ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА, 2026, том 10, № 3, с. 25-63

ДИНАМИКА ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

УДК 631.4;556.5

ДИНАМИКА ЗАСОЛЕНИЯ ГАЖЕВЫХ ПОЧВ В ГУМИДНОМ КЛИМАТЕ (ВЕРХНЯЯ ВОЛГА): РЕЗУЛЬТАТЫ ТРЕХЛЕТНИХ СЕЗОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ОЦЕНКА МНОГОЛЕТНИХ ТРЕНДОВ

© 2026 г. Ю.В. Симонова, А.В. Русаков, Д.М. Мирин

Санкт-Петербургский государственный университет

Россия, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7-9. E-mail: uvsim@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.05.2026. После доработки 01.06.2026. Принята к публикации 01.09.2026.

Засоленные гажевые почвы, формирующиеся в условиях избыточного атмосферного увлажнения, можно считать уникальными, поскольку зональными в таком климате являются выщелоченные и оподзоленные почвы (в районе исследований это дерново-подзолистые почвы), а интразональными – в основном глеевые и торфяные.

Формирование засоленных гажевых (гипсоносных) почв в Ярославском Поволжье (вторая терраса оз. Неро) обязано приуроченности к зоне выхода минерализованных (11.8 г/л) грунтовых вод. Изменения в гидрохимическом режиме ландшафтов и солевом режиме почв в очагах разгрузки грунтовых вод, являются индикаторами меняющихся условий среды, поэтому такие объекты могут служить ценными полигонами экологического мониторинга. Это особенно актуально для понимания реакции компонентов ландшафта, в т.ч. растительности и почв, на климатические изменения.

Задачами работы были определение сезонной динамики солевого режима и установление многолетнего (30 лет) тренда засоления гажевых почв очага разгрузки минерализованных грунтовых вод. Дать оценку современного состояния засоления было важно не только с точки зрения их значения для формирования ландшафтного и почвенного разнообразия приозерной экосистемы, но и для выявления возможной амплитуды сезонных колебаний показателей солевого состояния почв, поскольку динамичность этих показателей в течение года создает неопределенность при оценке эволюционных трендов.

Оценка засоления почв в трехлетнем цикле (2016-2019 гг.) выявила изменчивость соотношения процессов засоления – рассоления, результатом которой явилось различие как в общем содержании легкорастворимых солей – от 1.4 до 1.7%, так и в содержании токсичных по отношению к растениям солей – от 0.3 до 0.5% в разные сезоны наблюдений. Содержание гипса изменялось в течение года от 40 до 54%, карбонатов – от 17 до 21% в зависимости от сезона наблюдений.

Для оценки многолетнего тренда засоления нами было проведено сравнение показателей засоления почв в период современного мониторинга 2016-2019 годов и почв, изученных на этом участке в 1988 и 1990 гг. По результатам такого ретроспективного мониторинга было выявлено, что содержание легкорастворимых солей и гипса в почвах, изученных в 1988 году было меньше, чем в период современного мониторинга, тогда как содержание легкорастворимых солей и гипса в почвах, изученных в 1990 гг., находилось в пределах диапазона, установленного современным мониторингом. При сравнении содержания карбонатов в почвах раннего и современного обследования значимых различий выявлено не было. Таким образом, амплитуда сезонных колебаний содержания солей в современный период достигала величины, сравнимой с многолетними изменениями, поэтому вопрос о направлении эволюционного тренда засоленных гажевых почв не может быть решен однозначно. На уровне тенденции следует выделить увеличение засоления нетоксичными по отношению к растениям легкорастворимыми солями и усиление процесса гидрогенного гипсонакопления.

Видовой состав растительности участка за более чем 30 лет, прошедших между наблюдениями, существенно не поменялся. На участке представлены сообщества с доминированием

гликофитов, что в условиях засоления почв в гумидном климате может быть связано с невысокой долей токсичных по отношению к растениям солей и снижением их содержания в периоды максимального нарастания фитомассы. Сообщества с доминированием солеустойчивых гликофитов и высоким обилием гликогалофитов представлены на участке локально, по понижениям, где имеются выходы минерализованных грунтовых вод на поверхность.

Ключевые слова: гипсоносные почвы, озеро Неро, мониторинг, изменения климата, засоление, соленый источник, варницы.

DOI: 10.24412/2542-2006-2026-3-25-63

EDN: SAWKVJ

Разнообразие засоленных почв составляет интерес многочисленных исследований как в теоретическом, так и в прикладном аспекте из-за постоянно расширяющихся площадей засоленных почв в мире (Status …, 2015; Sharma, Singh, 2017; Global Status …, 2024). Еще большую актуальность эти исследования приобретают в связи с вопросами изменения климата. В последние десятилетия, кроме того, стало уделяться больше внимания засолению почв не только в традиционных засушливых районах распространения засоления, но и в гумидных областях, где засоление почв не имеет для этого климатических предпосылок.

В гумидных областях таежной, тундровой и арктической зон засоление встречается в прибрежных маршевых почвах (Черноусенко и др., 2001; Хитров и др., 2009; Черноусенко, 2025) или как проявление техногенного галогенеза (Солнцева, Садов, 2000; Якимов и др., 2014; Пахоруков, Еремченко, 2021; Хайрулина, 2025).

В ряде работ показано распространение засоления на территории Западной и Восточной Сибири, Байкальской рифтовой зоны, Пермского края (Лопатовская, 2018; Лопатовская и др., 2011; Якимов и др., 2014; Парамонова и др., 2017; Убугунов и др., 2017; Убугунов и др., 2020; Черноусенко, 2022; Черноусенко и др., 2017; Khayrulina et al., 2022, 2024). Рассмотренные в публикациях случаи засоления относятся к лесостепной и таежной зонам, которые получают достаточное увлажнение. Развитие такого «азонального» засоления почв вызвано наличием выходов или залежей соленосных пород палеозойского возраста, выщелачивание которых приводит к засолению почв по долинам рек и пониженным элементам рельефа, или приурочено к местам разгрузки минерализованных вод, соленых источников, гидротерм, газофлюидов и самоизливам артезианских скважин.

Аналогичные варианты засоленных почв, сформированные под действием природного (влияние неглубоко залегающих соляных пластов или морской воды) и антропогенного (отходы содовой и горнодобывающей промышленности) факторов в условиях умеренного влажного климата встречаются на территории Польши и Германии (Piernik, Hulisz, 2011; Piernik, 2012; Hulisz, 2016; Hulisz et al., 2013, 2018).

В импактных зонах источников очагового характера засоления почвообразование происходит по двум направлениям. В первом варианте засоление рассматривается как вторичный наложенный процесс, существенно не изменяющий морфологию и свойства почв. По классификации (Классификация …, 1977, 2004) такие почвы относились к типам дерново-глеевых, аллювиальных, торфяных почв или к реферативным группам Histosols, Fluvisols и Gleysols по классификации WRB (World Reference Base …, 2022). Особенности засоления почв при этом учитывались на более низком таксономическом уровне. Во втором варианте специфичное контрастное сочетание эндогенных и экзогенных факторов почвообразования оказывалось решающим, на фоне которого зональные процессы становились второстепенными. В результате такого влияния на месте зональных или интразональных гидроморфных почв появляются глеевые солончаки и солонцы или реферативные группы Solonchaks и Solonetz (World Reference Base …, 2022).

Существование двух вариантов действия таких азональных факторов, как выходы минерализованных вод, ранее уже подчеркивалось в литературе на примере гидротермальных систем Камчатки (Гольдфарб, 1996). Первый вариант предполагал трансформацию отдельных свойств почв (без существенной перестройки их морфологического облика и строения), второй – коренное преобразование механизмов формирования почв. В последнем случае образуются новые почвенные тела с уникальным сочетанием морфологических, минералогических, физико-химических и химических особенностей, не свойственных зональному типу почвообразования (Убугунов и др., 2020).

Определяющим фактором развития климатически необусловленного засоления являются гидрогеологические условия местности, связанные с областями разгрузки грунтового стока. Так, уже многими исследованиями, проведенными в США, Канаде, Австралии, Китае, было доказано, что истинными причинами проблем повышенной минерализации речных вод, появления соленых и термальных источников, а также пятен просачивания и засоления почв являются не антропогенное загрязнение, как полагалось ранее, а местные гидрогеологические факторы (Hogan et al., 2007; Gibson et al., 2013; Ye et al., 2015; Engle et al., 2016; Gue et al., 2018; Qi et al., 2018; Xiao et al., 2018; Zhou et al., 2018).

При неглубоком залегании минерализованных ГВ в местах выходов соленых источников или распространения соляных куполов их расход во время периодических засух будет осуществляться в основном за счет испарения и транспирации, приводя к засолению почв. По этой причине в слабопроточных системах, при превышении приходных статей солевого баланса над расходными засоление в форме соленых озер или сопряженной системы ГВ и почв будет иметь место в любом климате (Steinwand, Richardson, 1989; Indorante, 2006).

Топографической закономерностью распространения пятен засоления является их приуроченность к долинам рек, дельтам, лагунам, поймам, небольшим впадинам почти плоских ландшафтов, плечам трогов, озерным и речным террасам (Szabolcs, 1979; Heck, Mermut, 1992; Панкова и др., 1996; Monteiro et al., 2012; Хутакова, Убугунова, 2014). В пониженных формах рельефа происходит сосредоточение потоков поверхностных и подземных вод, с которыми мигрируют легкорастворимые соли, поэтому в приповерхностных условиях здесь располагаются наиболее минерализованные ГВ.

Примечательно, что поток подземных вод, представляющий смесь инфильтрационной воды и воды водоносных горизонтов, в том числе из глубоких коренных пород, на своем пути образует ряд промежуточных химических составов, претерпевая геохимическую эволюцию, результатом которой является современный состав ГВ и почв в зоне разгрузки (Hardie, 1970; Salama et al., 1993, 1999).

Подавляющее большинство имеющихся в литературе данных о засолении почв во влажных регионах касаются территорий континентального и резко континентального климата с сезонным контрастом осадков и температур. О засолении почв и их динамике в умеренном типе климата известно гораздо меньше.

К редким известным из литературы (Joeckel, Clement, 2005) особенностям засоления в гидроморфных ландшафтах гумидного климата относится эпизодическое накопление солей на поверхности в результате процессов испарения, которые затем претерпевают минералогические и физические изменения. Состав солей и уровень засоления при этом может изменяться в ежедневных и сезонных масштабах по мере осаждения и растворения солей, а также микробных циклов. Эти процессы останавливаются при высыхании почвы, а затем вновь инициируются последующим выпадением атмосферных осадков, что позволяет предполагать высокую динамичность процессов засоления подобных почв и вмещающих их ландшафтов.

Так, на примере техногенного галогенеза нефтегазоносных районов Западной Сибири Н.П. Солнцева (1998) показывает специфичность участия климатически необусловленного

засоления в почвообразовании, которое заключается в сочетании экстразональных и зональных признаков в одном почвенном теле и его функционировании как объекта с неустойчивыми, быстро эволюционирующими свойствами.

Территория Ярославского Поволжья, где расположены объекты нашего исследования, относится к зоне избыточного увлажнения с коэффициентом увлажнения по Иванову – Высоцкому около 1.3. Во влажном умеренно континентальном климате центра Русской равнины засоление не является типичным почвенным процессом. Наоборот, промывной тип водного режима дренированных водораздельных пространств способствует выщелачиванию легкорастворимых соединений и развитию почв подзолистого типа, а в пониженных местах при плохом дренаже приводит к заболачиванию. Однако в нарушение географических закономерностей почвенной зональности почвоведы указывают на наличие особого типа засоленных озерных почв в районе оз. Неро (Бернштейн, 1903), который позднее, при обобщении региональных материалов почвенного обследования был выделен в ростовский приозерный подрайон темноцветных заболоченных и солончаковатых почв (География …, 1972).

Распространение засоленных почв на террасах котловины оз. Неро тесно связано с местами произрастания азональной растительности. Так, А.Ф. Флеров (1903) более ста лет назад охарактеризовал приозерную часть Ростовского района (тогда уезда) Ярославской области (тогда губернии) как места распространения «обширных солонцов». Согласно его ботаническому очерку, на солоноватых низинных лугах по направлению к оз. Неро в изобилии были представлены солончаковые формы: *Spergularia marginata, Scirpus compactus, Taraxacum laevigatum* auct., *Scirpus tabernaemontani* C.C. Gmel., *Juncus gerardii* Loisel., *Plantago cornuti* Gouan, *Triglochin maritima*. На территории г. Ростова в растительных сообществах фрагментарно встречались галофильные виды, доля которых в структуре сообществ по направлению к Троице-Сергиеву Варницкому монастырю сильно возрастала. На территории Варницкого колодца вблизи Троице-Сергиева монастыря, согласно Флерову, «солончак» наиболее типичен, среди видов встречаются уже только *Triglochin maritima* L., *Spergularia marginata* и *Taraxacum laevigatum* auct., а в некоторых местах растительное покрытие настолько изрежено, что появляется обнаженная поверхность «солончака» с редкими дерновинками *Festuca ovina* L. и *Triglochin maritima* L.

В настоящем исследовании среди приозерных ландшафтов котловины оз. Неро мы сосредоточили внимание именно на этом участке. Генезис засоления почв здесь обусловлен их приуроченностью к области очаговой разгрузки подземного стока и близким залеганием минерализованных вод, получающих подпитку из глубоких водоносных комплексов (Симонова и др., 2018). Почвообразование в таких местах зависит не только от количества осадков, непосредственно поступающих на поверхность, но и от объема подземного притока и его химического состава, поэтому в результате высокой минерализации подземных вод почвы подвергаются интенсивному гидроморфному засолению.

Области такой очаговой разгрузки занимают ограниченные ареалы, а формирование почв происходит на отложениях источникового типа с преобладанием процессов гидрогенного накопления солей над зональными процессами. В нашем случае отложения и почвы на них имеют карбонатно-гипсовый состав с высокой долей мучнистого мелкокристаллического гипса, что относит их гажевым (Ямнова, Черноусенко, 2023; Кравченко и др., 2026).

Подобные ландшафты представляют собой уникальные природные комплексы и являются местами произрастания редких для средней полосы России видов растительности с внедрением галофитов (Вяль и др., 2013; Леострин и др., 2017), что придает им природоохранную значимость. Изучение их в эволюционном аспекте важно для понимания влияния глобальных и региональных климатических тенденций.

В связи с изложенным задачами нашей работы было охарактеризовать современное

состояние засоления уникальных гажевых почв гумидного климата, представить результаты трехлетних наблюдений динамики солевого режима и дать оценку многолетнего (30 лет) тренда засоления.

Материалы и методы

Факторы почвообразования района исследования. В геоморфологическом отношении район исследования располагается в пределах Ростовской низины и занимает наиболее пониженную террасированную часть в котловине оз. Неро. Основной водосборной площадью озера является Борисоглебская возвышенность, примыкающая к Ростовской низине с запада и юга. Самое большое понижение в рельефе занимает оз. Неро.

Коренными осадочными отложениями на территории являются породы пермского, триасового и юрского возраста (Геологическая …, 2016).

Толща четвертичных отложений представлена комплексом пород, отличающимся разнообразием генетических типов. В плоской части котловины из четвертичных образований распространены озерно-аллювиальные отложения, доминирующие в качестве почвообразующих пород для почв I и II террасы (Карта четвертичных …, 2015). Литологически среди отложений преобладают суглинки с высоким содержанием пылеватой фракции и супеси. Современные озерно-аллювиальные суглинки часто вмещают маломощные линзы (до 1.0 м) песков и глин, оторфованных суглинков, а иногда сапропелей. Кроме того, широко распространены болотные отложения.

Климат района умеренно континентальный с умеренно холодной зимой, умеренно теплым и влажным летом, с ясно выраженными сезонами весны и осени.

С точки зрения горизонтальной гидрохимической зональности рассматриваемый район относится к провинции гумидного климата зональных ГВ, которая характеризуется высокой влажностью воздуха, положительными среднегодовыми температурами, небольшой амплитудой суточных и сезонных колебаний температур, избыточным атмосферным увлажнением и интенсивным вымыванием солей из пород. Эти особенности приводят к формированию в большинстве случаев пресных вод с минерализацией до 0.5 г/л (Крайнов, Швец, 1992). Однако на Почвенно-мелиоративной карте Нечерноземной зоны РСФСР (1980) котловина оз. Неро выделена как область грунтово-напорных вод хлоридного и хлоридно-сульфатного засоления.

Территория, занимаемая Ростовской низиной, относится к Ростово-Борисоглебскому почвенному району среднерусской провинции среднесуглинистых почв южно-таежной почвенной подзоны (География …, 1972). На водоразделах преобладают дерново-подзолистые почвы на покровных суглинках, на террасах озерной котловины – дерново-подзолистые, дерново-подзолистые глееватые и глеевые, дерновые глеевые, болотные и аллювиальные почвы. Котловина оз. Неро выделяется в Ростовский приозерный подрайон темноцветных заболоченных и солончаковатых почв.

Краткая характеристика участка мониторинга и почвенных разрезов. Оценка динамики засоления в годовом цикле изучалась на участке, расположенном на западном берегу оз. Неро вблизи Троице-Сергиева Варницкого монастыря. Участок ограничен с запада подтапливаемой поймой р. Ишни, с севера – поймой и коренным берегом Ишни, с юга и востока – Варницким шоссе. Схема расположения участка мониторинга представлена на рисунке 1.

Пространство участка имеет вид старицеобразного замкнутого понижения, расположенного в пределах II террасы оз. Неро. Поверхность относительно выровненная, с кочкообразным нанорельефом; абсолютные высоты варьируют от 97 до 99 м. Имеются небольшие западины, локальные понижения и валообразные повышения, где высоты достигают максимальных значений. Участок прорезан дренажной канавой.

