях разгрузки создают своеобразный гидрохимический режим ГВ. Медленный подток рассолов выщелачивания пермских солеродных бассейнов поддерживает уровень минерализации ГВ на высоком уровне и является определяющим фактором образования гидроморфных солончаков, не характерных для областей избыточного атмосферного увлажнения.

Значимость процессов галоморфизма усиливается и ослабляется в зависимости от фазы водности в период наблюдений. Легкорастворимые соли в сезоны низкого стока мобилизованы в верхней части почвенного профиля, где реализуется наиболее интенсивное испарение. Рассоляющий эффект достигается в водообильные фазы года. В наибольшей степени он затрагивает верхнюю часть почвенной толщи, по мере насыщения просачивающейся метеорной воды эффект ослабляется. Столь же велика в процессах современного засоления и роль микрорельефа. Он определяет характер миграции, образуя зоны различной интенсивности выноса солей и зоны их накопления. Наиболее полно засоление проявляется в микропонижениях. В местах, где во влажные сезоны уровень ГВ смыкается с верховодкой, образуются соленые эфемерные озерца.

Динамичность и стабилизация состава легко- и труднорастворимых солей в почве обусловлена различной кинетикой растворения компонентов и, как следствие, интенсивностью их выщелачивания. В водной вытяжке почв преобладают SO_4^{2-} и Ca^{2+}, они относительно равномерно распределены и накапливаются в профиле. В химическом составе сухой период опробования выражается увеличением доли Cl^-, что предполагает смену химизма засоления с сульфатно-хлоридного на хлоридный тип. Содержанием наиболее подвижных Cl^- и Na^+ определяется чувствительность солевого профиля к режиму питания ГВ. Между концентрацией этих ионов и степенью засоления почвы установлена тесная корреляционная зависимость. Именно они обеспечивают самый сильный уровень

засоления, они же быстрее всего вымываются из почвенного профиля в многоводную фазу гидрологического цикла.

Остается открытым вопрос многолетнего тренда засоления почв, который изрядно осложняется микрорельефом и сезонной динамичностью почвы в отношении концентрации солей. В отсутствие длительных систематических наблюдений ни одна из тенденций не может быть подтверждена. Однако состояние засоления ландшафта не стоит рассматривать как величину убывающую. На сегодняшнем этапе изучения почвенного покрова участка исследований необходимо отметить, что на фоне общей изменчивости солевого профиля, даже в условиях избытка увлажнения, рассоляющий эффект, наблюдаемый в отдельные сезоны, не приводит к промыванию почвенного профиля до состояния слабого или полного отсутствия засоления. И все же сезонная вариабельность до такой степени сильна, что накладывает отпечаток на количественные диагностические признаки, меняющие классификационное положение почв на уровне отдела: от серогумусовых квазиглеевых засоленных до солончаков омергеленных гипссосодержащих.

Почвенно-геохимические характеристики ландшафта и его бассейна питания в значительной мере обусловливают аккумуляцию в почвах и миграцию солей посредством грунтового стока через систему водотоков в оз. Неро. Речные воды в сезоны низкого стока жесткие и солоноватые, тогда как оз. Неро посредством биогеохимических механизмов буферизации сохраняет свою пресноводность.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают признательность лаборатории РЦ “Методы анализа состава вещества” Научного парка СПбГУ за техническую поддержку в выполнении измерений содержания катионов (проект № 108-8100).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 488 с.
2. *Бернштейн Б.Л.* О фосфоритах и минерализованных родниках Ярославской губернии. Ярославль, 1915. 21 с.
3. *Бикбулатов Э.С., Бикбулатова Е.М., Литвинов А.С., Поддубный С.А.*

