

На правах рукописи



Пахоруков Иван Владимирович

**РАЗВИТИЕ СОЛОНЧАКОВОГО ПРОЦЕССА  
В ПОЧВАХ ДОЛИН МАЛЫХ РЕК ПРИКАМЬЯ  
В СВЯЗИ С ПРОИЗВОДСТВОМ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ**

Специальность 1.5.19 – почвоведение

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Пермь–2024

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

Научный руководитель: **Еремченко Ольга Зиновьевна**, доктор биологических наук, профессор, ФГАОУ ВО Пермский государственный национальный исследовательский университет

Официальные оппоненты: **Скипин Леонид Николаевич**, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры техносферной безопасности Института сервиса и отраслевого управления Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Тюменский индустриальный университет

**Елизаров Николай Владимирович**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории географии и генезиса почв Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Федеральный исследовательский центр «Почвенный институт им. В.В. Докучаева»

Защита состоится 21 января 2025 года в 10 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.1.094.01 при ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр-т Ак. Лаврентьева, 8/2, ИПА СО РАН; тел./факс (383) 363-90-25; e-mail: soil@issa-siberia.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПА СО РАН <https://www.issa-siberia.ru> и на официальном сайте ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.1.094.01,  
кандидат биологических наук



Гуркова Е.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Оценка состояния и прогноз эволюции почвенного покрова имеют основополагающее значение для установления контроля над изменяющимися экосистемами Земли [Richter, 2007; Эволюция почв..., 2015; Phillips, 2017]. Серьезную экологическую опасность представляет нарастающая засоленность почв, вызванная природными и антропогенными процессами. Глобальная площадь первичных солесодержащих почв составляет около 955 млн га, а вторичное засоление развито еще на 77 млн га, 58% из которых приходится на орошаемые районы [Imetternicht, Azinck, 2003]. Дополнительную угрозу вторичного галогенеза создают поиск и добыча нефти [Ронжина, 2009, 2013; Фоминых, Щербак, 2013; Якимов и др., 2014], образование техногенных хвостохранилищ и шламохранилищ [Szabolcs, 1996; Grunewald et al, 2007; Gabbasova, Suleimanov, 2007; Artamonova et al, 2010; Hulisz et al, 2010; Лискова, 2017]. Вторичная солонцеватость почв, проявившаяся в насыщенности почвенного поглощающего комплекса натрием, формируется вследствие применения антиобледенителей на дорогах [Ramakrishna, 2005; Nikiforova et al, 2017; Azovtseva, Smagin, 2018]. Предпосылкой азонального галогенеза служит регулярное поступление солей из соленых источников и гидротерм [Лопатовская и др., 2011; Якимов и др., 2014; Парамонова и др., 2017; Черноусенко и др., 2017; Симонова и др., 2018; Хитров и др., 2019; Лопатовская, 2020; Симонова и др., 2022; Симонова, 2023; Хайрулина, Чайковский, 2023].

В условиях гумидного климата источником засоления природных вод и почв служит добыча и производство солей [Хомич, 1985; Hulisz et al, 2010, 2018; Хайрулина, 2022; Москвина и др., 2023; Шейнкман, Ивлиева, 2023]. В Польше вблизи прудов-отстойников с отходами производства Иновроцловского содового завода образовались засоленные почвы на площади 135 га [Hulisz et al, 2018].

Калийное производство на Верхнекамском месторождении солей сопровождается накоплением отходов, суммарное их количество к настоящему времени достигло 425 млн т. Наряду с твердыми галитовыми отходами, складированными на поверхности в виде солеотвалов, применяемые технологии сопровождаются образованием значительных объемов глинисто-солевых шламов и избыточных рассолов, для хранения которых сооружают шламохранилища. Фильтрационные утечки рассолов ПАО «Уралкалий», по официальным данным, достигают сотни тысяч кубометров в год [Бобошко, Бачурин, 2004].

**Цель исследований** – изучение особенностей развития солончакового процесса в аллювиальных почвах таежно-лесной зоны в местах разгрузки минерализованных вод отвально-шламового хозяйства ПАО «Уралкалий».

### **Задачи исследований:**

1. Выявить особенности морфологического строения и основные характеристики аллювиальных почв в долинах малых рек Прикамья, находящихся под воздействием минерализованных грунтовых вод в течение нескольких десятилетий.