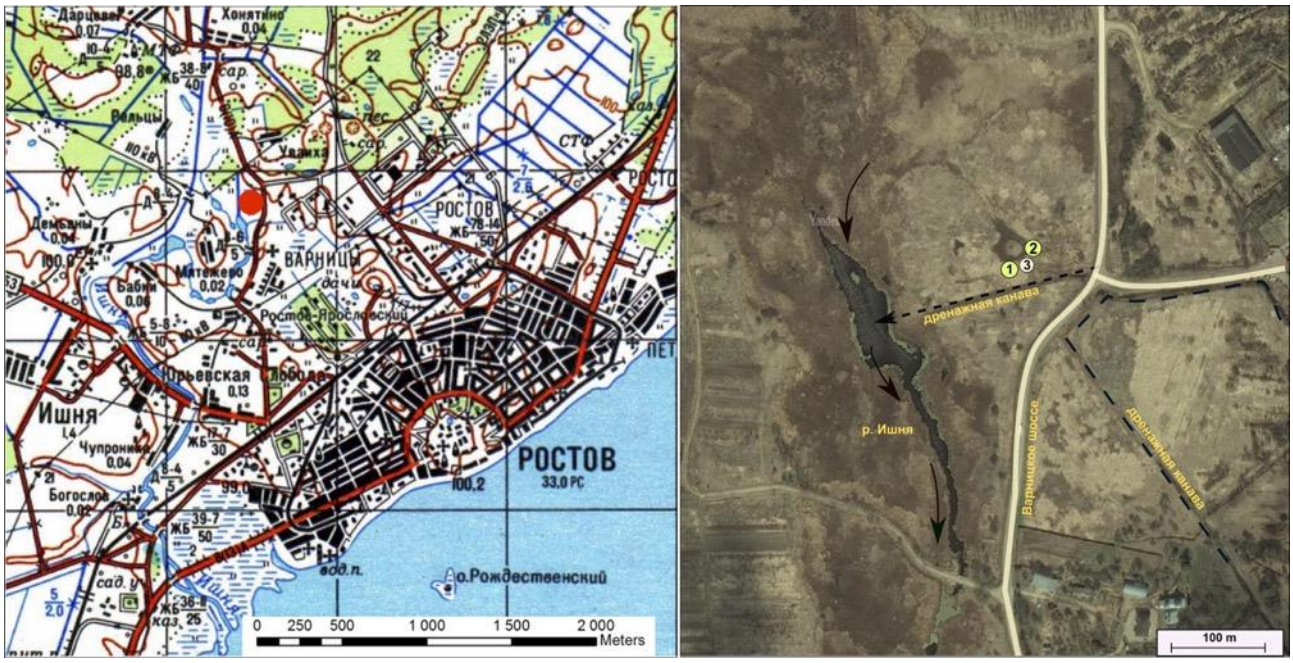

Рис. 1. Схема расположения участка мониторинга; основа (слева) – топографическая карта М 1:100000 (1988), подложка – спутниковый снимок от 16.02.2017 с Яндекс.Карты (2017). *Условные обозначения:* 1, 2 – места почвенных разрезов, 3 – колодец, где ранее добывался рассол для выварывания соли. **Fig. 1.** Layout of the monitoring site; for the base (on the left) we used the General Staff Topographic Map (Scale 1:100,000; 1988), for the background we used a satellite image dated 16/02/2017 and sourced from Yandex.Maps (2017). *Legend:* 1, 2 – soil pits, 3 – a brine well used for extraction.

Уже несколько десятилетий участок имеет статус памятника археологии и памятника природы «Соляной источник «Варницы», а ранее это место было известно тем, что здесь выварывали соль. Из объектов центра ростовского солеварения сохранился один из колодцев, из которого добывали рассол (рис. 2).

Наличие на участке соленых родников указывает на очаговый характер разгрузки подземных вод, сосредоточенной в понижении. Пространственная приуроченность к зоне выхода высокоминерализованных вод приводит к появлению в этом месте климатически необусловленного засоления почв и ландшафта в целом.

Почвенные разрезы (рис. 2) располагались в непосредственной близости от Варницкого колодца – в четырех и пяти метрах. Отбор проб почвы для оценки засоления проводился по профилю одновременно из двух разрезов с периодичностью один раз в сезон в течение 3 лет. Мониторинг засоления был начат в сентябре 2016 года и закончен в августе 2019 г.

Особенности морфологического строения профиля нами уже были изложены ранее (Симонова и др., 2018). Было показано, что почва формируется на хемогенных гажевых отложениях карбонатно-гипсового состава, где гипс представлен мучнистой формой. Кроме того, в профиле встречаются артефакты в виде угольков, остатков древесины, кирпичной крошки, солеваренного шлака.

Почвы отличаются высоким содержанием органического вещества и азота, причем не только в гумусовых горизонтах профиля, но и в нижележащих минеральных.

Гидроморфные условия, в которых формируются почвы понижения, способствуют накоплению органического вещества низкой степени гумификации. В гумусовом горизонте почвы содержится большое количество растительных остатков слабой степени разложенности.

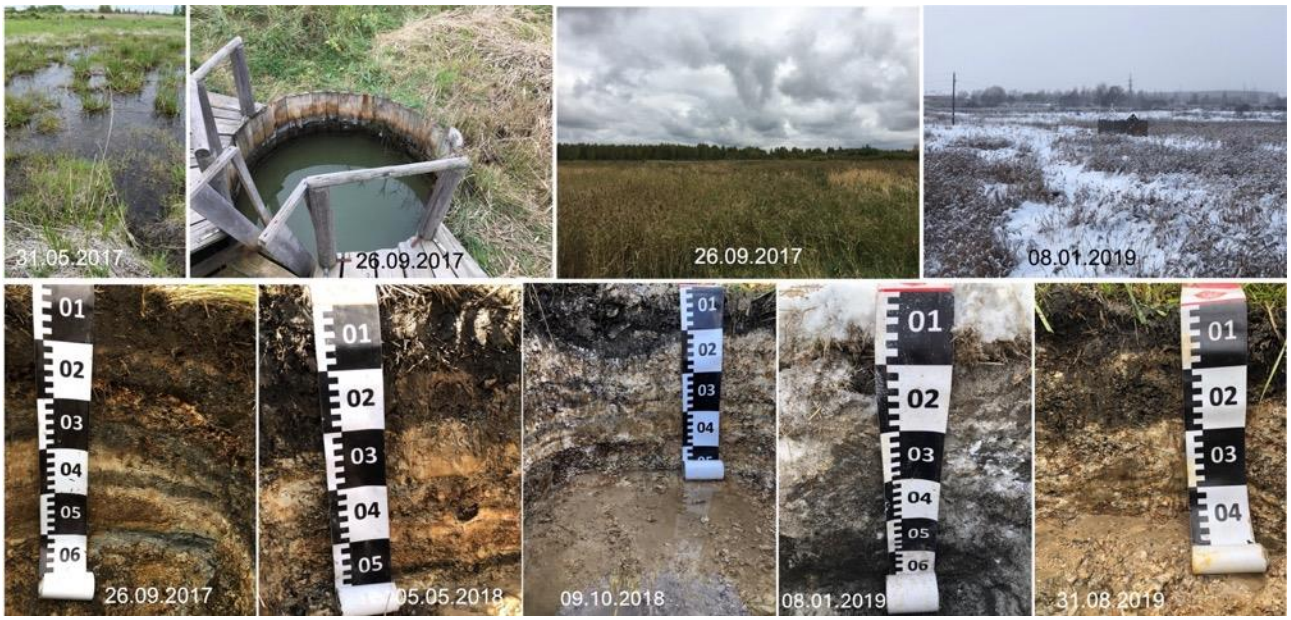

Рис. 2. Ландшафт участка и почвенные профили в разные сезоны мониторинга (фото Ю.В. Симоновой). **Fig. 2.** Landscape of the site and soil profiles in different monitoring seasons (photo by Yu.V. Simonova).

Методы исследований. Химический анализ ГВ проводился на участке мониторинга регулярно (один раз в сезон) с сентября 2016 года по август 2019 г. Анализ выполнялся стандартными методами (Резников и др., 1970). Содержание CO_3^{2-} и HCO_3^- определяли титриметрическим методом, pH – потенциометрическим. Содержание Cl^- определялось аргентометрическим методом по Мору, SO_4^{2-} – весовым, Ca^{2+} и Mg^{2+} – комплексонометрическим, Na^+ и K^+ – методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе ICPE-9000 в РЦ СПбГУ «Методы анализа состава вещества».

Засоление почв определялась на основе результатов анализа водной вытяжки почв при соотношении почвы и воды 1:5. Анализ водной вытяжки почв выполнялся стандартными методами (Воробьева, 1998). Содержание Na^+ и K^+ определялось в непрерывном пламени на приборе Shimadzu AA-7000, работающем в режиме эмиссии, на базе РЦ СПбГУ «Методы анализа состава вещества». Для оценки степени засоления рассчитывалась общая сумма солей (Sобщ) и сумма токсичных для растений солей (Sтокс), перешедших в водную вытяжку (Воробьева, 1998; Засоленные почвы …, 2006). Содержание CO_2 карбонатов находилось по изменению массы навески в результате обработки 5 н. HCl (Растворова и др., 1995). Содержание SO_4^{2-} гипса определялось весовым методом в солянокислой вытяжке (Аринушкина, 1970).

Для определения многолетнего тренда засоления почв участка «Варницы» почвы современного периода их изучения (2016-2019 гг.) сравнивались с их аналогами, изученными в июле 1988 года и сентябре 1990 г. Разрезы этих почв ранее также были заложены, как и современные, в непосредственной близости от Варницкого колодца – в 3 и 10 метрах. Образцы почвы из этих разрезов сохранились в архиве Кафедры почвоведения и экологии почв Санкт-Петербургского государственного университета. Возможность сравнения результатов анализа при проведении ретроспективного мониторинга обеспечивалась параллельным анализом архивных образцов и образцов современного периода отбора, а также за счет применения одних и тех же методов, методик и приборов.

Статистическая обработка данных проводилась в программе SPSS Statistics. Усреднялись данные о содержании солей, карбонатов и гипса как на почвенный профиль, так и данные сезонных наблюдений за 3 года с расчетом доверительных интервалов. Для оценки различий сравниваемых показателей почв, отобранных в разные временные периоды, использовался однофакторный дисперсионный анализ с 5% уровнем значимости. При несоблюдении условия однородности дисперсий сравниваемых данных применялся дисперсионный анализ Уэлча.

В 2020 году на обследованном участке выполнены геоботанические описания. Площадки для описаний размером 5×5 м закладывались со стороны лицевой стенки почвенного разреза, образующей середину одной из сторон пробной площади, а также в естественных контурах вокруг Варницкого колодца и в понижениях, занятых эфемерными озерцами. Номенклатура названий растений принята по Флоре средней полосы европейской части России (Маевский, 2014).

Результаты и обсуждение

Гидрохимические исследования динамики грунтовых вод. Гидрохимический режим участка имеет большое значение как регулирующий фактор почвообразования гидроморфных почв. Большую часть года ГВ находились на глубине 35 см. Колебания уровня ГВ связаны с чередованием сезонов повышенной водности и меженных периодов, поэтому была отмечена синхронность с изменениями уровней воды в реках бассейна оз. Неро. Небольшие пики подъемов ГВ, до уровня 25-30 см, соответствовали периодам весеннего половодья. В летне-осеннюю межень происходил спад уровня воды в реках, питающих оз. Неро, а уровень ГВ на участке опускался ниже 40 см (табл. 1).

Таблица 1. Колебания уровня ГВ, минерализации и химического состава в годовом цикле.
Table 1. Annual fluctuations in the groundwater level, mineralization and chemical composition.

Дата отбора	Уровень, м	pH	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	TDS
			мг/л							
22.09.2016	0.35	7.2	342	5388	2396	1160	417	2550	54	12307
30.01.2017	0.35	7.0	286	4041	2021	1080	401	1980	45	9853
11.05.2017	0.30	7.9	366	4786	1943	1048	307	2174	36	10660
12.06.2017	0.45	6.5	458	6097	2351	1136	326	3150	50	13568
26.09.2017	0.65	7.2	244	6736	2498	1000	374	3679	47	14577
10.02.2018	0.35	7.1	244	3970	1941	1080	312	1727	47	9321
03.05.2018	0.30	7.5	366	4963	2153	1080	264	2606	53	11486
28.07.2018	0.80	7.1	488	5672	2525	1200	384	2920	56	13244
04.10.2018	0.40	6.9	519	4609	2186	960	384	2320	51	11028
04.01.2019	0.35	7.6	458	6258	2213	1080	432	2685	20	13145
02.05.2019	0.25	7.4	305	3900	2009	640	336	2135	14	9338
18.08.2019	0.45	7.1	458	5918	2338	1040	336	3240	45	13374

Величина минерализации ГВ, усредненная за период мониторинга 2016-2019 гг., составила 11.8 г/л. Разброс за весь период наблюдений составил от 9.3 до 14.6 г/л. Варьирование величины минерализации находилось в зависимости от водности сезона: ее максимумы в годовом цикле приходились на периоды низкого атмосферного стока, а минимумы – на периоды половодья, что говорит о том, что по условиям питания ГВ относятся к сезонному типу.

В катионно-анионном составе ГВ преобладают Na^+ и Cl^- (табл. 1), что с учетом величины их минерализации отражает глобальные закономерности поведения макрокомпонентного состава природных вод. По классификации Курнакова-Валяшко (Валяшко, 1962) ГВ относятся к хлоридному гидрохимическому типу.

На фоне преобладания ионов Cl^- и Na^+ особенностью ГВ участка является высокое содержание в них SO_4^{2-} и Ca^{2+}. При таких высоких концентрациях Ca^{2+} (1.0 г/л) и SO_4^{2-} (2.2 г/л) и величине pH от 6.5 до 7.9 создаются практически оптимальные условия для осаждения гипса (Sonnenfeld, 1984). Таким образом, химический состав ГВ на этом участке имеет решающее значение для формирования минерального вещественного состава отложений и почв. В современных гумидных условиях в пределах изученного понижения формируются гажевые почвы карбонатно-гипсового состава.

Самое высокое сезонное варьирование ГВ отмечено в отношении легкомигрирующих ионов Cl^- и Na^+, а также ионов HCO_3^- и K^+ (табл. 1), принимающих активное участие в биогеохимических циклах зоны гипергенеза. Вследствие высокой подвижности Cl^- и Na^+ остаются в твердой фазе почвы в меньшем количестве. Вымываясь из почвенного профиля, они оказываются в сопряженных водотоках, увеличивая уровень их минерализации. Это подтверждается данными опробования притоков оз. Неро, полученными нами в 2017-2019 гг. (Симонова и др., 2022), а также данными других исследователей озера (Состояние …, 2008; Литвинов, 2017).

Для вод р. Ишни, второго по величине притока оз. Неро и местного базиса дренирования изученного участка, свойственна не только высокая величина минерализации, но и непривычное для пресноводных рек соотношение макрокомпонентов. Результаты регулярных гидрохимических исследований вод р. Ишни в 2017-2019 гг., ранее опубликованные нами (Симонова и др., 2022), в створе, расположенном ниже по течению от участка, выявили, что на фоне невысокой водности речные воды испытывают значительные колебания химического состава в течение годового цикла. Максимальная минерализация (1000 мг/л) достигается в большей степени за счет увеличения концентраций ионов Cl^- и Na^+ в сезоны ослабленного поверхностного стока и увеличения доли подземного притока в питании рек. Аномально высокая для поверхностных водотоков минерализация и хлоридный натриевый состав воды нарушает закономерности ландшафтной зональности рек гумидной зоны. В этом случае климатические условия создают лишь общий фон, на котором развивается действие других факторов формирования гидрохимических особенностей речного бассейна.

Оценка степени засоления почв и особенности динамики засоления в годовом цикле. Для оценки засоления почв участка выполнен анализ солевых профилей разрезов 1 и 2, заложенных вблизи Варницкого колодца (рис. 1). Солевые профили были построены для 12 сезонов наблюдений 2016-2019 гг.

Анализ картины солевых профилей обоих разрезов показал (рис. 3), что в катионно-анионном составе абсолютно доминируют ионы SO_4^{2-} и Ca^{2+}. По сравнению с Cl^- и Na^+ первые содержатся в ГВ в менее заметных количествах, однако за счет различий в кинетике растворимости именно они относительно накапливаются в почвенном профиле.

Образующийся избыток SO_4^{2-} и Ca^{2+} осаждается из раствора почвенно-грунтовых вод в твердой фазе почвы в виде гипса. Механизм обогащения почвы сульфатами обязан выпадению их из раствора и закреплению при пониженных температурах (Ковда, 1946). Сульфатно-кальциевая часть при этом проявляет высокую стабильность в динамике макрокомпонентов водной вытяжки в течение года, выступая «каркасом», поддерживающим постоянство засоления почвы.

Сезонная изменчивость доминирующих компонентов водной вытяжки проявляется в основном в верхних 20 см почвенной толщи. Следовательно, верхняя часть профиля является наиболее динамичной по отношению к нижней водонасыщенной. Форма солевого профиля соответствует виду равномерного распределения солей. В отдельные сезоны профиль сменяется на равномерный с аккумуляцией солей сверху или же на равномерный с регрессивным верхом.

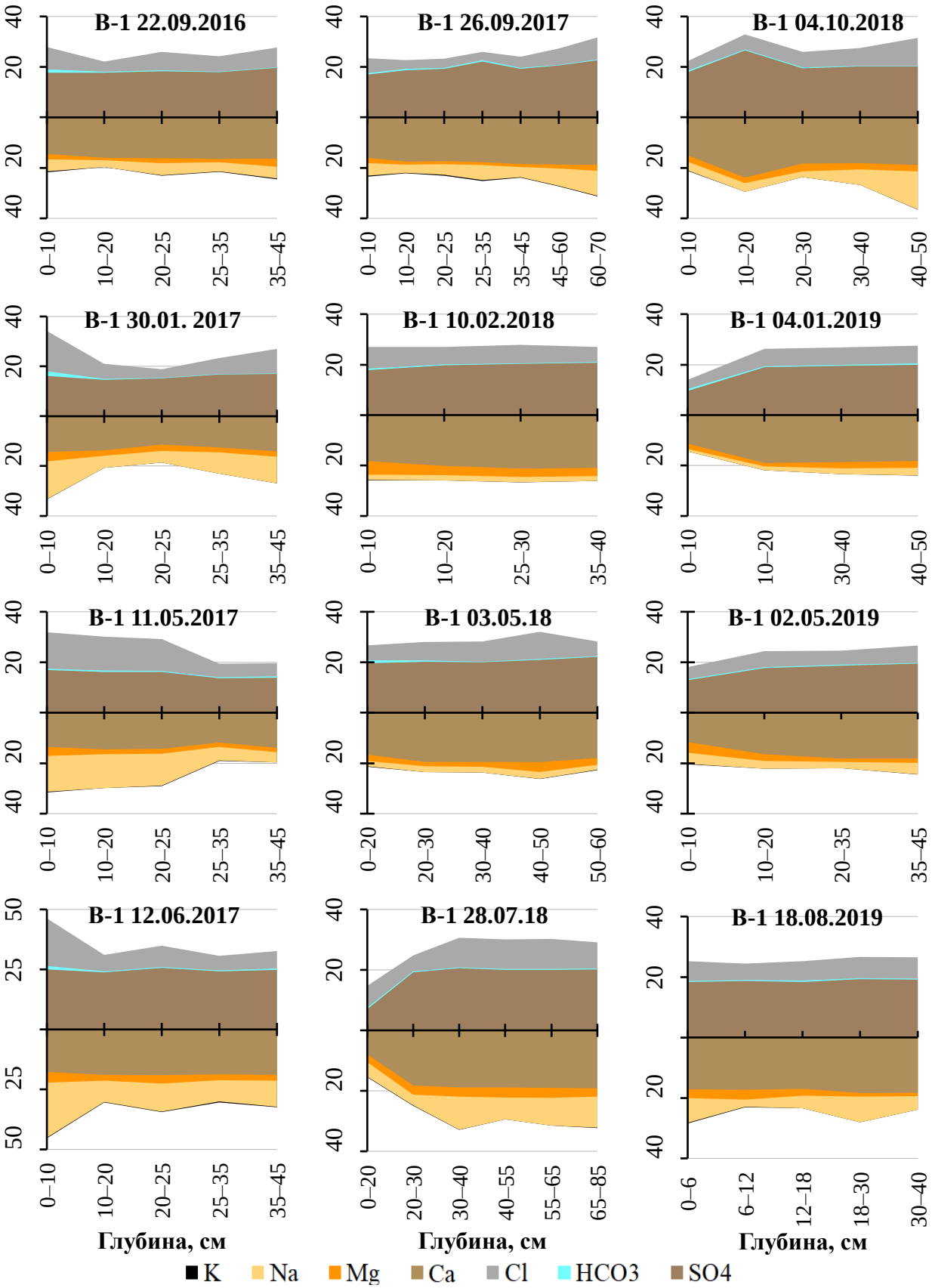

Рис. 3а. Катионно-анионный состав (смоль(+/−)/кг) почв по профилю разреза 1 (а) в разные сезоны отбора. **Fig. 3a.** Cation-anion composition ($cmol_c \cdot kg^{-1}$) of soils along the profile of pit 1 (a) in different sampling seasons.