Гидрология и гидрохимия озера Неро. Рыбинск: Рыбинский Дом печати, 2003. 192 с.
4. *Бикбулатов Э.С., Лазарева В.И.* Состояние экосистемы озера Неро в начале XXI века. М.: Наука, 2008. 406 с.
5. *Вахрина В.И.* Ростовский Троице-Сергиев Варницкий мужской монастырь. Родина Преподобного Сергия Радонежского. Рыбинск: Медиарост, 2014. 120 с.
6. *Воронин Л.В., Горохова В.В., Лазарева О.Л., Секацкая З.С., Черняковская Е.Ф.* Растения и грибы в Красной книге Ярославской области // Актуальные проблемы экологии Ярославской области. Мат-лы второй науч.-практич. конф. Т. 2. Ярославль, 2005. С. 17–21.
7. География почв и почвенное районирование центрального экономического района СССР / Под ред. Добровольского Г.В., Урусевской И.С. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1972. 469 с.
8. Гидрогеология СССР. Т. 1. Московская и смежные области. М.: Недра, 1966. 423 с.
9. *Горский И.И.* О соляных источниках губерний Вологодской, Костромской, Ярославской, Нижегородской и Владимирской // Материалы по общей прикладной геологии. 1926. № 22. 16 с.
10. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Лист О-37 (Ярославль). Объяснительная записка. СПб., 2015. 356 с.
11. *Зверев В.П.* Система природных вод Земли. М.: Науч. мир, 2013. 312 с.
12. *Каретников А.Л.* Варницкая слобода г. Ростова и Троице-Варницкий монастырь в XV–XVII вв.: перспективы комплексного изучения // Мат-лы конф. «Преподобный Сергий, «родом ростовец...». Ростов, 2014. С. 314–324.
13. *Кирюхин В.А., Норова Л.П.* Роль погребенных долин в изменении гидрогеологических и инженерно-геологических условий // Инженерная геология. 2009. № 1. С. 56–59.
14. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 235 с.
15. *Ковда В.А.* Происхождение и режим засоленных почв. Т. 1. М., 1946. 574 с.
16. *Лобанов А.И.* Химизм пресных подземных вод Ярославской области и его изменение антропогенным воздействием // Актуальные проблемы экологии Ярославской области. Мат-лы второй науч.-практич. конф. Т. 2. Ярославль, 2002. С. 39–41.
17. *Лопатовская О.Г.* Почвы зоны влияния минеральных источников предгорий Восточного Саяна // Почвоведение. 2009. № 8. С. 911–916.
18. *Лопатовская О.Г., Тахтеев В.В., Лазарева С.Д., Зарубина О.В., Николаева О.Г.* Олхинские минеральные источники: химия воды и засоление

почв // Известия Иркутского государственного университета, Серия "Биология. Экология". 2011. Т. 4. № 1. С. 81–86.
19. *Новский В.А.* Плейстоцен Ярославского Поволжья. М.: Наука, 1975. 236 с.
20. *Панкова Е.И., Конюшкова М.В., Горохова И.Н.* О проблеме оценки засоленности почв и методике крупномасштабного цифрового картографирования засоленных почв // Экосистемы: экология и динамика. 2017. № 1. С. 26–54.
21. *Парамонова А.Е., Убугунова В.И., Черноусенко Г.И., Убугунов В.Л., Балданов Б.Ц., Цыремпилов Э.Г.* Засоленные почвы поймы среднего течения реки Иркут: морфогенетические и агрохимические свойства // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. 2017. № 2 (47). С. 30.
22. *Русаков А.В.* Закономерности формирования почвенного покрова центра Ярославского Поволжья: Дис. ... к. б. н. СПб., 1993. 300 с.
23. *Симонова Ю.В., Рюмин А.Г.* Засоленные почвы Ростовской низины (Ярославская область): история изучения и современное состояние // Материалы по изучению русских почв. 2017. Вып. 10 (37). С. 122–129.
24. Справочник по климату СССР. Вып. 8. Ч. 2. Температура воздуха и почвы. 1964. 354 с.
25. *Убугунов В.Л., Убугунова В.И., Чижикова Н.П., Варламов Е.Б., Хитров Н.Б., Жамбалова А.Д.* Солонцы зон тектонических разломов севера Баргузинской котловины (Бурятия, Россия) // Природа Внутренней Азии. 2017. № 2 (3). doi: 10.18101/2542-0623-2017-2-38-48
26. *Черкасова М.С.* Крестьянское хозяйство на монастырских землях Ростовского и Ярославского уездов в первой половине XVI в. // История и культура Ростовской земли: мат-лы науч. конф. Ярославль, 1995. С. 16–21.
27. *Чижиков Н.В.* Геоморфология и почвы бассейна озера Неро и реки Устье-Которосль // Тр. лаб. сапропелевых отложений. 1956. № 6. С. 130–144.
28. Экологический атлас Ярославской области / Под. ред. Г.А. Фоменко. Ярославль, 2015. 154 с. http://www.nppkad.ru/company/Экологический%20атлас.pdf.
29. *Якимов А.С., Сванидзе И.Г., Казанцева М.Н., Соромотин А.В.* Изменение свойств почв речных долин южной тайги Западной Сибири под действием минерализованных артезианских вод // Почвоведение. 2014. № 3. С. 364–374. doi: 10.7868/S0032180X14030137
30. *Ямнова И.А., Панкова Е.И.* Гипсовые новообразования и формирующие их элементарные почвообразовательные процессы // Почвоведение. 2013. № 12. С. 1423–1436. doi: 10.7868/S0032180X13120125