2. Установить направленность эволюционных трендов во вторичном галогенезе аллювиальных почв таежно-лесной зоны после нескольких столетий воздействия сильноминерализованных вод.

3. Обосновать подход к крупномасштабному картографированию и оценить современные ареалы аллювиальных техногенно засоленных почв в долинах трех малых рек Прикамья.

**Научная новизна.** Впервые выделены ареалы и детально описаны аллювиальные солончаковые почвы и вторичные солончаки, формирующиеся под воздействием грунтовых минерализованных вод отвально-шламового хозяйства ПАО «Уралкалий». Установлены особенности формирования солончаковых ненасыщенных почв с резкокислой реакцией среды. Продемонстрирована общая направленность эволюционных изменений во вторично засоленных аллювиальных почвах под воздействием минерализованных хлоридно-натриевых вод в условиях гумидного климата. Проведена оценка масштабов прогрессирующего засоления почв в долинах малых рек Прикамья в результате производства калийных солей.

**Теоретическое и практическое значение работы.** Детализировано разнообразие техногенно засоленных аллювиальных почв по типовым, подтиповым, родовым и видовым критериям современной классификации [Классификация и диагностика ..., 2004] и WRB [2022]. Конкретизированы общие эволюционные изменения в аллювиальных почвах под воздействием минерализованных хлоридно-натриевых вод в условиях гумидного климата, направленные на аккумуляцию хлоридных и сульфатных солей, нейтрализацию кислотности, появление карбонатов и гипса, на многонатриевоcть (по обменному натрию). Выделенные ареалы солончаковых почв и солончаков вторичных могут быть использованы в почвенно-экологическом мониторинге в долинах малых рек Прикамья. Теоретические положения и практические выводы используются в учебном процессе по дисциплинам «Почвоведение», «Экология почв», «Антропогенные почвы» в ПГНИУ.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Современное классификационное разнообразие аллювиальных почв в долинах малых рек Прикамья, находящихся под воздействием техногенных минерализованных грунтовых вод, проявляется в степени и химизме засоления, в

доле натрия от состава обменных оснований, насыщенности или ненасыщенности основаниями, в наличии или отсутствии карбонатов и гипса.

2. В условиях таежно-лесной зоны эволюция аллювиальных серогумусовых поверхностно оглеенных почв в долинах малых рек Прикамья, расположенных в зонах разгрузки хлоридно-натриевых вод, идет в направлении развития солончаковости, сульфатно-хлоридного химизма засоления, нейтрализации кислотности, вхождения натрия и калия в состав обменных оснований, в появлении карбонатов и гипса.

**Методология и методы исследований.** Методология исследований основана на классических и современных представлениях об эволюции засоленных почв. Используются общепринятые методы изучения генетических свойств почв, цифровые технологии, методы статистического анализа.

**Степень достоверности и апробация работы.** Результаты исследований базируются на значительном объеме полевых и лабораторных исследований, сопоставлены с результатами научных изысканий других ученых. Материалы диссертации опубликованы в 16 работах, в том числе 3 – в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 – в изданиях Scopus и Web of Science.

Основные положения диссертации представлены на второй конференции молодых учёных «Почвоведение: Горизонты Будущего 2018» (Москва, 2018), Международной научной конференции «Высокие технологии, определяющие качество жизни» (Пермь, 2018), XI Всероссийском конгрессе молодых ученых-биологов с международным участием «Симбиоз-Россия 2019» (Пермь, 2019), Международной научной конференции XXII Докучаевские молодежные чтения (Санкт-Петербург, 2019), XII Всероссийском конгрессе молодых ученых-биологов с международным участием «Симбиоз-Россия 2020» (Пермь, 2020), региональной научной конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты биоинформатики, биотехнологии и недропользования» (Пермь, 2021), VII Международной научно-практической конференции (Воронеж, 2021), XIII Международной конференции ученых-биологов «Симбиоз-Россия 2022» (Пермь, 2022), региональной научной конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты биоинформатики, биотехнологии и недропользования» (Пермь, 2022), XXIX Всероссийской молодежной научной конференции (Сыктывкар, 2022), Всероссийской научной конференции с международным участием «Почвы и окружающая среда», посвященной 55-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, 2023).

**Структура диссертации.** Диссертация изложена на 192 страницах машинописного текста и состоит из введения, трех глав, выводов, списка литературы и приложений. Содержит в основной части 47 рисунков и 10 таблиц.