Продолжение рисунка 3.

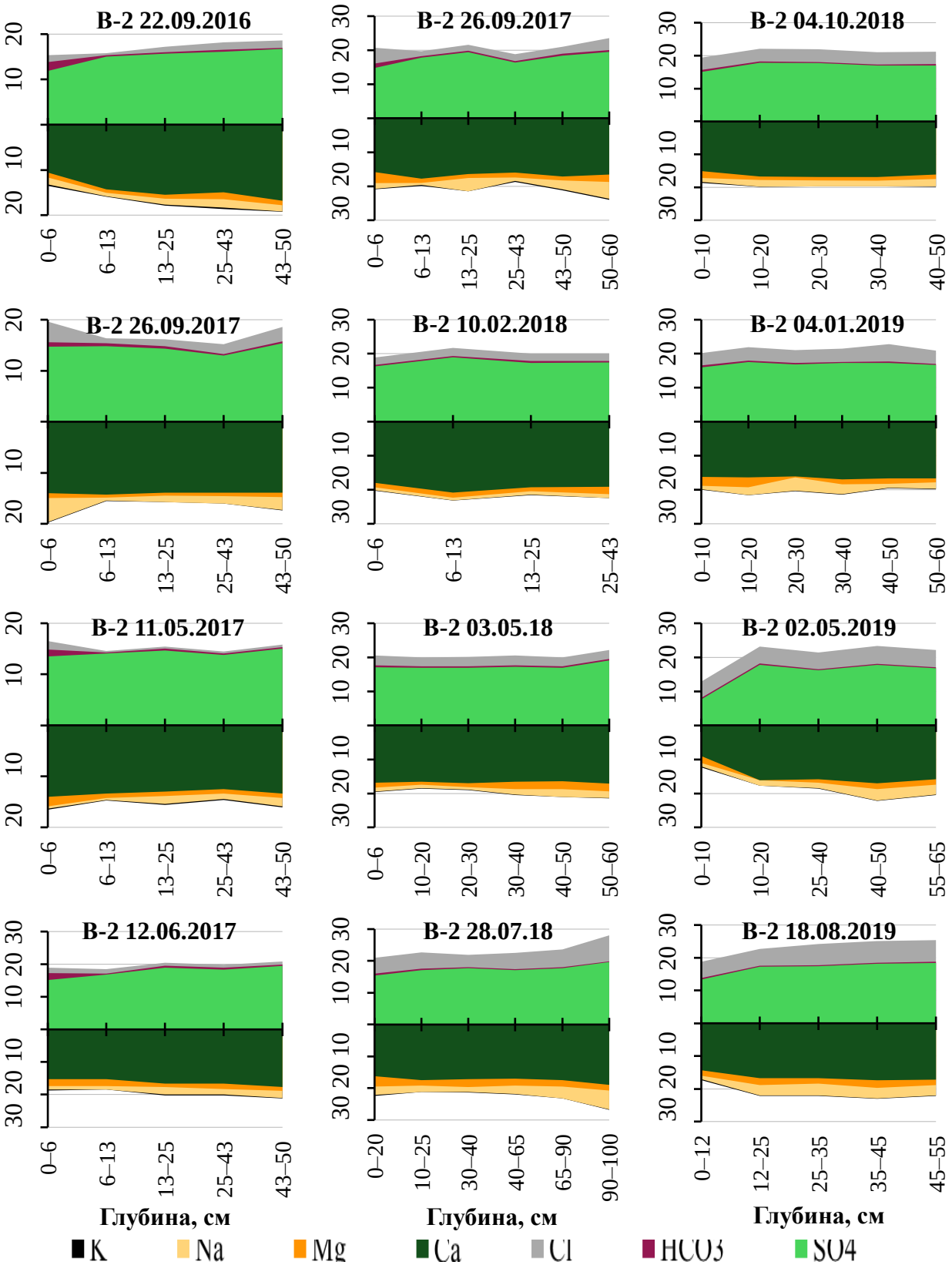

Рис. 3б. Катионно-анионный состав (смоль(+/−)/кг) почв по профилю разреза 2 в разные сезоны отбора. **Fig. 3b.** Cation-anion composition ($cmol_c \cdot kg^{-1}$) of soils along the profile of pit 2 in different sampling seasons.

Смещение солевого максимума и изменение типа солевого профиля следует за сменой фаз гидрологического цикла практически синхронно с динамикой минерализации ГВ. Так, например, в летний период всегда можно было наблюдать увеличение минерализации ГВ и содержания солей в почвах относительно других сезонов наблюдения, но при этом максимум солей не обязательно находился в верхней части профиля за счет более высокой инертности почвы к текущим климатическим и гидрологическим колебаниям.

Корреляционный анализ массива данных катионно-анионного состава почв, составленного из результатов всех наблюдений за 3 года, выявил наиболее тесную зависимость показателя $S_{сол}$ от содержания Cl^-, SO_4^{2-} и Na^+ (рис. 4а), а показателя $S_{токс}$ – от Cl^- и Na^+ (рис. 4б).

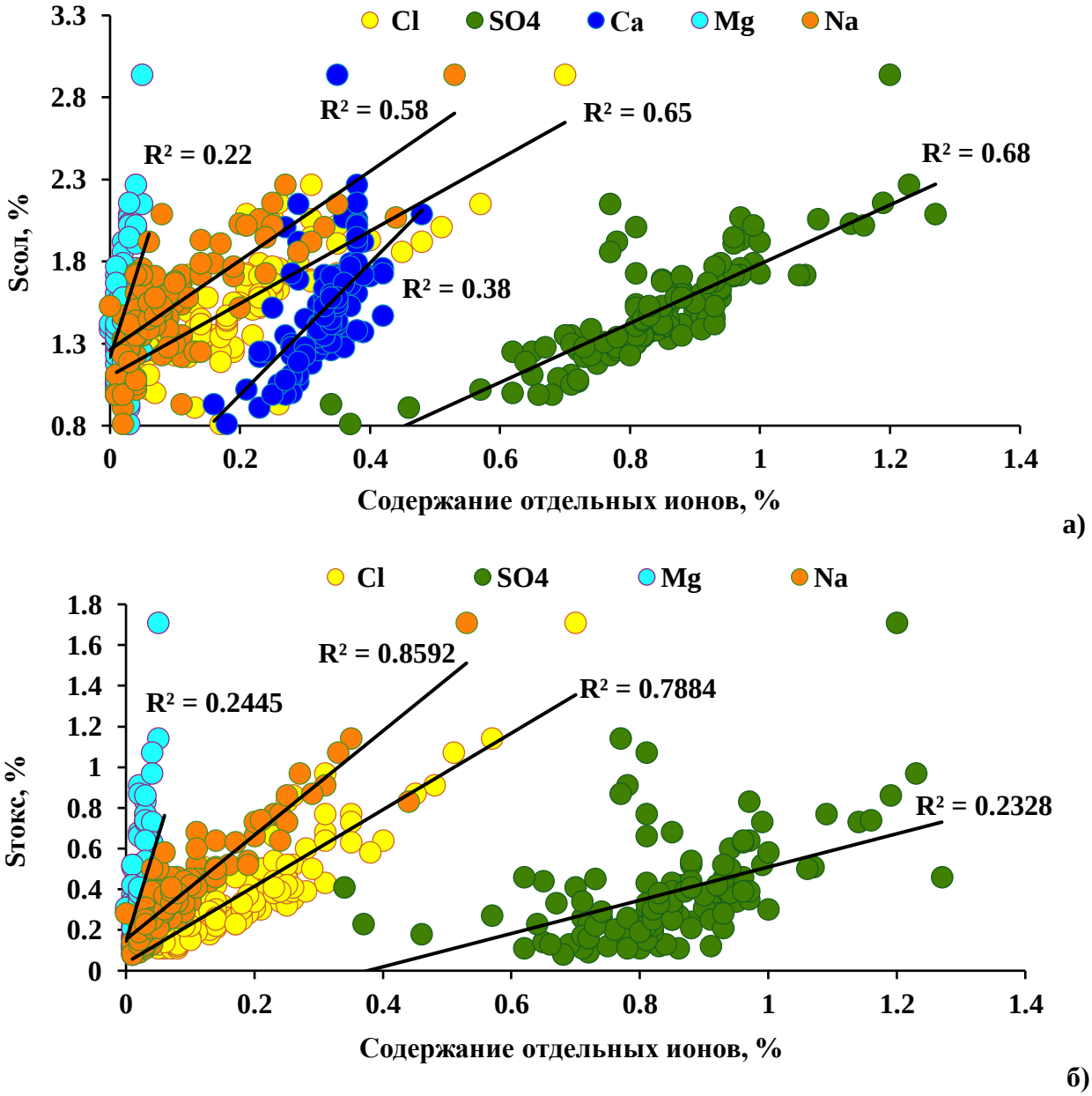

Рис. 4. График зависимости $S_{сол}$ (а) и $S_{токс}$ (б) от содержания отдельных ионов и значимые корреляции (p = 0.05). **Fig. 4.** Graph of the dependence of total sum of salts (a) and sum of toxic salts (b) on the content of individual ions, with only significant correlations plotted (p = 0.05).

Для устранения неоднородности вещественного состава в пределах горизонта и профиля, мешающей оценке динамики в годовом цикле, было произведено разделение данных на группы в зависимости от сезона отбора (около 30 наблюдений в каждой группе) с их последующей статистической обработкой. Этот прием позволил с большей достоверностью оценивать различия как между сезонами, так и в более продолжительном временном интервале наблюдений.

Анализ сгруппированных данных о содержании солей в годовой динамике выявил следующее. Во-первых, величины $S_{сол}$ и $S_{токс}$ изученных гажевых почв существенно различались между собой (рис. 5), что объясняется преобладанием в катионно-анионном составе SO_4^{2-} и Ca^{2+}, которые при определенном соотношении не учитываются в составе токсичных солей. Среднее содержание солей по показателю $S_{сол}$ в течение года менялось незначительно – от 1.43 до 1.65% (рис. 5а). Размах величины $S_{токс}$ оказался шире – от 0.33 до 0.48% (рис. 5б).

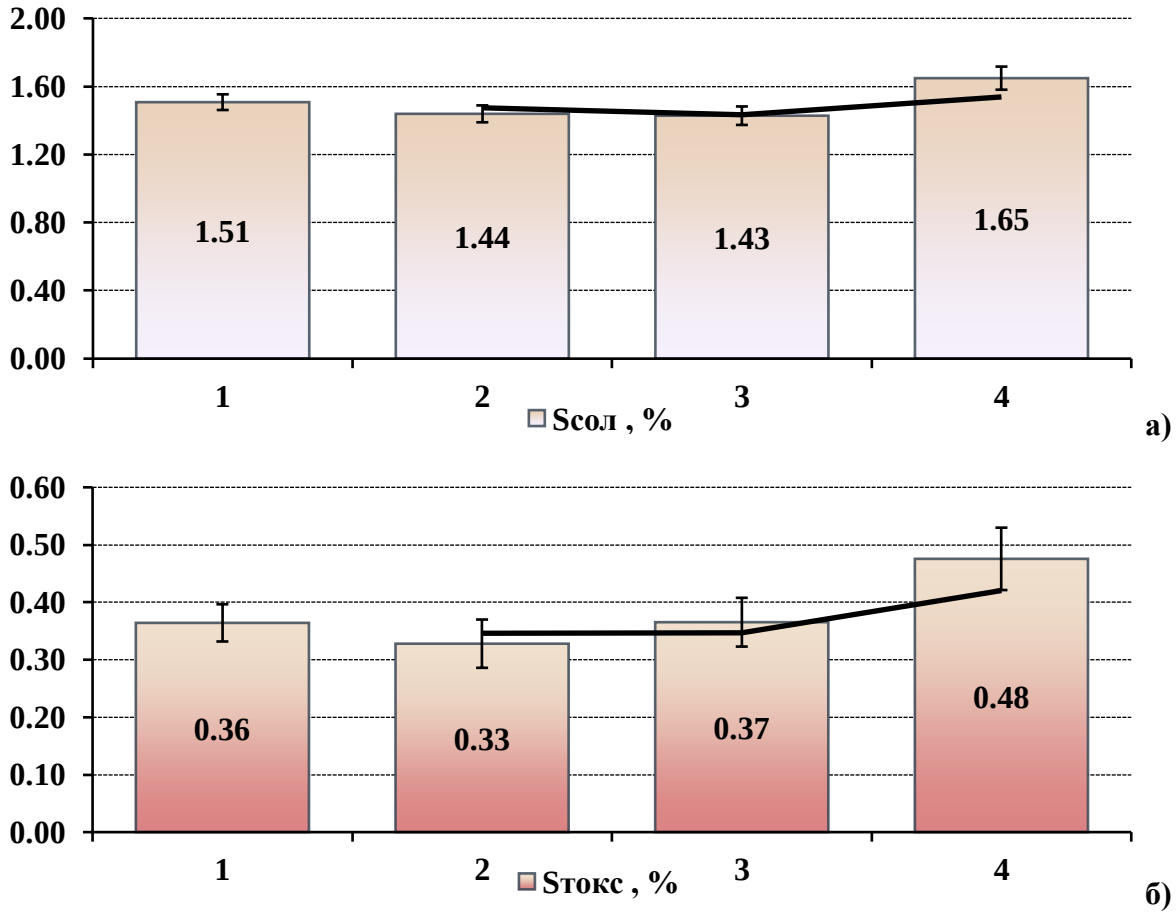

Рис. 5. Среднее содержание $S_{сол}$ (а) и $S_{токс}$ (б) в почвах участка в зависимости от сезона наблюдений в 2016-2019 гг. *Условные обозначения к рис. 5-6, 9-10:* 1 – осень, 2 – зима, 3 – весна, 4 – лето, планки погрешностей – 95% доверительный интервал, линия тренда – скользящие средние. **Fig. 5.** Average contents of salts (a) and toxic salts (b) in soils of the plot in different observation seasons of 2016-2019. *Legend to Fig. 5-6, 9-10:* 1 – autumn, 2 – winter, 3 – spring, 4 – summer; error bars correspond to the 95% confidence interval; trend lines are moving averages.

Во-вторых, характер поведения показателей $S_{сол}$ и $S_{токс}$ в течение года несколько различается. Максимальное содержание обоих обнаруживалось в летний период (рис. 5).

Зимой и весной отмечены минимальные значения $S_{сол}$, к лету $S_{сол}$ увеличивалась, а к осени плавно снижалась. Показатель $S_{токс}$ проявлял более контрастный характер поведения: минимальное значение имел зимой, плавно нарастал к весне и более резко к лету, а к осени также резко снижался. Поскольку основной вклад в показатель $S_{токс}$ вносит содержание хлоридов и натрия, то значит, что преимущественно с колебаниями этих ионов надо связывать сезонную динамику солевого состояния почвы, а фактором, определяющим динамику, – считать соотношение атмосферного и подземного стока. В этом случае закономерно, что увеличение содержания солей в почвах участка происходило в летний период, тогда же, когда фиксировались пики минерализации ГВ (табл. 1).

Отсюда следует заключить, что процесс накопления солей происходит в период низкого атмосферного стока и высокого испарения, а преобладающая в безморозный период года инфильтрация приводит к частичному рассолению почвенного профиля. Поэтому коэффициент сезонного засоления, то есть отношение осеннего солесодержания к весеннему (Ковда, 1946), ни в один из годовых циклов не превышал значения 1.0; солевой режим почв относится к сезонно-обратимому типу.

Смена фаз водности в гидрологическом режиме участка и пульсирующий режим засоления делает эти почвы в некотором смысле похожими на гидроморфные аллювиальные и маршевые почвы (Hissink, 1938; Lavado, Taboada, 1988). Почвы с подобной спецификой периодического рассоления и очередного засоления в сухой период распространены также среди гидроморфных пойменно-аллювиальных и дельтовых почв Туранской равнины в бассейне Аральского моря (Панкова и др., 1996).

Динамика содержания гипса и карбонатов в засоленных почвах гумидного климата. Одновременно с данными химического анализа водных вытяжек почв оценивалась динамика содержания гипса и карбонатов (рис. 6). Суммарное их содержание в отдельные периоды могло превышать 85%, что соотносится с характеристикой большинства гажевых почв суббореальной зоны России, в которых содержание гипса составляет 50-70%, карбонатов – 20-40% (Ямнова, Черноусенко, 2023).