31. *Bouma J.* Hydropedology as a powerful tool for environmental policy research // Geoderma. 2006. V. 131. P. 275–286. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.03.009
32. *Hulisz P.* Quantitative and qualitative differentiation of soil salinity in Poland // Berichte der DBG. 2008. No. 1. P. 1–4 http://eprints.dbges.de/66/1/Hulisz.pdf
33. *Salama R.B., Otto C.J., Fitzpatrick R.W.* Contributions of groundwater conditions to soil and water salinization // Hydrogeology J. 1999. V. 7. No. 1. P. 46–64. https://doi.org/10.1007/s100400050179
34. https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Ростове.

SALT-AFFECTED SOILS OF THE ROSTOV LOWLAND (YAROSLAVL' REGION): MORPHOLOGY, GENESIS AND DYNAMICS OF SALINIZATION IN THE ANNUAL HYDROLOGICAL CYCLE

Ju. V. Simonova, A. V. Rusakov, A. G. Rjumin

Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia, 199034 St. Petersburg, University emb., 7-9

Available data on salt-affected soils of the Rostov lowland in the Upper Volga region and the Nero lake basin are predominantly based on observations made in the beginning of the last century. Modern studies of potential areas of soils salinization in this region are absent. As a result of the conducted investigations considering long-term stages of the groundwater level decreasing within the area of Rostov lowland on a background of the known trends of the climate change, the question on the salinization phenomenon is still opened. Following the results of the second cycle of monitoring investigations in 2016-2017, we made an assessment of the salinization degree of the subaqual landscape on the II terrace of Nero lake. The possibility of hydromorphic solonchaks forming was shown. The factors and conditions of their forming and the relatively sustainable functioning in the humid climate of the southern taiga subzone were examined. The seasonal dynamics of the profile distribution of water-soluble salts, carbonates, gypsum and storage of salts in two soil pits within the impact zone of the salty spring (the former salt industry center) was revealed. To identify the long-term salinization dynamics in the Varnitsy landscape the information on water types from the salty spring, groundwater and soil extraction over a period of a hundred years of sporadic observations was analyzed. The current monitoring data indicated active salinization processes in the landscape and salts migration beyond the soil profile into the associated system of the Nero lake tributaries.