Список литературы включает 184 источника, в том числе 49 источников на иностранных языках. Приложения содержат 9 таблиц и 3 рисунка.

**Личный вклад автора.** Материалы, изложенные в диссертации, были получены автором за период 2018-2023 гг. Автор принимал непосредственное участие в полевых работах. Выполнен полный объём лабораторных работ по анализу почвенных образцов, обработке и систематизации полученных данных, их интерпретации. Подготовка к печати научных работ осуществлялась как самостоятельно, так и при участии соавторов.

**Благодарности.** Автор выражает огромную благодарность научному руководителю, профессору, доктору биологических наук О.З. Еремченко за неоценимую помощь и поддержку. Автор признателен кандидату биологических наук, доценту И.Е. Шестакову за участие в сборе полевого материала. Автор благодарит за помощь, ценные советы и замечания сотрудников ИПА СО РАН.

### **Глава 1. Обзор литературы**

В главе рассмотрены особенности генезиса, основные свойства и классификации засоленных и аллювиальных почв. Приводятся современные взгляды на формирование и свойства техногенно засоленных почв. Даны базовые представления о сульфидогенезе и кислых сульфатных почвах.

### **Глава 2. Условия, объекты и методы исследований**

Климат Пермского края характеризуется как умеренно-континентальный с продолжительной холодной и многоснежной зимой и умеренно-теплым сравнительно коротким летом. Территория исследований относится к южно-таежным пихтово-еловым лесам, к почвенному району дерново-сильно- и среднеподзолистых тяжелосуглинистых почв.

Объектами исследований были аллювиальные почвы в долинах малых рек Прикамья. Разрезы на фоновых почвах расположены в долинах рек Нижний Лух и Б. Висим за пределами Верхнекамского месторождения солей. Техногенно засоленные почвы исследовали в местах разгрузки минерализованных грунтовых вод, мигрирующих от шламохранилищ и солеотвалов, в долинах малых рек Ленва, Черная и Быгель. Воздействие на почвы соленых вод, изливающихся из древних рассолоподъемных скважин в течение нескольких столетий, исследовали в долине р. Усолка близ села Усть-Игум.

В 2018-2022 гг. в долинах указанных малых рек заложен 21 почвенный разрез до уровня водонасыщенных грунтов и 17 почвенных прикопок. Полевую диагностику почв провели в соответствии с современной классификацией почв России [2004] и мировой корреляционной базой почвенных ресурсов [WRB, 2022]. Для исследования поверхностных и почвенно-грунтовых вод взяли 14 проб воды.

Основные свойства почв изучили общепринятыми методами: содержание углерода органических соединений – титриметрическим методом по Тюрину,  $pH_{\text{вод}}$  и  $pH_{\text{сол}}$  – потенциометрически [ГОСТ 26423-85; ГОСТ 26483-85], гидролитическая кислотность – по Каппену [ГОСТ 26212-2021], состав обменных катионов – по Пфедферу в модификации Молодцова и Игнатовой [Молодцов, Игнатова, 1975]; емкость катионного обмена (ЕКО) – расчетным методом; содержание карбонатов и гипса – по Молодцову [Молодцов и др., 1979]; полевую влажность – весовым методом. Содержание и состав солей в грунтовых и поверхностных водах, а также в водной вытяжке из почв (при соотношении почва : вода равным 1:5) исследовали классическими методами:  $Na^+$  и  $K^+$  – пламенно-фотометрическим методом [ГОСТ 23268.6-78; ГОСТ 23268.7-78],  $Cl^-$  – аргентометрическим методом [ГОСТ 4245-72],  $SO_4^{2-}$  – весовым методом [ГОСТ 4389-72];  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  – комплексонометрическим методом [ГОСТ 23268.5-78], содержание  $HCO_3^-$  – титрованием раствором серной кислоты [ГОСТ 31957-2012], плотный остаток водной вытяжки и минерализация вод – весовым методом [ГОСТ 26423-85], сумма солей (%) – расчетным методом.