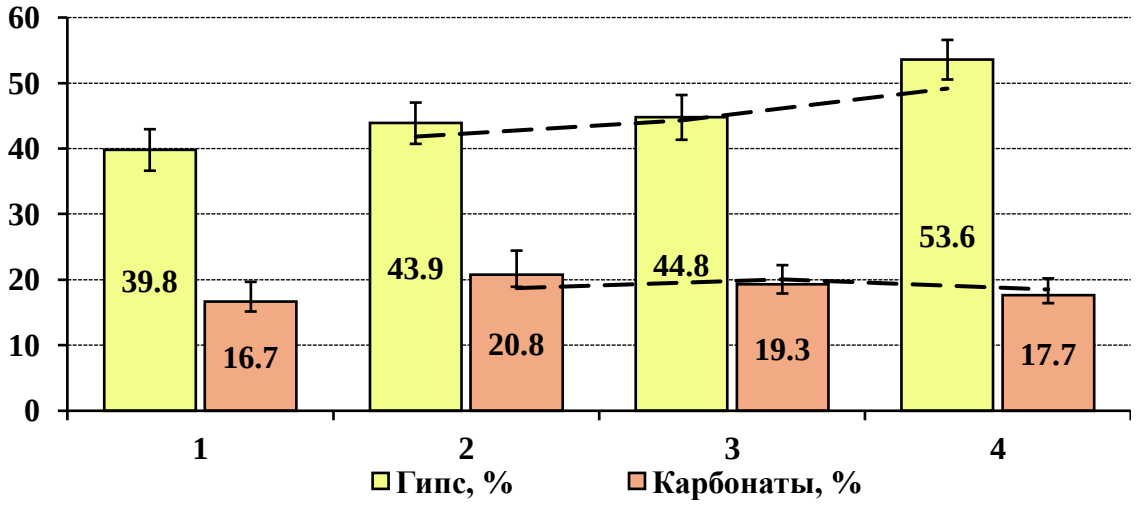

Рис. 6. Среднее содержание гипса и карбонатов в почвах участка в зависимости от сезона наблюдений в 2016-2019 гг. **Fig. 6.** Average gypsum and carbonate content in soils at the site in different observation seasons of 2016-2019.

Анализ динамики содержания гипса и карбонатов в почвах за трехлетний период наблюдений выявил, что они так же, как и легкорастворимые соли подвергаются сезонным

колебаниям (рис. 6). Содержание гипса изменяется в течение года в среднем от 39.8 до 53.6%, демонстрируя минимальное значение осенью, которое постепенно возрастает к лету. В почвенном профиле его максимум обычно приходится на глубину (30-40 см), но может опускаться и глубже в зависимости от уровня ГВ, установившегося в сезон наблюдения. Минимальное количество гипса находится в самом верхнем гумусовом горизонте, и чаще всего его количество там не превосходит 5-10%. В отношении карбонатов наблюдается обратная картина. Их содержание превышает содержание гипса в горизонтах, богатых органическим веществом, особенно в зоне распространения корней, где карбонаты рассеяны в дисперсной форме или представлены в виде гнезд и стяжений (рис. 7).



Рис. 7. Распределение карбонатов в корнеобитаемом слое почв участка (фото А.В. Русакова).
Fig. 7. Distribution of carbonates in the root zone of the soils of the site (photo by A.V. Rusakov).

Локализация зон осаждения карбонатов, связанная с архитектурой корневой сети, создает неоднородность их распределения в пределах горизонта. Многократный отбор проб в течение 12 сезонов из двух разрезов, усреднение данных на профиль и последующее разделение по сезонам наблюдений позволили статистически сгладить внутригоризонтные неоднородности, особенно актуальные для показателя содержания карбонатов. При усреднении данных за период наблюдения было получено, что содержание карбонатов в течение года меняется от 16.7 до 20.8%. При том, что карбонат кальция обладает существенно более низкой растворимостью по сравнению с гипсом их межсезонное варьирование находилось на близком уровне – 20% для карбонатов и 30% для гипса.

Результаты химического анализа в отношении динамики солевого состояния почв выявили высокие скорости изменения соотношения накопления – выщелачивания в течение годового цикла не только для легкорастворимых солей, но и для гипса и карбонатов. Несмотря на зависимость во многом от одних и тех же факторов, кинетика растворимости и осаждения гипса и карбонатов различна. Во-первых, различие в скоростях их образования и растворения определяется минерализацией и составом раствора почвенно-грунтовых вод (Kinsman, 1976; Suarez, 1977; Минашина, Шишов, 2002), которые зависят от текущего гидротермического режима. Во-вторых, существенное влияние на межсезонную динамику этих солей в почвах оказывает парциальное давление CO_2, через которое устанавливается бикарбонатное равновесие с атмосферой (Mullins, 1998). Содержание CO_2 в почвенном растворе особенно сильно влияет на растворимость карбонатов. С повышением

концентрации CO_2 растворимость карбонатов резко увеличивается, что приводит к снижению различий в растворимости карбонатов и гипса, а, значит, и различий их межсезонного варьирования.

Кроме того, растворимость гипса и карбонатов по-разному зависит от температуры (Sonnenfeld, 1984; Herrero, Porta, 2000). Тогда как растворимость гипса в воде мало зависит от температуры, во всяком случае, в том диапазоне, который поддерживается почвенной средой, то растворимость CO_2 в воде и вместе с ней растворимость карбонатов с понижением температуры увеличивается. На этом основании можно было ожидать снижения содержания карбонатов в твердой фазе в зимнее время. Однако на зимний и весенний сезоны в период наших наблюдений чаще приходилось их увеличение, тогда как летом и осенью, наоборот, отмечались минимальные величины содержания карбонатов. Объяснение этому можно найти во взаимосвязи карбонатного равновесия с вегетационным периодом растительности и фотосинтезирующими симбионтами, осуществляющими свой энергетический цикл путем кальцификации (McConnaughey, Whelan, 1997). В этом случае выявленное нами некоторое снижение содержания карбонатов в твердой фазе в летний и раннеосенний периоды закономерно.

Классификационное положение почв. Высокая динамичность показателей засоления почв, таких как содержание солей, химизм засоления, глубина максимума солей вносит неопределенности при установлении классификационного положения почв. Химизм засоления почв участка относится преимущественно к хлоридному с гипсом, сульфатно-хлоридному с гипсом или хлоридно-сульфатному с гипсом, различаясь в разные сезоны наблюдений. По составу катионов почвы относятся к натриево-магниевому или магниево-натриевому химизму.

Степень засоления почв одного из изученных разрезов участка преимущественно средняя, другого – сильная и очень сильная, достигая в отдельные сезоны по $S_{токс}$ в верхнем горизонте значений, характерных для солончаков (> 1%).

В том случае, когда $S_{токс}$ принимает значение < 1%, засоление учитывается на уровне подтипа. Поскольку верхний горизонт всегда оказывается засоленным, то почва относится к виду солончаковых. Когда $S_{токс}$ в верхнем горизонте превышает 1%, почву следует классифицировать как солончак.

Засоление, развитие в гидроморфных условиях, обогащенность карбонатами и высокое содержание гипса гидрогенного происхождения предполагает следующие варианты названий почв по Классификации почв России (Классификация …, 2004; Полевой …, 2008): серогумусовая квазиглеевая (гидрометаморфическая) засоленная омергеленная гипссодержащая на гаже или солончак глеевый омергеленный гипссодержащий на гаже.

Характеристика растительности участка мониторинга. Для анализа связи растительности участка с засолением почвы растения разделялись на следующие экологические группы: 1) обычные гликофиты – не переносят или плохо переносят засоление, могут быть обнаружены единичные растения при слабом и непродолжительном повышении минерализации почвенных вод до уровня солоноватых; 2) солеустойчивые гликофиты – имеют оптимум в незасоленных местообитаниях, но могут успешно произрастать при слабом и, видимо, не постоянном засолении; 3) галофиты – произрастают в природе чаще или исключительно на засоленных почвах, на территории обследования представлены только гликогалофитами, повышающими осмотическое давление в своих тканях преимущественно за счет увеличения концентрации водорастворимых органических соединений (сахаров и др.).

Фитоценозы, в пределах которых заложены почвенные разрезы, представляют собой сорно-луговую растительность с господством видов-гликофитов, устойчивых к периодически повышенной минерализации почвенных вод. Разрез 1 выполнен на донниково-

вейниковом лугу с господством *Melilotus albus* и *Calamagrostis epigeios*, в котором отмечено 14 видов сосудистых растений (табл. 2).

Таблица 2. Видовой состав фитоценозов участка и экологические группы по отношению к засолению почвы. **Table 2.** Species composition of phytocenoses of the site and ecological groups in relation to soil salinity.

Виды растений	СУ*	Общее проективное покрытие трав			
		разрез 1	разрез 2	колодец	озерцо
		80	95	90	95
Atriplex prostrata Boucher ex DC.	2	0.5	–	2	15
Calamagrostis epigeios (L.) Roth	1	40	–	–	1
Centaurea jacea L.	0	0.5	–	–	–
Cirsium arvense (L.) Scop.	1	0.5	20	–	1
Eleocharis palustris (L.) Roem.& Schult.	1	–	–	–	5
Elytrigia repens (L.) Nevski	1	–	35	10	10
Festuca pratensis Huds.	0	0.5	–	–	–
Festuca ovina L.	1	2	–	35	–
Galium album Mill.	0	2	–	–	–
Geranium pratense L.	0	–	5	1	–
Juncus gerardi Loisel.	2	–	–	–	3
Lathyrus palustris L.	1	1	–	–	–
Lathyrus pratensis L.	1	–	0.5	–	–
Medicago lupulina L.	1	4	1	1	–
Melilotus albus Medik.	1	40	2	0.5	–
Angelica palustris (Bess.) Hoffm.	1	–	1	1	0.5
Phragmites australis (Cav.) Trin.	1	0.5	30	30	–
Plantago major L.	1	–	–	2	–
Poa pratensis L.	0	3	2	5	2
Potentilla anserina L.	1	–	3	15	75
Scirpus tabernaemontani C.C. Gmel.	2	–	–	–	2
Sonchus oleraceus L.	1	0.5	–	2	0.5
Thalictrum flavum L.	0	–	–	–	0.5
Triglochin maritima L.	2	–	–	1	10
Urtica dioica L.	0	–	7	–	–
Vicia cracca L.	1	2	10	–	1
Vicia sepium L.	0	–	2	–	–
Общее проективное покрытие мхов	0	5	0	0	0
Общее проективное покрытие трав		80	95	90	95

Примечания к таблице 2. СУ* – солеустойчивость в баллах: 0 – обычный гликофит, 1 – солеустойчивый гликофит, 2 – гликогалофит. **Notes to Table 2:** СУ* – points of salt tolerance: 0 – normal glycophyte, 1 – salt-tolerant glycophyte, 2 – glycohalophyte.

Разрез 2 выполнен на бодяково-пырейно-тростниковом лугу с господством *Cirsium arvense*, *Elytrigia repens* и *Phragmites australis*, всего выявлено 13 видов трав (табл. 2). Тростник в этом сообществе показывает наличие на глубине постоянно водоносного горизонта, но не свидетельствует о заболачивании верхних горизонтов почвы: почти все

остальные виды являются мезофитами, лапчатка гусиная *Potentilla anserina* и дудник болотный *Angelica palustris* – гигромезофиты, причем солевыносливые, обычные в том числе и в условиях несильного засоления почв.

Все произрастающие в районе почвенных разрезов виды характерны для почв с высокой степенью насыщенности почвенно-поглощающего комплекса основаниями, но галофиты (гликогалофиты) отсутствуют, лишь *Atriplex prostrata*, встречающаяся здесь в виде единичных особей, может быть отнесена к гликогалофитам. Растительное сообщество у разреза 2 образовано видами более требовательными к высокому содержанию доступного азота в почве по сравнению с фитоценозом у разреза 1.

Вокруг колодца, расположенного в 4-5 м от обоих проанализированных почвенных разрезов, больше солеустойчивых растений. Из них в число содоминантов входят *Festuca ovina* и *Potentilla anserina*, присутствуют *Angelica palustris* и гликогалофиты – лебеда простертая *Atriplex prostrata* и триостренник морской *Triglochin maritima*.

В понижениях с эфемерными озерцами присутствуют только виды, выдерживающие повышение минерализации почвенных вод (фото). Господствуют солеустойчивые гликофиты – доминант *Potentilla anserina* и обильный *Elytrigia repens*. Высоко обилие гликогалофитов – *Atriplex prostrata* (15% проективного покрытия), *Triglochin maritima* (10%) и *Juncus gerardii* (3%), *Scirpus tabernaemontani* (2%).



Фото. Триостренник морской (*Triglochin maritima*) на эфемерном озерце (слева) и камыш Табернемонтана (*Scirpus tabernaemontani*) среди сплошного покрова лапчатки гусиной (*Potentilla anserine*) на эфемерном озерце (справа), на заднем плане – сообщество с доминированием вейника (*Calamagrostis epigeios*) на склоне понижения (фото Ю.В. Симоновой). **Photo.** *Triglochin maritima* at an ephemeral pond (left) and *Scirpus tabernaemontani* among a continuous layer of *Potentilla anserina* on an ephemeral pond (right), with is a community dominated by *Calamagrostis epigeios* on a depression slope in the back (photo by Yu.V. Simonova).

Преобладание в составе растительности участка гликофитов, несмотря на засоление почвы, может быть связано с пониженным содержанием токсичных солей в основном корнеобитаемом горизонте в мае, когда идет пик нарастания фитомассы большинства видов, из-за частичного промывания во время снеготаяния в условиях гумидного климата. Возможно, у солеустойчивых гликофитов и у гликогалофитов корневые системы проникают глубже, чем у остальных растений этих же сообществ, но решение этого вопроса требует специальных трудоемких исследований. Динамика интенсивности физиологических процессов растений в летние месяцы после сильных дождей, когда должно происходить сначала вымывание Cl^- и Na^+ из верхнего слоя почвы, а потом их возвращение, также нуждается в исследовании, которое может пролить свет на устойчивость фитоценозов к небольшому засолению.

Проблемы оценки влияния изменений климата на средневременную эволюцию засоленных почв. Гидрохимический режим соленых источников и солевой режим почв, подверженных влиянию выходов таких источников, являются индикаторами меняющихся условий среды. Поэтому такие объекты могут служить полигонами экологического и почвенно-климатического мониторинга.

Начиная с 1970-х гг., в большинстве регионов России наметился устойчивый тренд потепления климата, превышающий в несколько раз скорость изменения климата по миру в целом (Национальный …, 2018; IPCC …, 2019). Одним из важнейших последствий глобального потепления является изменение гидрологического режима и структуры гидрологического цикла (Milly et al., 2005; Kafri, Yechieli, 2010). Эти изменения касаются увеличения частоты обильных осадков, изменения водности рек, уровня ГВ и влажности почвы, что, в свою очередь, способно существенно воздействовать на характеристики поверхностного стока, стока рек и инфильтрации в почву (Osborn et al., 2000; Koutsoyiannis, 2003; Nohara et al., 2006; Oki, Kanae, 2006; Zhan et al., 2014).

На фоне глобального изменения климата состояние и эволюция засоленных почв остаются неясными. Наиболее вероятными сценариями являются прямое засоление почв в аридных и семиаридных регионах и вторичное – в гумидных и семигумидных. Однако в общие сценарии развития процессов засоления свои поправки вносят конкретные особенности местности, корректируя направление глобальных почвенно-климатических тенденций как в сторону смягчения, так и усиления (Li et al., 2014).

В юго-восточной полупустынной части Европейской России за последние 40 лет наблюдалась тенденция к увеличению увлажнения и подъему уровня ГВ, на фоне которых был выявлен ряд изменений в солонцах Джаныбекского стационара (Lebedeva et al., 2018). При изучении почв на микроуровне были отмечены активизация гумусонакопления и биогенного структурообразования, развитие процессов осолодения и оглеения. Повышение уровня ГВ привело к повышению верхней границы карбонато- и гипсонакопления.

На равнинах юга Западной Сибири были установлены самые различные сочетания климатических условий, отличающиеся от среднемноголетних, и сопровождающиеся изменением водно-солевого режима почв (Елизарова и др., 2005). Во влажные годы увеличение степени увлажнения почв в северной лесостепи в депрессиях вызывало усиление заболачивания, распространение площадей озер и болот, рассоление и осолодение почв. В южной лесостепи многоводные периоды проявлялись в уменьшении доли остепненных злаков в составе растительного покрова и появлении отчетливых морфологических признаков рассоления и осолонцевания почв. В сухие периоды понижался уровень ГВ, однако на участках с засоленными почвами наблюдалось накопление солей в верхних горизонтах.

Ретроспективный мониторинг за последние 40 лет на фоне установленной аридизации климата (повышение средней годовой температуры и уменьшение количества осадков)

Зауральских степей выявил повышение щелочности и минерализации ГВ, усиление процесса засоления и осолонцевания почв. При этом в зависимости от положения уровня ГВ и гидрологического режима в ряде почв засоление усиливалось вследствие активного испарения ГВ, в других, наоборот, происходили процессы рассоления (Suleymanov et al., 2022).

За последние 50-60 лет в районах распространения засоленных почв котловин юга Восточной Сибири констатирован рост аридизации с переходом в более аридную категорию, однако этот процесс не повсеместен и разнонаправлен в разных котловинах (Черноусенко, Хитров, 2019). В гидроморфных условиях котловин юга Восточной Сибири, так же, как и в Монголии, аридизация климата неизбежно приводит к активизации процесса соленакопления.

На территории обширных равнинных территорий (Казахстан, юг Европейской России и др.) аридизация климата может привести к снижению уровня ГВ и, как следствие, к снижению площадей засоленных почв (Панкова, Черноусенко, 2020).

В отношении приморских засоленных почв северных побережий России можно предположить перераспределение засоления по глубине, изменение степени и химизма засоления вследствие деградации мерзлых засоленных пород и вымывания подвижных солей в термокарстовые понижения и озера (Черноусенко, 2025).

Исследования на территории степной Венгрии показали, что в результате уменьшения количества осадков, особенно начиная с 1980-х годов, уровень ГВ уже значительно снизился, и на равнинах между реками Дунай и Тиса, произошли кардинальные изменения в почвенном покрове. Наиболее важными изменениями было снижение общего содержания солей, уменьшение доли обменного натрия и замещение его кальцием. Уменьшение засоления сопровождалось изменением видового состава растительности, увеличением проективного покрытия и значительным ростом содержания гумуса (Rakonczai et al., 2008).

Другим потенциальным последствием глобального потепления может стать затопление дельт и долин рек в результате повышения уровня моря, а также расширение площадей засоления в районах, находящихся под прямым воздействием затопления морской водой или в зоне влияния интрузий (Várallyay, 1994; Status …, 2015). Прирост площадей засоленных почв уже фиксируется в прибрежных районах Бангладеша (Dasgupta et al., 2015).

На сегодняшний день все еще остается много неопределенностей глобального плана, касающихся направления, степени климатических изменений и их реализации на региональном уровне, поэтому для прогноза экологических последствий требуется проведение исследований на конкретных территориях.