Keywords: Nero Lake, salt-affected soils, monitoring, salt spring, Varnitsy

REFERENCES

1. Arinushkina E.V. *Handbook on the chemical analysis of soils.* Moscow, MSU Publ., 1970, 488 p. (in Russian)
2. Bernshtejn B.L. *Phosphorites and mineralized springs of the Yaroslavl' province*, 1915, 21 p. (in Russian)
3. Bikbulatov E.S., Bikbulatova E.M., Litvinov A.S., Poddubnyj S.A. *Hydrology and hydrochemistry of the Nero Lake.* Rybinsk, Rybinskij Dom pechati Publ., 2003, 192 p. (in Russian)
4. Bikbulatov E.S., Lazareva V.I. *The state of the Nero Lake ecosystem in the early 20th century*, 2008, 406 p. (in Russian)
5. Vahrina V.I. *The Rostov Varnitsky Trinity Monastery of St. Sergius. The birthplace of St. Sergius of Radonezh.* Rybinsk: Mediarost, 2014, 120 p. (in Russian)
6. Voronin L.V., Gorohova V.V., Lazareva O.L., Sekackaja Z.S., Chernjakovskaja E.F. Plants and fungi in Red Data Book of the Yaroslavl' region, *Aktual'nye problemy jekologii Jaroslavskoj oblasti* (*Modern problems on ecology in the Yaroslavl' region).* Proceedings of the second scientific conference, Yaroslavl', 2005, Vol. 2, pp. 17–21 (in Russian)
7. Dobrovol'skii G.V., Urusevskaya I.S. *Soil geography and soil zoning of the Central Economic Region of the USSR.* Moscow, MGU Publ., 1972, 469 p. (in Russian)
8. *Hydrogeology of the USSR*. Vol. 1. Moscow, Nedra Publ., 1966, 423 p. (in Russian)
9. Gorskij I.I. Salt springs of the Vologda, Kostroma, Yaroslavl', Nizhnii Novgorod and Vladimir provinces, *Materialy po obshhej i prikladnoj geologii (Proceedings on general and applied geology)*, Leningrad, 1926, Vol. 22, 16 p. (in Russian)
10. *State Geological Map of Russian Federation*, scale 1: 1 000 000 (the third generation), Map Sheet O-37, Yaroslavl'. Explanatory Notes. Saint Petersburg, 2015, 356 p. (in Russian)
11. Zverev V.P. *Natural water system of the Earth.* Moscow, Nauch. mir Publ., 2013, 312 p. (in Russian)
12. Karetnikov A.L. The Rostov Varnitskaya Sloboda and the Trinity-Varnitsky Monastery in the XV-XVII centuries: perspectives of complex study, *Prepodobnyj Sergij, rodom rostovec...*(*Reverend Sergius is a native of Rostov*). Proceedings of the conference, Rostov, 2014, pp. 314–324 (in Russian)
13. Kirjuhin V.A., Norova L.P. The role of buried paleochannels in changing hydrogeological and engineering geological conditions, *Inzhenernaja geologija*, 2009, No. 1. pp. 56–59 (in Russian).
14. *Classification and Diagnostics of Soils of Russia*. Smolensk, Oikumena