В течение летне-осеннего периода 2022 г. в аллювиальных солончаковых насыщенных и ненасыщенных почвах наблюдали полевую динамику показателей  $pH_{\text{вод}}$  и окислительно-восстановительного потенциала (Eh) потенциометрическим методом с помощью портативного pH-метра HI-9125 на глубинах  $10 \pm 2$ ,  $20 \pm 2$ ,  $30 \pm 2$ ,  $40 \pm 2$  см – в трехкратной повторности. Сопряженно из прикопок отбирали смешанные почвенные пробы для определения в лабораторных условиях полевой влажности – весовым методом. Результаты режимных наблюдений обработаны методами статистического и регрессионного анализа; адекватность уравнений регрессии оценили при уровне значимости  $P < 0,05$ .

Площади солончаковых почв рассчитаны при помощи программы ArcMap 10.5. Контуры засоленных почв выделялись на космоснимках на основе визуального дешифрирования и полевых проверок.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

### **Глава 3. Развитие солончакового почвообразования в аллювиальных почвах**

#### **3.1. Характеристика фоновых аллювиальных почв Вятско-Камской почвенной провинции**

Свойства исследованных фоновых аллювиальных почв долин малых рек Прикамья соответствуют общим показателям аллювиальных почв таежно-лесной зоны, таким как серо-бурая окраска, кислая реакция среды и ненасыщенность основаниями, признаки оглеения [Добровольский и др., 2011].

### 3.2. Ионно-солевой состав поверхностных и подземных вод, формирующихся под влиянием отходов отвално-шламового хозяйства

Большинство поверхностных вод по степени минерализации были отнесены к группе вод с повышенной соленостью [Овчинников, 1970]. Почвенно-грунтовые воды в долинах р. Быгель, Черная и Ленва были солеными (вплоть до рассолов), среди анионов в них преобладали хлориды, относительное содержание сульфатов составляло около 2-7% от суммы анионов. В составе катионов доминировали  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$ , т.е. химизм вод был хлоридным натриевым и калиево-натриевым (табл. 1).

Таблица 1. Минерализация, содержание ионов и рН в почвенно-грунтовых водах долин малых рек, ммоль(экв)/л

Место отбора	рН	М*, г/л	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$
Долина р. Быгель	6,3	111,4	108	26	1080	493	1644	67	0
	6,5	106,9	48	11	1070	500	1564	63	0
Долина р. Черная	6,3	12,4	38	22	115	23	177	12	4
	6,2	5,7	10	3	63	11	79	6	0
Долина р. Ленва	6,5	40,0	110	29	350	180	550	10	2

Примечание: \* – минерализация.

### 3.3. Характеристика техногенно засоленных аллювиальных почв

#### 3.3.1. Техногенно засоленные аллювиальные почвы в долине р. Быгель

Под воздействием подземных рассолов, сформированных на территории солеотвала БКПРУ-4, в долине малой реки Быгель образовался засоленный участок. Почвенный покров данного участка представлен аллювиальными гумусовыми глеевыми солончаковыми и солончаковатыми сильнозасоленными почвами (Sodic Gleyic Fluvisols (Loamic, Salic)).

Верхняя часть гумусового горизонта аллювиальных почв переплетена корнями. Горизонт АУ – бурый, суглинистый, влажный, встречаются признаки глееватости в виде темных пятен. В переходном горизонте АУ/С присутствует погребенный гумусовый глееватый горизонт. Сизая, рыже-сизая, песчано-легкосуглинистая почвообразующая порода залегает с глубины 60-80 см. Вскипание почв не обнаружено. Грунтовые воды вскрылись на глубине 90-120 см.

Солончаковые средне- и сильнозасоленные почвы с хлоридным калиево-натриевым химизмом содержали токсичные соли в количестве 0,2-5,2% (рис. 1А) [Пахоруков, Четина, Еремченко, 2022]. Реакция почвенной среды варьировала от слабокислой ( $\text{pH}_{\text{вод}} = 6,0$ ) до слабощелочной ( $\text{pH}_{\text{вод}} = 7,8$ ). Карбонаты присутствовали в количестве 0,5-1,2% (табл. 2). Присутствия гипса в почвах не наблюдали. В составе обменных катионов преобладали ионы  $\text{K}^+$ , на долю натрия приходилось 16-26% ЕКО.