Тенденции изменения климата в бассейне Верхней Волги. В бассейне Верхней Волги признаки интенсификации гидрологического цикла в последние десятилетия стали отмечаться в виде сдвигов в ледовом режиме рек и озер, роста количества осадков на зеркало водоемов, колебаний уровня воды в реках и озерах. Все это отразилось на изменении гидрологических характеристик водоемов, показателей развития фито- и зоопланктона, макрофитных сообществ (Лазарева, Соколова, 2013; Литвинов, Законнова, 2014; Законнова, Литвинов, 2016; Babanazarova et al., 2018). Изменения температуры, а также связанные с ними гидрологические изменения провоцируют трансформацию не только структуры водных сообществ и экосистем, но и современного растительного и почвенного покрова водосборов (Кузьмина, Трешкин, 2017). Преобладающей тенденцией в многолетнем распределении средних температур воздуха бассейна Верхней Волги является стабильное повышение среднегодовых значений температуры. В сезонном аспекте основная его доля пришлась на зиму и весну, что привело к повышению температуры воды водоемов и их более раннему очищению ото льда. В многолетнем изменении суммарных атмосферных осадков основная тенденция связана с их увеличением в целом за год, преимущественно за

счет повышения их выпадения в холодное полугодие – зимой и осенью (Литвинов, Законнова, 2014).

Одной из региональных проблем последних десятилетий, вызванных глобальными климатическими изменениями, является трансформация стока Верхней Волги. Климатические изменения привели к росту объема годового стока, в том числе летне-осеннего и зимнего меженного стока (Жуков, Айбулатов, 2024). Отмечен значительный рост повторяемости и интенсивности оттепелей, уменьшение глубины промерзания почвы и увеличение объема инфильтрации и подземного стока (Горбаренко и др., 2021).

Анализ многолетних данных по метеостанции Ростов выявил рост средней годовой температуры воздуха на 1.2°C относительно климатической нормы 1961-1990 гг. Зимы стали теплее, на 10 дней увеличилось количество оттепелей, и абсолютный минимум температуры составил –35°C вместо –40°C. Продолжительность вегетационного периода (с температурой больше 10°C) увеличилась на неделю, сумма активных температур выросла более чем на 150°C. Годовая сумма атмосферных осадков увеличилась почти на 20% от нормы (Simonova et al., 2021).

Оценка многолетнего тренда засоления почв участка по результатам ретроспективного мониторинга. Чтобы понять, отразились ли изменения климата, установленные для бассейна Верхней Волги, на состоянии почв очагового характера засоления нами был проведен ретроспективный мониторинг.

Вываривание соли на участке прекратилось несколько веков назад, после чего он не подвергался серьезным антропогенным воздействиям, поэтому можно предположить, что изменение солевого режима почвы за последние несколько десятилетий является результатом изменения гидротермического режима, имеющего климатогенные причины. Так, например, увеличение средних годовых температур на фоне интенсификации гидрологического цикла и увеличения объема подземного стока по отношению к переувлажненным почвам понижений бассейна Верхней Волги могло бы усилить проявление гидроморфизма и накопление тех веществ, которые поступают в почву с ГВ – в нашем случае легкорастворимых солей, карбонатов и гипса.

Сущность ретроспективного мониторинга заключалась в определении многолетнего тренда засоления почв участка, для чего нами сравнивались почвы периода наблюдений 2016-2019 годов (современный период отбора) с их аналогами, изученными в июле 1988 года и сентябре 1990 года (ранний период отбора).

Профильный анализ катионно-анионного состава почв раннего периода отбора (рис. 8) показал, что форма солевых профилей в обоих случаях соответствует закономерностям годовой динамики, выявленным для современного периода отбора. Солевой профиль почвы 1988 года (рис. 8а) имеет вид, присущий летнему сезону интенсивного испарения, – равномерный с максимумом в верхнем горизонте. Солевой профиль почвы 1990 года (рис. 8б) имеет вид равномерного распределения с максимумом в средней части, типичный для осенних сезонов современного этапа мониторинга 2016-2019 гг.

Сравнение почв раннего и современного периодов отбора по среднему содержанию солей указывает на тенденцию увеличения засоления, как по показателю $S_{сол}$, так и по $S_{токс}$. В любой из сезонов современного этапа мониторинга содержание солей оказывалось выше, чем было ранее (рис. 9).

Однако доверительные интервалы средних значений $S_{сол}$ и $S_{токс}$, учитывающие межсезонное и внутрипрофильное варьирование, почв современного и раннего обследования перекрываются: по $S_{сол}$ только для почвы, изученной в 1990 г., по $S_{токс}$ – в оба периода раннего обследования.

С целью подтверждения этой тенденции нами был выполнен статистический анализ, предусматривающий оценку различий между $S_{сол}$ и $S_{токс}$ почв раннего периода отбора и

почвами соответствующего сезона современного периода отбора. Однофакторный дисперсионный анализ с поправкой Уэлча на неоднородность дисперсий показал, что различия между $S_{сол}$ и $S_{токс}$ почвы, изученной в июле 1988 г., и почвы летнего периода отбора современного этапа мониторинга значимы ($p < 0.05$). В то же время для почвы, изученной в сентябре 1990 г., и почвы осеннего периода отбора современного мониторинга различия оказались незначимыми. Таким образом, говорить о статистически достоверном увеличении засоления за 30 лет, прошедших между наблюдениями, нельзя.

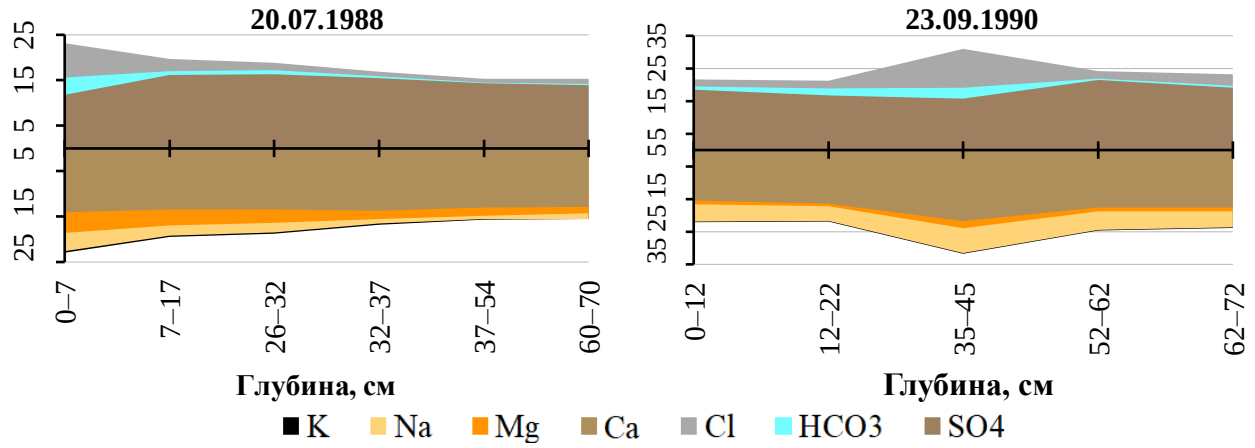

Рис. 8. Катионно-анионный (смоль(+/−)/кг) состав почв участка отбора в 20.07.1988 (а) и 23.09.1990 (б). **Fig. 8.** Cationic-anionic ($cmol_c \cdot kg^{-1}$) composition of soils in the sampling area on 20/07/1988 (a) and 23/09/1990 (b).

Параллельно с данными анализа водных вытяжек сравнивались результаты содержания гипса и карбонатов (рис. 10).

Среднее содержание гипса в почве, обследованной в июле 1988 г., существенно ниже, чем в любой из сезонов современного мониторинга, а среднее содержание карбонатов, наоборот, превышает таковое в современных почвах. Величины содержания карбонатов и гипса в почве, обследованной в сентябре 1990 г., меньше, чем в любой из сезонов современного мониторинга, однако близки к аналогичному (осеннему) сезону (рис. 10).

Дисперсионный анализ с поправкой Уэлча показал, что по содержанию гипса почва, обследованная в июле 1988 г., достоверно отличается от почвы летнего сезона современного мониторинга ($p < 0.05$), тогда как между почвой, обследованной в сентябре 1990 г., и почвой осеннего сезона современного мониторинга значимых различий установлено не было. При сравнении содержания карбонатов соответствующих сезонов раннего и современного мониторинга различия были оценены как незначимые. Таким образом, на вопрос о многолетнем тренде засоления почв участка нельзя ответить однозначно. В отличие от других изученных нами почв I-II террасы оз. Иеро (Simonova et al., 2021) диффузных областей засоления солевой баланс почв в очаге разгрузки подземных минерализованных вод не стоит рассматривать как величину убывающую.

На фоне высокой изменчивости солевого профиля в годовом цикле по результатам ретроспективного мониторинга очевидно, что тенденция рассоления ландшафта не выражена. Это было уже выявлено нами по итогам первого года сезонных наблюдений почв участка (Симонова и др., 2018; Simonova et al., 2020) и подтвердилось по результатам трехлетнего мониторинга. По сравнению с почвами, изученными более 30 лет назад, засоление здесь либо усилило свое значение, либо сохранилось на прежнем уровне. На уровне тенденции можно выделить усиление значимости гипсонакопления.

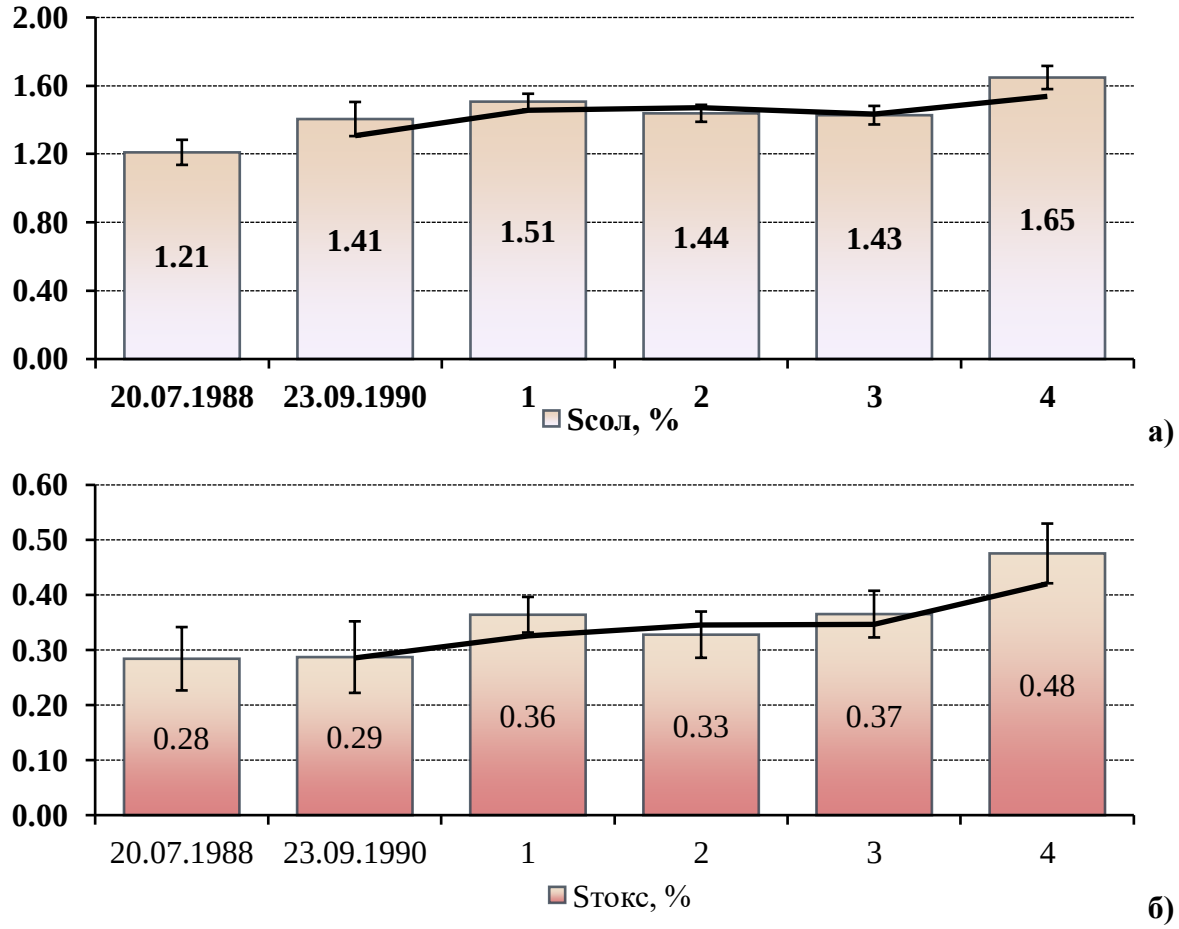

Рис. 9. Содержание $S_{сол}$ (а) и $S_{токс}$ (б) в почвах раннего периода отбора в сравнении с почвами современного мониторинга 2016-2019 гг. **Fig. 9.** Total sum of salts (a) and sum of toxic salts (b) in soils from the early sampling period compared to soils from modern monitoring in 2016-2019.

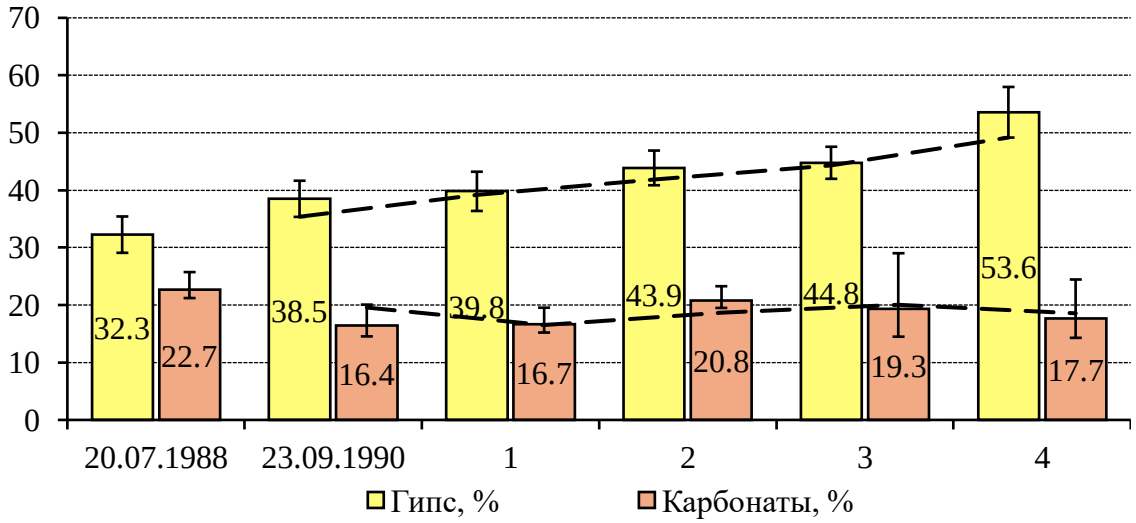

Рис. 10. Содержание гипса и карбонатов в почвах раннего периода отбора в сравнении с почвами современного периода отбора 2016-2019 гг. **Fig. 10.** Gypsum and carbonate contents in soils from the early sampling period compared to the modern sampling period of 2016-2019.

За прошедшие 30 с небольшим лет видовой состав растительных сообществ вблизи Варницкого колодца изменился несущественно. Перечень видов растений, произрастающих на участке, с которым сравнивались данные современного геоботанического обследования (2020 г.), был составлен в 1988 г. Участие солеустойчивых гликофитов и гликогалофитов осталось небольшим, но не случайным. Разнообразие солеустойчивых гликофитов и гликогалофитов сохранилось на том же уровне (было 17 видов, стало 16). Основные фитоценотические изменения касаются состава сорных и луговых видов в этих сообществах, что обусловлено изменениями в типе и интенсивности использования территории, рекреационной нагрузки около объекта паломничества и взаимодействиями между растениями.

Выводы

1. Генезис засоленных гажевых почв гумидных ландшафтов котловины оз. Неро тесно связан с близким залеганием высокоминерализованных (11.8 г/л) ГВ хлоридного натриевого состава с высокой долей сульфатов и кальция. В почвах заметно выражена тенденция относительного накопления SO_4^{2-} и Ca^{2+}, карбонатов и гипса. Подвижные Cl^- и Na^+, вымываясь из почвенного профиля, оказываются в сопряженных водотоках.
2. Почвы, формирующиеся в местах очаговой разгрузки минерализованных вод, имеют ограниченные ареалы, но азональные процессы в почвообразовании у них выходят на первый план. В нашем случае доминирующую роль играют процессы засоления, карбонато- и гипсонакопления. Такие места могут служить примером максимального проявления, характера и направленности природного засоления в гумидной зоне умеренного типа климата.
3. Особенностями солевого режима гидроморфных гажевых почв в гумидном климате является высокая изменчивость содержания не только легкорастворимых солей, но и гипса, и карбонатов. Солевой режим таких почв чувствительно реагирует на изменение соотношения процессов стока и испарения по сезонам года и относится к сезонно-обратимому типу. Значимость процессов засоления усиливается и ослабляется в зависимости от фазы водности в период наблюдений.
4. В растительности участка, несмотря на засоление почв, господствуют виды-гликофиты, что, по-видимому, связано с меньшим уровнем засоления в поверхностных горизонтах и периодическим промыванием почв от солей в сезоны максимального набора фитомассы. Солеустойчивые гликофиты и гликогалофиты в обилии представлены на участке лишь в местах выхода на поверхность минерализованных грунтовых вод (эфемерные озерки).
5. Амплитуда сезонных колебаний содержания солей в современный период мониторинга 2016-2019 гг. оказалась сравнима с разницей в 30-летнем интервале. Тренд в отношении рассоления почв участка не выявлен. Засоление почв участка либо усилилось, либо сохранилось на прежнем уровне. На уровне тенденции отмечается усиление процесса гидрогенного накопления гипса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аринушкина Е.В.* 1970. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ. 488 с.
2. *Бернштейн Б.Л.* 1903. Описание главнейших почвенных типов Мышкинского, Угличского,

REFERENCES

1. Arinushkina EV. Handbook of chemical soil analysis [*Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv*]. Moscow: Izd-vo MGU, 1970:488.
2. Bernstein BL. Description of the principal soil types in the Myshkin, Uglich, Mologa, and

Моложского, Ярославского и огородного района Ростовского уездов Ярославской губернии Ярославль: Типография Э.Г. Фальк. 28 с.
3. *Валяшко М.Г.* 1962. Закономерности формирования месторождений солей М.: Изд-во МГУ. 398 с.
4. *Вяль Ю.А., Новикова Л.А., Карпова Г.А., Лойко С.В.* 2013. Особенности генезиса гипсоносных луговых почв в условиях Пензенской области // Нива Поволжья. Т. 2. № 27. С. 21-27.
5. *Воробьева Л.А.* 1998. Химический анализ почв. М.: Изд-во МГУ. 272 с.
6. География почв и почвенное районирование центрального экономического района СССР. 1972 / Ред. Г.В. Добровольский, И.С. Урусевская. М.: Изд-во МГУ. 469 с.
7. Геологическая карта дочетвертичных отложений. 2016. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Центрально-Европейская. Лист O-37 (Ярославль). СПб.: ФГУП «ВСЕГЕИ». 1 л.
8. *Гольдфарб И.Л.* 1996. Влияние гидротермальной деятельности на условия формирования и морфологический облик почв (на примере основных гидротермальных систем Камчатки) // Почвоведение. № 12. С. 1413-1419.
9. *Горбаренко А.В., Варенцова Н.А., Киреева М.Б.* 2021. Трансформация стока весеннего половодья и паводков в бассейне Верхней Волги под влиянием климатических изменений // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. № 4. С. 6-28.
10. *Елизарова Т.Н., Дитц Л.Ю., Лопатовская О.Г.* 2005. Особенности мониторинга природных и антропогенных почвенных процессов на юге Сибири // Интерэкспо Гео-Сибирь. Т. 5. С. 101-105.
11. *Жуков И.А., Айбулатов Д.Н.* 2024.