Publ., 2004. 342 p. (in Russian).
15. Kovda V.A. *Origin of saline soils and their regime.* Vol. 1. Moscow, 1946, 574 p. (in Russian)
16. Lobanov A.I. Types of fresh underground waters of the Yaroslavl' region and its modification under anthropogenic impact, *Aktual'nye problemy jekologii Jaroslavskoj oblasti* (*Modern problems on ecology in the Yaroslavl' region)*. Proceedings of the second scientific conference, Yaroslavl', 2002, Vol. 2, pp. 39–41 (in Russian)
17. Lopatovskaya O.G. Soils in the zone affected by mineral water springs at the foothills of the Eastern Sayan Ridge, Eurasian Soil Science, 2009, Vol. 2, No. 8, pp. 844-849.
18. Lopatovskaya O.G., Tahteev V.V., Lazareva S.D., Zarubina O.V., Nikolaeva O.G. Olkha mineral springs: water chemical composition and soils salination, *Izvestija Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, Vol. 4, No. 1, pp. 81–86 (in Russian).
19. Novskij V.A. *Pleistocene in the Upper Volga region.* Moscow, Nauka Publ., 1975. 236 p. (in Russian)
20. Pankova E.I., Konjushkova M.V., Gorohova I.N. On the problem of soil salinity's evaluation and method of large-scale digital mapping of saline soils, *Jekosistemy: jekologija i dinamika*, 2017, No. 1, pp. 26–54. (in Russian)
21. Paramonova A.E., Ubugunova V.I., Chernousenko G.I., Ubugunov V.L., Baldanov B.C., Cyrempilov E.G. Saline soils of the floodplain of the upper reaches of the Irkut river: morphogenetic and agrochemical properties, *Vestnik BGSHA imeni V.R. Filippova*, 2017, Vol. 47, No. 2, pp. 30–38 (in Russian).
22. Rusakov A.V. *Regularities in the formation of the soil cover of the center of the Upper Volga region*, candidate's thesis, MSU, Moscow, 1993, 300 p. (in Russian)
23. Simonova Ju.V., Rjumin A.G. Salt-affected soils in the Rostov lowland (Yaroslavl' region): the history of the study and the current state, *Materialy po izucheniju russkih pochv*. 2017, Vol. 10, No. 37, pp. 122–129 (in Russian).
24. *USSR Climate Data Handbook*, 1964, Vol. 8, part 2, 354 p. (in Russian)
25. Ubugunov V.L., Ubugunova V.I., Chizhikova N.P., Varlamov E.B., Hitrov N.B., Zhambalova A.D. Solonetzes of the Earth faults zones in the north of the Barguzin depression (Buryatia, Russia), *Priroda vnutrennej Azii*, 2017, Vol. 3, No. 2, pp. 38–48 (in Russian). doi: 10.18101/2542-0623-2017-2-38-48
26. Cherkasova M.S. Peasant farming on the monastic lands of the Rostov and Yaroslavl' districts in the first half of the 16th century, *Istorija i kul'tura Rostovskoj zemli (History and culture of Rostov land).* Proceedings of the scientific conference, Jaroslavl', 1995, pp. 16–21 (in Russian)
27. Chizhikov N.V. Geomorphology and soils of the Lake Nero and the

Ust'e-Kotorosl' river basin, *Trudy laboratorii sapropelevyj otlozhenij*, 1956, No. 2, pp. 130–144 (in Russian)
28. *Environmental Atlas of Yaroslavl' region. Yaroslavl'*, 2015, 154 p. (in Russian)
29. Jakimov A.S., Svanidze I.G., Kazanceva M.N., Soromotin A.V. Change in soil properties of river valleys in the southern taiga of western Siberia under the action of mineralized artesian waters, *Pochvovedenie*, 2014. No. 3. pp. 364–374 (in Russian). doi: 10.7868/S0032180X14030137
30. Yamnova I.A., Pankova E.I. Gypsic Pedofeatures and Elementary Pedogenetic Processes of Their Formation, Eurasian Soil Science, 2013, Vol. 46, No. 12, pp. 1117–1129. doi: 10.1134/S1064229313120089
31. *Bouma J.* Hydropedology as a powerful tool for environmental policy research, Geoderma, 2006, Vol. 131, pp. 275–286. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.03.009.
32. *Hulisz P.* Quantitative and qualitative differentiation of soil salinity in Poland, Berichte der DBG, 2008, No. 1, pp. 1–4
33. *Salama R.B., Otto C.J., Fitzpatrick R.W.* Contributions of groundwater conditions to soil and water salinization, Hydrogeology Journal, 1999, Vol. 7, No. 1, pp. 46–64. https://doi.org/10.1007/s100400050179.
34. https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Ростове.

Ссылки для цитирования

Симонова Ю.В., Русаков А.В., Рюмин А.Г. Засоленные почвы Ростовской низины (Ярославская область): морфология, генезис и динамика засоления в годовом гидрологическом цикле // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2018. Вып. 93. С. 40-74. doi: 10.19047/0136-1694-2018-93-40-74
Simonova Ju.V., Rusakov A.V., Rjumin A.G. Salt-affected soils of the Rostov Lowland (Yaroslavl' region): morphology, genesis and dynamics of salinization in the annual hydrological cycle, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2018, V. 93, pp. 40-74. doi:10.19047/0136-1694-2018-93-40-74