Yaroslavl districts, and the market-gardening area of the Rostov District, Yaroslavl Province [*Opisaniye glavneyshikh pochvennykh tipov Myshkinskogo, Uglichskogo, Molozhskogo, Yaroslavskogo i ogorodnogo rayona Rostovskogo uyezdov Yaroslavskoy gubernii*]. Yaroslavl: Tipografiya E.G. Fal'k, 1903:28.
3. Valyashko MG. Patterns of salt deposit formation [*Zakonomernosti formirovaniya mestorozhdeniy soley*]. Moscow: Izd-vo MGU, 1962:398.
4. Vyal YuA, Novikova LA, Karpova GA, Loyko SV. Specifics of the genesis of gypsum-bearing meadow soils in the Penza Region [Osobennosti genezisa gipsonosnykh lugovykh pochv v usloviyakh Penzenskoy oblasti]. *Niva Povolzhya*. 2013;2 (27):21-27.
5. Vorobyeva LA. Chemical soil analysis [*Khimicheskiy analiz pochv*]. Moscow: Izd-vo MGU, 1998:272.
6. Soil geography and soil zoning of the Central Economic Region of the USSR [*Geografiya pochv i pochvennoye rayonirovaniye tsentral'nogo ekonomicheskogo rayona SSSR*] / eds. G.V. Dobrovolsky, I.S. Urusevskaya. Moscow: Izd-vo MGU, 1972:469.
7. Geological map of Pre-Quaternary deposits, Scale 1:1,000,000 (3rd generation) [*Geologicheskaya karta dochetvertichnykh otlozheniy*] *Central European Series [Seriya Tsentral'no-Yevropeyskaya] Sheet O-37 (Yaroslavl) [List O-37 (Yaroslavl')].* Saint-Petersburg: FGUP "VSEGEI", 2016:1.
8. Goldfarb IL. The influence of hydrothermal activity on the conditions of soil formation and the morphological appearance of soils (as exemplified by major hydrothermal systems in Kamchatka) [Vliyaniye gidrotermal'noy deyatel'nosti na usloviya formirovaniya i morfologicheskiy oblik pochv (na primere osnovnykh gidrotermal'nykh sistem Kamchatki)]. *Eurasian Soil Science [Pochvovedenie]*. 1996;12:1413-1419.
9. Gorbarenko AV, Varentsova NA, Kireeva MB. Transformation of spring flood and freshet runoff in the Upper Volga basin under the influence of climate change [Transformatsiya stoka vesennego polovod'ya i pavodkov v basseyne Verkhney

Тенденции изменения характеристик водного стока малых рек в бассейне Волги // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. № 6. С. 22-37.

12. *Законнова А.В., Литвинов А.С.* 2016. Многолетние изменения гидроклиматического режима Рыбинского водохранилища // Труды Института биологии внутренних вод РАН. № 75 (78). С. 16-28.
13. Засоленные почвы России. 2006 / Ред. Л.Л. Шишова, Е.И. Панкова. М.: ИКЦ «Академкнига». 853 с.
14. Карта четвертичных образований. 2015. Масштаб: 1:1000000. Серия: Центрально-Европейская. СПб.: ФГБУ «ВСЕГЕИ». 1 л.
15. Классификация и диагностика почв России. 2004. Смоленск: Ойкумена. 342 с.
16. Классификация и диагностика почв СССР. 1977. М.: Наука. 224 с.
17. *Кравченко Е.И., Ямнова И.А., Лебедева М.П., Голованов Д.Л., Чурилин Н.А., Мушникова Н.А., Мусаэлян Р.Э., Кушербаев С.А., Леднёв С.А., Аманжолов А.И.* 2026. Сравнительная характеристика морфотипов гипса в орошаемой и неорошаемой светлогумусовых гипсоносных почвах и методические аспекты их изучения // Почвоведение. № 1. С. 130-150.
18. *Ковда В.А.* 1946. Происхождение и режим засоленных почв. Т. 1. М.-Л.: Изд-во АН СССР. 575 с.
19. *Крайнов С.Р., Швец В.М.* 1992. Гидрогеохимия: учебник для вузов. М.: Недра. 463 с.
20. *Кузьмина Ж.В., Трешкин С.Е.* 2017. Многолетние изменения основных метеорологических характеристик в зоне южной тайги европейской части России (бассейн Верхней Волги) // Использование и охрана природных ресурсов в России. № 3. С. 56-65.
21. *Лазарева В.И., Соколова Е.А.* 2013. Динамика и фенология зоопланктона

Volgi pod vliyaniyem klimaticheskikh izmeneniy]. *Water Management of Russia: Problems, Technologies, Management [Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye]*. 2021;4:6-28.

10. Elizarova TN, Ditts LYu, Lopatovskaya OG. Specifics of monitoring natural and anthropogenic soil processes in southern Siberia [Osobennosti monitoringa prirodnykh i antropogennykh pochvennykh protsessov na yuge Sibiri]. *Interexpo Geo-Siberia [Interekspo Geo-Sibir']*. 2005;5:101-105.
11. Zhukov IA, Aybulatov DN. Trends in the variation of water runoff characteristics for small rivers in the Volga basin [Tendentsii izmeneniya kharakteristik vodnogo stoka malykh rek v basseyne Volgi]. *Water Management of Russia: Problems, Technologies, Management [Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye]*. 2024;6:22-37.
12. Zakonnova AV, Litvinov AS. Long-term changes in the hydroclimatic regime of the Rybinsk Reservoir [Mnogoletniye izmeneniya gidroklimaticheskogo rezhima Rybinskogo vodokhranilishcha]. *Proc. of the Institute for Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences [Trudy Instituta biologii vnutrennikh vod RAN]*. 2016;75 (78):16-28.
13. Saline soils of Russia [*Zasolennyye pochvy Rossii*] / eds. L.L. Shishov, E.I. Pankova. Moscow: IKTS "Akademkniga", 2006:853.
14. Map of Quaternary formations, Scale: 1:1,000,000 [*Karta chetvertichnykh obrazovaniy*] *Series: Central European [Seriya: Tsentral'no-Yevropeyskaya]*. Saint-Petersburg: FGBU "VSEGEI", 2015:1.
15. Classification and diagnostics of soils of Russia [*Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii*]. Smolensk: Oykumena, 2004:342.
16. Classification and diagnostics of soils of the USSR [*Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR*]. Moscow: Nauka, 1977:224.
17. Kravchenko EI, Yamnova IA, Lebedeva MP, Golovanov DL, Churilin NA, Mushnikova NA, Musaelyan RE, Kusherbayev SA, Lednev SA, Amanzholov AI. Comparative characteristics of gypsum morphotypes in irrigated and non-

крупного равнинного водохранилища: отклик на изменение климата // Успехи современной биологии. Т. 133. № 6. С. 564-574.

22. *Леостарин А.В., Ефимова А.А., Конечная Г.Ю.* 2017. Болото Сольцы как пример уникального низинного комплекса в Костромской области // VIII Галкинские Чтения: материалы конференции. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С. 62-65.
23. *Литвинов А.С., Законнова А.В.* 2014. Экологические условия в Рыбинском водохранилище при потеплении климата // Географический вестник. Т. 2. № 29. С. 41-45.
24. *Литвинов А.С.* 2017. Экологические условия в озере Неро в XXI веке // Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения. С. 374-378.
25. *Лопатовская О.Г.* 2018. Засоленные почвы Приольхонья и острова Ольхон: монография. Иркутск: Изд-во ИГУ. 205 с.
26. *Лопатовская О.Г., Тахтеев В.В., Лазарева С.Д., Зарубина О.В., Николаева О.Г.* 2011. Олхинские минеральные источники: химия воды и засоление почв // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Биология. Экология». Т. 4. № 1. С. 81-86.
27. *Маевский П.Ф.* 2014. Флора средней полосы европейской части России. 11-е изд. М.: Тов-во научных изданий КМК. 635 с.
28. *Минашина Н.Г., Шишов Л.Л.* 2002. Гипсоносные почвы: распространение, генезис, классификация // Почвоведение. № 3. С. 273-281.
29. Национальный доклад «Глобальный климат и почвенный покров России: оценка рисков и эколого-экономических последствий деградации земель. Адаптивные системы и технологии рационального природопользования

irrigated light-humus gypseous soils, and methodological aspects of their study [Sravnitel'naya kharakteristika morfotipov gipsa v oroshayemoy i neoroshayemoy svetlogumusovykh gipsonosnykh pochvakh i metodicheskiye aspekty ikh izucheniya]. *Eurasian Soil Science [Pochvovedenie]*. 2026;1:130-150.

18. Kovda VA. Origin and regime of saline soils [*Proiskhozhdeniye i rezhim zasolennykh pochv*]. Moscow-Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1946;1:575.
19. Krainov SR, Shvets VM. Hydrogeochemistry: a textbook for higher education institutions [*Gidrogeokhimiya: uchebnik dlya vuzov*]. Moscow: Nedra, 1992:463.
20. Kuzmina ZhV, Treshkin SE. Long-term changes in key meteorological characteristics in the southern taiga zone of the European part of Russia (Upper Volga basin) [Mnogoletniye izmeneniya osnovnykh meteorologicheskikh kharakteristik v zone yuzhnoy taygi yevropeyskoy chasti Rossii (basseyn Verkhney Volgi)]. *Use and Protection of Natural Resources in Russia [Ispol'zovaniye i okhrana prirodnykh resursov v Rossii]*. 2017;3:56-65.
21. Lazareva VI, Sokolova EA. Dynamics and phenology of zooplankton in a large lowland reservoir: response to climate change [Dinamika i fenologiya zooplanktona krupnogo ravninnogo vodokhranilishcha: otklik na izmeneniye klimata]. *Advances in Modern Biology [Uspekhi sovremennoi biologii]*. 2013;133 (6):564-574.
22. Leostrin AV, Efimova AA, Konechnaya GYu. The Soltsy mire as an example of a unique low-lying wetland complex in the Kostroma Region [*Boloto Sol'tsy kak primer unikal'nogo nizinnogo kompleksa v Kostromskoy oblasti*] *VIII Galkin's readings: conference proc. [VIII Galkinskiye Chteniya: materialy konferentsii]*. Saint-Petersburg: Izd-vo SPbGETU "LETI", 2017:62-65.
23. Litvinov AS, Zakonnova AV. Ecological conditions in the Rybinsk Reservoir under climate warming [Ekologicheskiye usloviya v Rybinskom vodokhranilishche pri poteplenii

(сельское и лесное хозяйство)». 2018 / Ред. А.И. Бедрицкий. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, ГЕОС. 357 с.

30. *Панкова Е.И., Айдаров И.П., Ямнова И.А., Новикова А.Ф., Благоволин Н.С.* 1996. Природное и антропогенное засоление почв бассейна Аральского моря (география, генезис, эволюция). М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева. 187 с.
31. *Панкова Е.И., Черноусенко Г.И.* 2020. Проблема активизации засоления в почвах юга Восточной Сибири и Монголии в связи с аридизацией климата // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. Вып. 101. С. 19-45.
32. *Парамонова А.Е., Убугунова В.И., Черноусенко Г.И., Убугунов В.Л., Балданов Б.Ц., Цыремпилов Э.Г.* 2017. Засоленные почвы поймы среднего течения реки Иркут: морфогенетические и агрохимические свойства // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. № 2. С. 30-38.
33. *Пахоруков И.В., Еремченко О.З.* 2021. Свойства вторично засоленных аллювиальных почв в таежно-лесной зоне Прикамья // Сибирский лесной журнал. № 3. С. 76-86.
34. Полевой определитель почв России. 2008. М.: Почвенный институт им. В. В. Докучаева. 182 с.
35. Почвенно-мелиоративная карта Нечерноземной зоны РСФСР (за исключением горной части Урала и Зауралья). Масштаб: 1:1500000. 1980. Министерство геологии РСФСР. 1 л.
36. *Растворова О.Г., Андреев Д.П., Гагарина Э.И., Касаткина Г.А., Федорова Н.Н.* 1995. Химический анализ почв. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета. 262 с.
37. *Резников А.А., Муликовская Е.П.,* klimata]. *Geographical Bulletin [Geograficheskiy vestnik]*. 2014;2 (29):41-45.
24. Litvinov AS. Ecological conditions in Lake Nero in the 21st century [Ekologicheskiye usloviya v ozere Nero v XXI veke]. *Water Resources: New Challenges and Solutions [Vodnyye resursy: novyye vyzovy i puti resheniya]*. 2017;374-378.
25. Lopatovskaya OG. Saline soils of the Olkhon region (Priolkhonye) and Olkhon Island: a monograph [*Zasolennyye pochvy Priol'khon'ya i ostrova Ol'khon: monografiya*]. Irkutsk: Izd-vo IGU, 2018:205.
26. Lopatovskaya OG, Takhteev VV, Lazareva SD, Zarubina OV, Nikolaeva OG. The Olkha mineral springs: water chemistry and soil salinization [Olkhinskiye mineral'nyye istochniki: khimiya vody i zasoleniye pochv]. *Bulletin of Irkutsk State University [Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta] Series "Biology. Ecology" [Seriya "Biologiya. Ekologiya"]*. 2011;4 (1):81-86.
27. Maevsky PF. Flora of the Central Region of the European part of Russia, 11th ed. [*Flora sredney polosy yevropeyskoy chasti Rossii*]. Moscow: Tov-vo nauchnykh izdaniy KMK, 2014:635.
28. Minashina NG, Shishov LL. Gypsum-bearing soils: distribution, genesis, and classification [Gipsonosnyye pochvy: rasprostraneniye, genezis, klassifikatsiya]. *Eurasian Soil Science [Pochvovedenie]*. 2002;3:273-281.
29. National report "Global climate and the soil cover of Russia: assessment of risks and ecological-economic consequences of land degradation. Adaptive systems and technologies for rational natural resource management (agriculture and forestry)" [*Natsional'nyy doklad "Global'nyy klimat i pochvennyy pokrov Rossii: otsenka riskov i ekologo-ekonomicheskikh posledstviy degradatsii zemel'. Adaptivnyye sistemy i tekhnologii ratsional'nogo prirodopol'zovaniya (sel'skoye i lesnoye khozyaystvo)"*] / ed. A.I. Bedritsky. Moscow: Pochvennyy institut im. V.V. Dokuchayeva, GEOS, 2018:357.
30. Pankova EI, Aidarov IP, Yamnova IA, Novikova AF, Blagovolin NS. Natural and anthropogenic soil salinization in the Aral

Соколов И.Ю. 1970. Методы анализа природных вод. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Недра. 488 с.

38. *Симонова Ю.В., Русаков А.В., Рюмин А.Г.* 2018. Засоленные почвы Ростовской низины (Ярославская область): морфология, генезис и динамика засоления в годовом гидрологическом цикле // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. Вып. 93. С. 40-74.
39. *Симонова Ю.В., Русаков А.В.,* Лемешко Н.А. 2022. Засоленные почвы Ростовской низины (Ярославское Поволжье): современное состояние, гидрологические аспекты засоления и эволюционные тренды на фоне климатических изменений // Труды Карельского научного центра РАН. № 8. С. 31-49.
40. *Солнцева Н.П.* 1998. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. М.: Изд-во МГУ. 376 с.
41. *Солнцева Н.П., Садов А.П.* 2000. Техногенный галогенез в почвах лесотундровых и северотаежных ландшафтов Западной Сибири // Почвоведение. № 9. С. 1127-1141.
42. Состояние экосистемы озера Неро в начале XXI века. 2008 / Ред. В.И. Лазарева. М.: Наука. 406 с.
43. Топографическая карта Генштаба. Масштаб 1:100000. 1988. Лист O-37-103, Ростов Великий [Электронный ресурс https://varvar.ru/top/o-37/o-37-103.html (дата обращения 15.05.2026)].
44. *Убугунов В.Л., Убугунова В.И., Чижикова Н.П., Варламов Е.Б., Хитров Н.Б., Жамбалова А.Д.* 2017. Солонцы зон тектонических разломов севера Баргузинской котловины (Бурятия, Россия) // Природа Внутренней Азии. № 2. С. 38-48.
45. *Убугунов В.Л., Убугунова В.И., Жамбалова А.Д.* 2020. Эндогенные факторы формирования и

Sea basin (geography, genesis, evolution) [*Prirodnoye i antropogennoye zasoleniye pochv basseyna Aral'skogo morya (geografiya, genezis, evolyutsiya)*]. Moscow: Pochvennyy institut im. V.V. Dokuchayeva, 1996:187.

31. Pankova EI, Chernousenko GI. The problem of intensifying soil salinization in Southern Eastern Siberia and Mongolia under climate aridization [Problema aktivizatsii zasoleniya v pochvakh yuga Vostochnoy Sibiri i Mongolii v svyazi s aridizatsiyey klimata]. *Bulletin of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute [Byulleten' Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchayeva]*. 2020;101:19-45.
32. Paramonova AE, Ubugunova VI, Chernousenko GI, Ubugunov VL, Baldanov BTs, Tsyrempilov EG. Saline soils in the floodplain of the middle reaches of the Irkut River: morphogenetic and agrochemical properties [Zasolennyye pochvy poymy srednego techeniya reki Irkut: morfogeneticheskiye i agrokhimicheskiye svoystva]. *Bulletin of the V.R. Filippov Buryat State Agricultural Academy [Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii im. V.R. Filippova]*. 2017;2:30-38.
33. Pakhorukov IV, Eremchenko OZ. Properties of secondarily salinized alluvial soils in the Taiga-Forest Zone of the Kama Region (Prikamye) [Svoystva vtorichno zasolennykh allyuvial'nykh pochv v tayezhno-lesnoy zone Prikam'ya]. *Siberian Journal of Forest Science [Sibirskiy lesnoy zhurnal]*. 2021;3:76-86.
34. Field guide to the soils of Russia [*Polevoy opredelitel' pochv Rossii*]. Moscow: Pochvennyy institut im. V. V. Dokuchayeva, 2008:182.
35. Soil-reclamation map of the non-chernozem zone of the RSFSR (excluding the mountainous parts of the Urals and the Trans-Urals), Scale: 1:1,500,000 [*Pochvenno-meliorativnaya karta Nechernozemnoy zony RSFSR (za isklyucheniyem gornoy chasti Urala i Zaural'ya)*]. Ministerstvo geologii RSFSR, 1980:1.
36. Rastvorova OG, Andreev DP, Gagarina EI,

функционирования галоморфных почв Байкальской рифтовой зоны (на примере Баргузинской котловины) // География и природные ресурсы. № 2. С. 99-108.

46. *Флеров А.Ф.* 1903. Ботанико-географические очерки. III: Ростовский край // Землеведение. Т. 10. Кн. II-III. С. 193-218.
47. *Хайрулина Е.А.* 2025. Природное и техногенное засоление на разрабатываемых месторождениях калийных солей: монография. Пермь: Издательский центр ПГНИУ. 210 с.
48. *Хитров Н.Б., Рухович Д.И., Калинина Н.В., Новикова А.Ф., Панкова Е.И., Черноусенко Г.И.* 2009. Оценка площадей засоленных почв на территории европейской части России (по электронной версии карты засоления почв масштаба 1: 2.5 млн) // Почвоведение. № 6. С. 627-637.
49. *Хутакова С.В., Убугунова В.И.* 2014. Разнообразие почв приозерного межгорного понижения Иволгинско-Оронгойской котловины // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. № 12 (122). С. 49-55.
50. *Черноусенко Г.И., Орешникова Н.В., Украинцева Н.Г.* 2001. Засоление почв побережья северных и восточных морей России // Почвоведение. № 10. С. 1192-1206.
51. *Черноусенко Г.И., Панкова Е.И., Калинина Н.В, Убугунова В.И., Рухович Д.И., Убугунов В.Л., Цыремпилов Э.Г.* 2017. Засоленные почвы Баргузинской котловины // Почвоведение. № 6. С. 652-671.
52. *Черноусенко Г.И., Хитров Н.Б.* 2019. Изменение климата в зоне распространения засоленных почв криоаридных регионов на юге Восточной Сибири // Экосистемы: экология и динамика. Т. 3. № 3. С. 5-57.
53. *Черноусенко Г.И.* 2022. Засоленные

Kasatkina GA, Fedorova NN. Chemical analysis of soils [*Khimicheskiy analiz pochv*]. Saint-Petersburg: Izd-vo Sankt-Peterburgskogo universiteta, 1995:262.

37. Reznikov AA, Mulikovskaya EP, Sokolov IYu 1970. Methods for the analysis of natural waters, 3rd ed., revised and suppl. [*Metody analiza prirodnykh vod*]. Moscow: Nedra, 2008:488.
38. Simonova YuV, Rusakov AV, Ryumin AG. Saline soils of the Rostov Lowland (Yaroslavl Oblast): morphology, genesis, and salinization dynamics within the annual hydrological cycle [Zasolennyye pochvy Rostovskoy niziny (Yaroslavskaya oblast'): morfologiya, genezis i dinamika zasoleniya v godovom gidrologicheskom tsikle]. *Bulletin of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute [Byulleten' Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchayeva]*. 2018;93:40-74.
39. Simonova YuV, Rusakov AV, Lemeshko NA. Saline soils of the Rostov Lowland (Yaroslavl Volga region): current status, hydrological aspects of salinization, and evolutionary trends against the backdrop of climate change [Zasolennyye pochvy Rostovskoy niziny (Yaroslavskoye Povolzh'ye): sovremennoye sostoyaniye, gidrologicheskiye aspekty zasoleniya i evolyutsionnyye trendy na fone klimaticheskikh izmeneniy]. *Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences [Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN]*. 2022;8:31-49.
40. Solntseva NP. Oil extraction and the geochemistry of natural landscapes [*Dobycha nefti i geokhimiya prirodnykh landshaftov*]. Moscow: Izd-vo MGU, 1998:376.
41. Solntseva NP, Sadov AP. Technogenic halogenesis in the soils of forest-tundra and northern taiga landscapes in Western Siberia [Tekhnogennyy galogenez v pochvakh lesotundrovykh i severotayezhnykh landshaftov Zapadnoy Sibiri]. *Eurasian Soil Science [Pochvovedenie]*. 2000;9:1127-1141.
42. The state of the Lake Nero ecosystem at the beginning of the 21st century [*Sostoyaniye ekosistemy ozera Nero v nachale XXI veka*] / ed. V.I. Lazareva. Moscow: Nauka, 2008:406.
43. General staff topographic map, Scale

почвы котловин юга Восточной Сибири: Монография. М.: МАКС Пресс. 480 с.

54. *Черноусенко Г.И.* 2025. Засоление почв Севера России (обзор 1933-2024 гг.) // Экосистемы: экология и динамика. № 2. С. 5-42.
55. *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. С. 364-374.
56. *Ямнова И.А., Черноусенко Г.И.* 2023. Гипсоносные гажевые почвы суббореального пояса Евразии // Почвоведение. № 1. С. 3-19.
57. Яндекс.Карты. 2017 [Электронный ресурс https://yandex.ru/maps/ (дата обращения 16.02.2017)].
58. *Babanazarova O.V., Sidelev S.I., Zhdanova S.M., Litvinov A.S., Ovseenko A.S., Korovkina K.P.* 2018. Water Level in a Shallow Highly Eutrophic Lake: Development Factor by Macrophyte or Phytoplankton Type: Case Study of Lake Nero, Yaroslavl Oblast // Water Resources. Vol. 45. No. 6. P. 897-907.
59. *Dasgupta S., Hossain M.M., Huq M., Wheeler D.* 2015. Climate Change and Soil Salinity: The Case of Coastal Bangladesh // Ambio. Vol. 44. No. 8. P. 815-826.
60. *Engle M.A., Reyes F.R., Varonka M.S., Orem W.H., Ma L., Ianno A.J., Carroll K.C.* 2016. Geochemistry of Formation Waters from the Wolfcamp and “Cline” Shales: Insights into Brine Origin, Reservoir Connectivity, and Fluid Flow in the Permian Basin, USA // Chemical Geology. Vol. 425. P. 76-92.
61. *Gibson J.J., Fennell J., Birks S.J., Yi Y., Moncur M.C., Hansen B., Jasechko S.* 2013. Evidence of Discharging Saline Formation Water to the Athabasca River in the Oil Sands Mining Region, Northern Alberta // Canadian Journal of

1:100,000 [*Topograficheskaya karta Genshtaba*] *Sheet O-37-103, Rostov Veliky [List O-37-103, Rostov Velikiy]*. 1988, Available at https://varvar.ru/top/o-37/o-37-103.html (Date of Access 15/05/2026).

44. Ubugunov VL, Ubugunova VI, Chizhikova NP, Varlamov EB, Khitrov NB, Zhambalova AD. Solonets soils in tectonic fault zones of the northern Barguzin Basin (Buryatia, Russia) [Solontsy zon tektonicheskikh razlomov severa Barguzinskoy kotloviny (Buryatiya, Rossiya)]. *Nature of Inner Asia [Priroda Vnutrenney Azii]*. 2017;2:38-48.
45. Ubugunov VL, Ubugunova VI, Zhambalova AD. Endogenous factors in the formation and functioning of halomorphic soils in the Baikal Rift Zone (a case study of the Barguzin Basin) [Endogennyye faktory formirovaniya i funktsionirovaniya galomorfnykh pochv Baykal’skoy riftovoy zony (na primere Barguzinskoy kotloviny)]. *Geography and Natural Resources [Geografiya i prirodnyye resursy]*. 2020;2:99-108.
46. Flerov AF. Botanical-geographical essays [Botaniko-geograficheskiye ocherki] III: The Rostov region [III: Rostovskiy kray]. *Zemlevedenie [Earth Science]*. 1903;10 (II-III):193-218.
47. Khayrulina EA. Natural and technogenic salinization at potash salt deposits under development: a monograph [*Prirodnoye i tekhnogennoye zasoleniye na razrabatyvayemykh mestorozhdeniyakh kaliynykh soley: monografiya*]. Perm: Izdatel’skiy tsentr PGNIU, 2025:210.
48. Khitrov NB, Rukhovich DI, Kalinina NV, Novikova AF, Pankova EI, Chernousenko GI. Assessment of the areas of saline soils in the European part of Russia (based on the digital version of the soil salinization map at a scale of 1:2.5 million) [Otsenka ploshchadey zasolennykh pochv na territorii yevropeyskoy chasti Rossii (po elektronnoy versii karty zasoleniya pochv masshtaba 1: 2.5 mln)]. *Eurasian Soil Science [Pochvovedenie]*. 2009;6:627-637.
49. Khutakova SV, Ubugunova VI. Soil diversity in the lacustrine intermontane depression of the

Earth Sciences. Vol. 50. No. 12. P. 1244-1257.
62. Global Status of Salt-affected Soils – Main Report. 2024. Rome: FAO. 240 p.
63. *Gue A., Grasby S.E., Mayer B.* 2018. Influence of Saline Groundwater Discharge on River Water Chemistry in the Athabasca oil Sands Region – A Chloride Stable Isotope and Mass Balance Approach // Applied Geochemistry. Vol. 89. P. 75-85.
64. *Hardie L.A.* 1970. The Evolution of Closed Basin Brines // Mineralogical Society of America Special Paper. No. 3. P. 273-290.
65. *Heck R.J., Mermut A.R.* 1992. Genesis of Natriborolls (Solonetzic) in a Closed Lake Basin in Saskatchewan, Canada // Soil Science Society of America Journal. Vol. 56. No. 3. P. 842-848.
66. *Herrero J., Porta J.* 2000. The Terminology and the Concepts of Gypsum-Rich Soils // Geoderma. Vol. 96. No. 1-2. P. 47-61.
67. *Hissink D.J.* 1938. The Reclamation of the Dutch Saline Soils (Solonchak) and Their Further Weathering under the Humid Climate Conditions of Holland // Soil Science. Vol. 45. No. 2. P. 83-94.
68. *Hogan J.F., Phillips F.M., Mills S.K., Hendrickx J.M., Ruiz J., Chesley J.T., Asmerom Y.* 2007. Geologic Origins of Salinization in a Semi-Arid River: The Role of Sedimentary Basin Brines // Geology. Vol. 35. No. 12. P. 1063-1066.
69. *Hulisz P.* 2016. Coastal Marsh Soils in Poland: Characteristics and Problems of Classification // Soil Science Annual. Vol. 67. No. 1. P. 37-44.
70. *Hulisz P., Sowiński P., Felińczak-Drabik A.* 2013. Soils Contaminated by Brine Spills in Sędowo // Technogenic Soils of Poland / eds. P. Charzyński, P. Hulisz, R. Bednarek. Torun: Polish Society of Soil Science. P. 157-170.
71. *Hulisz P., Pindral S., Kobierski M., Charzyński P.* 2018. Technogenic Layers in Organic Soils as a Result of the Impact of the Soda Industry // Ivolga-Orongoy Basin [Raznoobraziye pochv priozernogo mezhgornogo ponizheniya Ivolginsko-Orongoyskoy kotloviny]. *Bulletin of the Altai State Agricultural University [Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta]*. 2014;12 (122):49-55.
50. Chernousenko GI, Oreshnikova NV, Ukraintseva NG. Soil salinization along the coasts of the northern and eastern seas of Russia [Zasoleniye pochv poberezh'ya severnykh i vostochnykh morey Rossii]. *Eurasian Soil Science [Pochvovedenie]*. 2001;10:1192-1206.
51. Chernousenko GI, Pankova EI, Kalinina NV, Ubugunova VI, Rukhovich DI, Ubugunov VL, Tsyrempilov EG. Saline soils of the Barguzin Basin [Zasolennyye pochvy Barguzinskoy kotloviny]. *Eurasian Soil Science [Pochvovedenie]*. 2017;6:652-671.
52. Chernousenko GI, Khitrov NB. Climate change in the zone of saline soil distribution in the cryo-arid regions of southern Eastern Siberia [Izmeneniye klimata v zone rasprostraneniya zasolennykh pochv krioaridnykh regionov na yuge Vostochnoy Sibiri]. *Ecosystems: Ecology and Dynamics.* 2019;3 (3):5-57.
53. Chernousenko GI. Saline soils of the basins in Southern Eastern Siberia: a monograph [*Zasolennyye pochvy kotlovin yuga Vostochnoy Sibiri: Monografiya*]. Moscow: MAKS Press, 2022:480.
54. Chernousenko GI. Soil salinization in the North of Russia (a review, 1933-2024) [Zasoleniye pochv Severa Rossii (obzor 1933-2024 gg.)]. *Ecosystems: Ecology and Dynamics.* 2025;2:5-42.
55. Yakimov AS, Svanidze IG, Kazantseva MN, Soromotin AV. Changes in soil properties in the river valleys of the southern taiga in Western Siberia under the influence of mineralized artesian waters [Izmeneniye svoystv pochv rechnykh dolin yuzhnoy taygi Zapadnoy Sibiri pod deystviyem mineralizovannykh artezianskikh vod]. *Eurasian Soil Science [Pochvovedenie]*. 2014;3:364-374.
56. Yamnova IA, Chernousenko GI. Gypsum-bearing soils of the Eurasian subboreal zone

Eurasian Soil Science. No. 51. P. 1133-1141.
72. *Indorante S.J.* 2006. Sodium-Affected Soils in Humid Areas // Encyclopedia of Soil Science. 2nd ed. / ed. R. Lal. Boca Raton: Taylor and Francis/CRC Press. P. 1606-1609.
73. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. 2019. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press. 755 p.
74. *Joeckel R.M., Clement B.J.A.* 2005. Soils, Surficial Geology, and Geomicrobiology of Saline-Sodic Wetlands, North Platte River Valley, Nebraska, USA // Catena. Vol. 61. No. 1. P. 63-101.
75. *Kafri U., Yechieli Y.* 2010. Groundwater Base Level Changes and Adjoining Hydrological Systems. Berlin/Heidelberg: Springer Science and Business Media. 171 p.
76. *Khayrulina E., Mitrakova N., Poroshina N., Menshikova E., Perminova A.* 2022. Formation of Solonchak in the Area of the Discharged Ancient Brine Wells (Perm krai, Russia) // Frontiers in Environmental Science. No. 10. P. 858742.
77. *Khayrulina E.A., Mitrakova N.V., Maksimov A.Y., Maltseva P.Y., Bogush A.A.* 2024. Geochemistry and Microbiology of Boreal Alluvial Soil under Salinization // Geoderma Regional. No. 38. P. e00842.
78. *Kinsman D.J.J.* 1976. Evaporites; Relative Humidity Control of Primary Mineral Facies // Journal of Sedimentary Research. Vol. 46. No. 2. P. 273-279.
79. *Koutsoyiannis D.* 2003. Climate Change, the Hurst Phenomenon, and Hydrological Statistics // Hydrological Sciences Journal. Vol. 48. No. 1. PP. 3-24.
80. *Lavado R.S., Taboada M.A.* 1988. Water, Salt and Sodium Dynamics in a Natraquoll in Argentina // Catena.

[Gipsonosnyye gazhevyye pochvy subboreal'nogo poyasa Yevrazii]. *Eurasian Soil Science [Pochvovedenie]*. 2023;1:3-19.
57. Yandex.Maps. 2017, Available at https://yandex.ru/maps/ (Date of Access 16/02/2017).
58. Babanazarova OV, Sidelev SI, Zhdanova SM, Litvinov AS, Ovseenko AS, Korovkina KP. Water Level in a Shallow Highly Eutrophic Lake: Development Factor by Macrophyte or Phytoplankton Type: Case Study of Lake Nero, Yaroslavl Oblast. *Water Resources.* 2018;45 (6):897-907.
59. Dasgupta S, Hossain MM, Huq M, Wheeler D. Climate Change and Soil Salinity: The Case of Coastal Bangladesh. *Ambio.* 2015;44 (8):815-826.
60. Engle MA, Reyes FR, Varonka MS, Orem WH, Ma L, Ianno AJ, Carroll KC. Geochemistry of Formation Waters from the Wolfcamp and "Cline" Shales: Insights into Brine Origin, Reservoir Connectivity, and Fluid Flow in the Permian Basin, USA. *Chemical Geology.* 2016;425:76-92.
61. Gibson JJ, Fennell J, Birks SJ, Yi Y, Moncur MC, Hansen B, Jasechko S. Evidence of Discharging Saline Formation Water to the Athabasca River in the Oil Sands Mining Region, Northern Alberta. *Canadian Journal of Earth Sciences.* 2013;50 (12):1244-1257.
62. Global Status of Salt-affected Soils – Main Report. Rome: FAO, 2024:240.
63. Gue A, Grasby SE, Mayer B. Influence of Saline Groundwater Discharge on River Water Chemistry in the Athabasca oil Sands Region – A Chloride Stable Isotope and Mass Balance Approach. *Applied Geochemistry.* 2018;89:75-85.
64. Hardie LA. The Evolution of Closed Basin Brines. *Mineralogical Society of America Special Paper.* 1970;3:273-290.
65. Heck RJ, Mermut AR. Genesis of Natriborolls (Solonetzic) in a Closed Lake Basin in Saskatchewan, Canada. *Soil Science Society of America Journal.* 1992;56 (3):842-848.
66. Herrero J, Porta J. The Terminology and the Concepts of Gypsum-Rich Soils. *Geoderma.* 2000;96 (1-2):47-61.

Vol. 15. No. 6. P. 577-594.
81. *Lebedeva M., Konyushkova M., Khokhlov S.* 2018. Monitoring of Micromorphological Changes in a Virgin Solonetz under Regional Changes in Hydrology and Climate (Northern Caspian Lowland, Russia) // Spanish Journal of Soil Science. Vol. 8. No. 2. P. 164-182.
82. *Li J., Pu L., Han M., Zhu M., Zhang R., Xiang Y.* 2014. Soil Salinization Research in China: Advances and Prospects // Journal of Geographical Sciences. Vol. 24. No. 5. P. 943-960.
83. *McConnaughey T.A., Whelan J.F.* 1997. Calcification Generates Protons for Nutrient and Bicarbonate Uptake // Earth-Science Reviews. Vol. 42. No. 1-2. P. 95-117.
84. *Milly P., Dunne K., Vecchia A.* 2005. Global Pattern of Trends in Streamflow and Water Availability in a Changing Climate // Nature. No. 438. P. 347-350.
85. *Monteiro F.M., Fonseca M.M., Madeira M.A., Herbillon A.J.* 2012. Driving Factors Determining the Occurrence of Sodic Soils in Dry Subhumid Mediterranean Areas // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. Vol. 175. No. 1. P. 94-100.
86. *Mullins H.T.* 1998. Environmental Change Controls of Lacustrine Carbonate, Cayuga Lake, New York // Geology. Vol. 26. No. 5. P. 443-446.
87. *Nohara D., Kitoh A., Hosaka M., Oki T.* 2006. Impact of Climate Change on River Discharge Projected by Multimodel Ensemble // Journal of Hydrometeorology. Vol. 7. No. 5. P. 1076-1089.
88. *Oki T., Kanae S.* 2006. Global Hydrological Cycles and World Water Resources // Science. Vol. 313. No. 5790. P. 1068-1072.
89. *Osborn T.J., Hulme M., Jones P.D., Basnett T.A.* 2000. Observed Trends in the Daily Intensity of United Kingdom Precipitation // International Journal of Climatology: A Journal of the Royal
67. Hissink DJ. The Reclamation of the Dutch Saline Soils (Solonchak) and Their Further Weathering under the Humid Climate Conditions of Holland. *Soil Science.* 1938;45 (2):83-94.
68. Hogan JF, Phillips FM, Mills SK, Hendrickx JM, Ruiz J, Chesley JT, Asmerom Y. Geologic Origins of Salinization in a Semi-Arid River: The Role of Sedimentary Basin Brines. *Geology.* 2007;35 (12):1063-1066.
69. Hulisz P. Coastal Marsh Soils in Poland: Characteristics and Problems of Classification. *Soil Science Annual.* 2016;67 (1):37-44.
70. Hulisz P, Sowiński P, Felińczak-Drabik A. Soils Contaminated by Brine Spills in Sędowo. Technogenic Soils of Poland / eds. P. Charzyński, P. Hulisz, R. Bednarek. Torun: Polish Society of Soil Science, 2013:157-170.
71. Hulisz P, Pindral S, Kobierski M, Charzyński P. Technogenic Layers in Organic Soils as a Result of the Impact of the Soda Industry. *Eurasian Soil Science.* 2018;51:1133-1141.
72. Indorante SJ. Sodium-Affected Soils in Humid Areas. Encyclopedia of Soil Science. 2nd ed. / ed. R. Lal. Boca Raton: Taylor and Francis/CRC Press, 2006:1606-1609.
73. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2019:755.
74. Joeckel RM, Clement BJA. Soils, Surficial Geology, and Geomicrobiology of Saline-Sodic Wetlands, North Platte River Valley, Nebraska, USA. *Catena.* 2005;61 (1):63-101.
75. Kafri U, Yechieli Y. Groundwater Base Level Changes and Adjoining Hydrological Systems. Berlin/Heidelberg: Springer Science and Business Media, 2010:171.
76. Khayrulina E, Mitrakova N, Poroshina N, Menshikova E, Perminova A. Formation of Solonchak in the Area of the Discharged Ancient Brine Wells (Perm krai, Russia). *Frontiers in Environmental Science.* 2022;10:858742.
77. Khayrulina EA, Mitrakova NV,

Meteorological Society. No. 20. P. 347-364.
90. *Piernik A.* 2012. Ecological Pattern of Inland Salt Marsh Vegetation in Central Europe. Toruń, Czech Republic: Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika. 219 p.
91. *Piernik A., Hulisz P.* 2011. Soil-Plant Relations in Inland Natural and Anthropogenic Saline Habitats // The European Journal of Plant Science and Biotechnology. No. 5. P. 37-43.
92. *Rakonczai J., Bozso G., Margoczi K., Barna G., Pal-Molnar E.* 2008. Modification of salt-Affected Soils and Their Vegetation under the Influence of Climate Change at the Steppe of Szabadkígyós (Hungary) // Cereal Research Communications. No. 36. P. 2047-2050.
93. *Qi J., Li X., Xu M., Yi L., Zhang Q., Qin L., Li K.* 2018. Origin of Saline Springs in Yanjing, Tibet: Hydrochemical and Isotopic Characteristics // Applied Geochemistry. Vol. 96. P. 164-176.
94. *Salama R.B., Farrington P., Bartle G.A., Watson G.D.* 1993. The Chemical Evolution of Groundwater in a First-Order Catchment and the Process of Salt Accumulation in the Soil Profile // Journal of Hydrology. Vol. 143. No. 3-4. P. 233-258.
95. *Salama R.B., Otto C.J., Fitzpatrick R.W.* 1999. Contributions of Groundwater Conditions to Soil and Water Salinization // Hydrogeology Journal. Vol. 7. No. 1. P. 46-64.
96. *Sharma D.K., Singh A.* 2017. Current Trends and Emerging Challenges in Sustainable Management of Salt-Affected Soils: A Critical Appraisal // Bioremediation of Salt Affected Soils: An Indian Perspective. Switzerland, Cham: Springer International Publishing AG. P. 1-40.
97. *Simonova J.V., Rusakov A.V., Popov A.I.* 2020. Dynamics of Soil Salinization in the Nero Lake

Maksimov AY, Maltseva PY, Bogush AA. Geochemistry and Microbiology of Boreal Alluvial Soil Under Salinization. *Geoderma Regional.* 2024;38:e00842.
78. Kinsman DJJ. Evaporites; Relative Humidity Control of Primary Mineral Facies. *Journal of Sedimentary Research.* 1976;46 (2):273-279.
79. Koutsoyiannis D. Climate Change, the Hurst Phenomenon, and Hydrological Statistics. *Hydrological Sciences Journal.* 2003;48 (1):3-24.
80. Lavado RS, Taboada MA. Water, Salt and Sodium Dynamics in a Natraquoll in Argentina. *Catena.* 1988;15 (6):577-594.
81. Lebedeva M, Konyushkova M, Khokhlov S. Monitoring of Micromorphological Changes in a Virgin Solonetz under Regional Changes in Hydrology and Climate (Northern Caspian Lowland, Russia). *Spanish Journal of Soil Science.* 2018;8 (2):164-182.
82. Li J, Pu L, Han M, Zhu M, Zhang R, Xiang Y. Soil Salinization Research in China: Advances and Prospects. *Journal of Geographical Sciences.* 2014;24 (5):943-960.
83. McConnaughey TA, Whelan JF. Calcification Generates Protons for Nutrient and Bicarbonate Uptake. *Earth-Science Reviews.* 1997;42 (1-2):95-117.
84. Milly P, Dunne K, Vecchia A. Global Pattern of Trends in Streamflow and Water Availability in a Changing Climate. *Nature.* 2005;438:347-350.
85. Monteiro FM, Fonseca MM, Madeira MA, Herbillon AJ. Driving Factors Determining the Occurrence of Sodic Soils in Dry Subhumid Mediterranean Areas. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science.* 2012;175 (1):94-100.
86. Mullins HT. Environmental Change Controls of Lacustrine Carbonate, Cayuga Lake, New York. *Geology.* 1998;26 (5):443-446.
87. Nohara D, Kitoh A, Hosaka M, Oki T. Impact of Climate Change on River Discharge Projected by Multimodel Ensemble. *Journal of Hydrometeorology.* 2006;7 (5):1076-1089.
88. Oki T, Kanae S. Global Hydrological Cycles and World Water Resources. *Science.* 2006;313 (5790):1068-1072.

Depression (Upper Volga) in Connection with the Latest Climate Change // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. P. 012026.
98. *Simonova J., Rusakov A., Ryumin A., Mirin D., Lemeshko N., Popov A.* 2021. The Response of Salt-Affected Hydromorphic Soils of the Nero Lake Basin to the Recent Climate Change within the Upper Volga Region, Russia // Soil & Tillage Research. P. 207104871.
99. *Sonnenfeld P.* 1984. Brines and Evaporites. London: Academic Press. 613 p.
100. Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. 2015. Rome, Italy: FAO and ITPS. 608 p.
101. *Steinwand A.L., Richardson J.L.* 1989. Gypsum Occurrence in Soils on the Margin of Semipermanent Prairie Pothole Wetlands // Soil Science Society of America Journal. Vol. 53. No. 3. P. 836-842.
102. *Suarez D.L.* 1977. Ion Activity Products of Calcium Carbonate in Waters Below the Root Zone // Soil Science Society of America Journal. Vol. 41. No. 2. P. 310-315.
103. *Suleymanov A., Gabbasova I., Suleymanov R., Komissarov M., Garipov T., Sidorova L., Nazyrova F.* 2022. The Retrospective Monitoring of Soils under Conditions of Climate Change in the Trans-Ural Region (Russia) // Journal of Water and Land Development. Vol. 55. No. X-XII. P. 84-90.
104. *Szabolcs I.* 1979. Review of Research on Salt-Affected Soils. UNESCO. 137 p.
105. *Várallyay G.* 1994. Climate Change, Soil Salinity and Alkalinity // Soil Responses to Climate Change. NATO ASI Series. Series I: Global Environmental Change. Vol. 23. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. P. 39-54.
106. World Reference Base for Soil Resources. 2022. International Soil Classification System for Naming Soils
89. Osborn TJ, Hulme M, Jones PD, Basnett TA. Observed Trends in the Daily Intensity of United Kingdom Precipitation. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society.* 2000;20:347-364.
90. Piernik A. Ecological Pattern of Inland Salt Marsh Vegetation in Central Europe. Toruń, Czech Republic: Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, 2012:219.
91. Piernik A, Hulisz P. Soil-Plant Relations in Inland Natural and Anthropogenic Saline Habitats. *The European Journal of Plant Science and Biotechnology.* 2011;5:37-43.
92. Rakonczai J, Bozso G, Margoczi K, Barna G, Pal-Molnar E. Modification of salt-Affected Soils and Their Vegetation under the Influence of Climate Change at the Steppe of Szabadkígyós (Hungary). *Cereal Research Communications.* 2008;36:2047-2050.
93. Qi J, Li X, Xu M, Yi L, Zhang Q, Qin L, Li K. Origin of Saline Springs in Yanjing, Tibet: Hydrochemical and Isotopic Characteristics. *Applied Geochemistry.* 2018;96:164-176.
94. Salama RB, Farrington P, Bartle GA, Watson GD. The Chemical Evolution of Groundwater in a First-Order Catchment and the Process of Salt Accumulation in the Soil Profile. *Journal of Hydrology.* 1993;143 (3-4):233-258.
95. Salama RB, Otto CJ, Fitzpatrick RW. Contributions of Groundwater Conditions to Soil and Water Salinization. *Hydrogeology Journal.* 1999;7 (1):46-64.
96. Sharma DK, Singh A. Current Trends and Emerging Challenges in Sustainable Management of Salt-Affected Soils: A Critical Appraisal. Bioremediation of Salt Affected Soils: An Indian Perspective. Switzerland, Cham: Springer International Publishing AG, 2017:1-40.
97. Simonova JV, Rusakov AV, Popov AI. Dynamics of Soil Salinization in the Nero Lake Depression (Upper Volga) in Connection with the Latest Climate Change. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020:012026.
98. Simonova J, Rusakov A, Ryumin A, Mirin D,

and Creating Legends for Soil Maps. 4th ed. Vienna, Austria: International Union of Soil Sciences. 234 p.

107. *Xiao Q., Jiang Y., Shen L., Yuan D.* 2018. Origin of Calcium Sulfate-Type Water in the Triassic Carbonate Thermal Water System in Chongqing, China: A Chemical and Isotopic Reconnaissance // Applied Geochemistry. Vol. 89. P. 49-58.
108. *Ye C., Zheng M., Wang Z., Hao W., Wang J., Lin X., Han J.* 2015. Hydrochemical Characteristics and Sources of Brines in the Gasikule Salt Lake, Northwest Qaidam Basin, China // Geochemical Journal. Vol. 49. No. 5. P. 481-494.
109. *Zhan C.S., Jiang S.S., Sun F.B., Jia Y.W., Niu C.W., Yue W.F.* 2014. Quantitative Contribution of Climate Change and Human Activities to Runoff Changes in the Wei River Basin, China // Hydrology and Earth System Sciences. No. 18. P. 3069-3077.
110. *Zhou X., Wang X., Han J., Cao Q., Jiang C., Guo J., Zhou H.* 2018. Evolution of the Subsurface K-Rich Brines in the Triassic Carbonates in the Sichuan Basin of China // Groundwater. Vol. 56. No 5. P. 832-843.

Lemeshko N, Popov A. The Response of Salt-Affected Hydromorphic Soils of the Nero Lake Basin to the Recent Climate Change within the Upper Volga Region, Russia. *Soil & Tillage Research.* 2021:207104871.

99. Sonnenfeld P. Brines and Evaporites. London: Academic Press, 1984:613.
100. Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Rome, Italy: FAO and ITPS, 2015:608.
101. Steinwand AL, Richardson JL. Gypsum Occurrence in Soils on the Margin of Semipermanent Prairie Pothole Wetlands. *Soil Science Society of America Journal.* 1989;53 (3):836-842.
102. Suarez DL. Ion Activity Products of Calcium Carbonate in Waters Below the Root Zone. *Soil Science Society of America Journal.* 1977;41 (2):310-315.
103. Suleymanov A, Gabbasova I, Suleymanov R, Komissarov M, Garipov T, Sidorova L, Nazyrova F. The Retrospective Monitoring of Soils under Conditions of Climate Change in the Trans-Ural Region (Russia). *Journal of Water and Land Development.* 2022;55 (X-XII):84-90.
104. Szabolcs I. Review of Research on Salt-Affected Soils. UNESCO, 1979:137.
105. Várallyay G. Climate Change, Soil Salinity and Alkalinity. Soil Responses to Climate Change. NATO ASI Series. Series I: Global Environmental Change. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 1994;23:39-54.
106. World Reference Base for Soil Resources. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. 4th ed. Vienna, Austria: International Union of Soil Sciences, 2022:234.
107. Xiao Q, Jiang Y, Shen L, Yuan D. Origin of Calcium Sulfate-Type Water in the Triassic Carbonate Thermal Water System in Chongqing, China: A Chemical and Isotopic Reconnaissance. *Applied Geochemistry.* 2018;89:49-58.
108. Ye C, Zheng M, Wang Z, Hao W, Wang J, Lin X, Han J. Hydrochemical Characteristics and Sources of Brines in the Gasikule Salt Lake, Northwest Qaidam Basin, China.

Geochemical Journal. 2015;49 (5):481-494.
109. Zhan CS, Jiang SS, Sun FB, Jia YW, Niu CW, Yue WF. Quantitative Contribution of Climate Change and Human Activities to Runoff Changes in the Wei River Basin, China. *Hydrology and Earth System Sciences.* 2014;18:3069-3077.
110. Zhou X, Wang X, Han J, Cao Q, Jiang C, Guo J, Zhou H. Evolution of the Subsurface K-Rich Brines in the Triassic Carbonates in the Sichuan Basin of China. *Groundwater.* 2018;56 (5):832-843.

UDC 631.4;556.5

DYNAMICS OF SALINIZATION OF GAZHA SOILS IN A HUMID CLIMATE (UPPER VOLGA): RESULTS OF THREE-YEAR SEASONAL OBSERVATIONS AND ASSESSMENT OF LONG-TERM TRENDS

© 2026. Yu.V. Simonova, A.V. Rusakov, D.M. Mirin

Saint Petersburg State University,
7-9, Universitetskaya naberezhnaya, Saint-Petersburg 199034, Russia. E-mail: uvsim@yandex.ru

Received May 19, 2026. Revised Juni 01, 2026. Accepted Septender 01, 2026.

Saline gazha soils formed under conditions of excessive atmospheric moisture can be considered unique, since zonal soils in such a climate are leached and podzolized soils (in the study area these are Albic Retisols (Humic)), and intrazonal soils are mainly gley and peat soils.

The formation of saline gazha (gypsum-bearing) soils in the Yaroslavl Volga region (the second terrace of Lake Nero) is due to their association with a zone of mineralized (11.8 g/L) groundwater discharge. Changes in the hydrochemical regime of landscapes and the salinity of soils in groundwater discharge zones are indicators of changing environmental conditions, making these sites valuable sites for environmental monitoring. This is particularly relevant for understanding the response of landscape components, including vegetation and soils, to climate change.

The objectives of this study were to study the seasonal dynamics of the salt regime and determine the long-term (30-year) salinization trend of the gazha soils in the area of mineralized groundwater discharge. Assessing the current state of salinization is important not only for its significance in the landscape and soil diversity of the lakeside ecosystem, but also for identifying the potential amplitude of seasonal fluctuations in soil salt status, as the variability of these parameters throughout the year creates uncertainty when assessing evolutionary trends.

An assessment of soil salinity over a three-year cycle (2016-2019) revealed variability in the salinization-desalinization ratio, resulting in differences in both the total content of readily soluble salts (from 1.4 to 1.7%) and the content of salts toxic to plants (from 0.3 to 0.5%) across different observation seasons. Gypsum content varied throughout the year from 40 to 54%, and carbonate content from 17 to 21%, depending on the observation season.

To assess the long-term salinity trend, we compared soil salinity indicators during the current

monitoring period of 2016-2019 with those of soils studied at this site in 1988 and 1990. The results of this retrospective monitoring revealed that the content of readily soluble salts and gypsum in soils studied in 1988 was lower than during the modern monitoring period, while the content of readily soluble salts and gypsum in soils studied in the 1990s remained within the range established by modern monitoring. No significant differences were found when comparing the carbonate content of soils from the early and modern surveys. Thus, the amplitude of seasonal fluctuations in salt content in the modern period has reached a value comparable to long-term variations. Therefore, the question of the evolutionary trend of saline gypsum soils cannot be definitively resolved. At the trend level, it is worth noting the increase in salinization by readily soluble salts non-toxic to plants and the intensification of hydrogenous gypsum accumulation.

The site's vegetation species composition has not changed significantly over the more than 30 years between observations. The site features plant communities dominated by glycophytes, which, in the context of soil salinity in a humid climate, may be due to the low proportion of salts toxic to plants and their decreased content during periods of maximum phytomass growth. Plant communities dominated by salt-tolerant glycophytes and highly abundant glycohalophytes are present locally in depressions where mineralized groundwater emerges.

Keywords: gypsum-bearing soils, Lake Nero, monitoring, climate change, salinization, saline spring, saltern.

DOI: 10.24412/2542-2006-2026-3-25-63

EDN: SAWKVJ