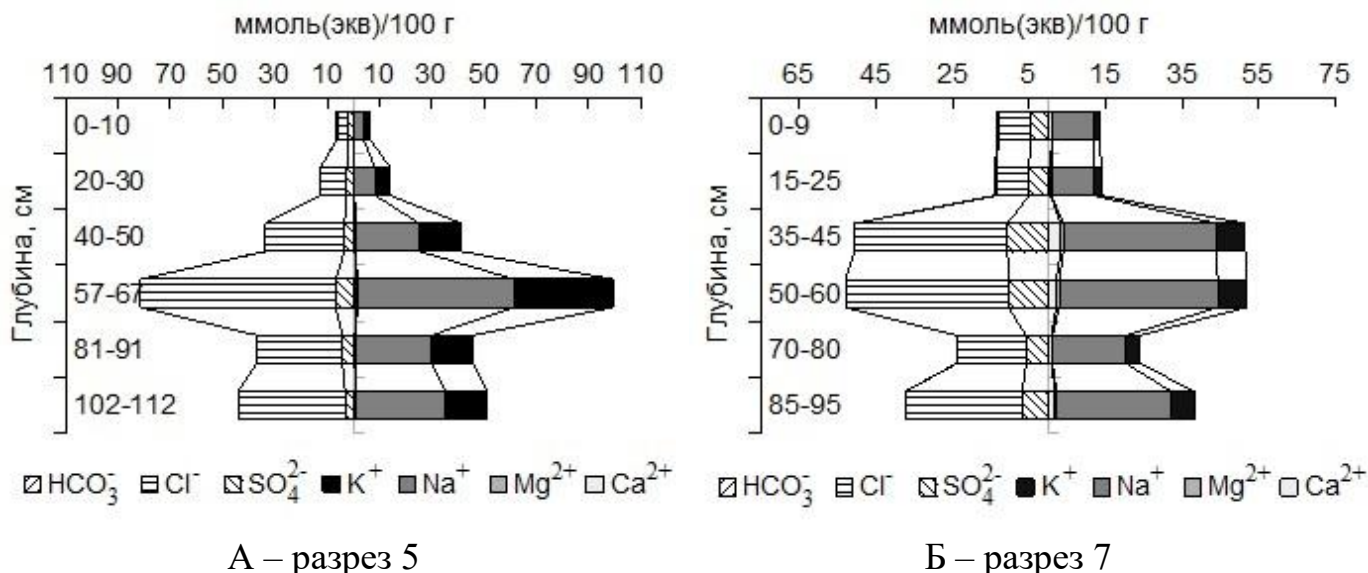


Рисунок 1 – Содержание ионов в водных вытяжках из аллювиальных почв долин рек Быгель (А) и Черная (Б)

### 3.3.2. Техногенно засоленные аллювиальные почвы в долине р. Черная

В долине р. Черная в местах разгрузки минерализованных грунтовых вод произошла трансформация почвенного покрова, и сформировались комплексы техногенно засоленных аллювиальных почв.

Верхняя часть гумусового горизонта аллювиальных почв, как правило, переплетена корнями. Горизонт АУ – бурый, суглинистый, сырой или влажный, часто вязкий и липкий с обилием ржавых пятен и примазок. Гумусовый горизонт постепенно, через горизонт АУ/С, переходит в темно-сизую с черными пятнами и полосами глеевую породу, содержащую множество слаборазложившихся растительных остатков. Вскипание почв не обнаружено.

В соответствии с современными классификациями аллювиальные гумусовые глеевые почвы этой долины являются солончаковыми средне- и сильнозасоленными (Gypsic Sodic Gleyic Fluvisols (Loamic, Salic)) и солончаками вторичными (Fluvic Sodic Gleyic Solonchak (Loamic, Chloridic, Hypersalic)); почвы имели преимущественно хлоридно-натриевый химизм (рис. 1Б).

Большинство исследуемых почв характеризовались нейтральной и слабощелочной реакцией среды, содержали карбонаты в количестве от 0,5 до 6,7% (табл. 2). Встречались почвы с кислой и слабокислой реакцией среды, в которых доля обменных  $H^+$  и  $Al^{3+}$  составляла 8-28% ЕКО, вероятно, актуальная кислотность унаследована от природных аллювиальных почв [Пахоруков, Еремченко, 2021]. Появление в техногенно засоленных глеевых почвах гипса (1-6%) может быть обусловлено сульфидогенезом. При установлении в почве аэробных условий  $H_2S$  может окисляться с образованием серной кислоты, которая вступит в реакцию с минеральной частью почвы. В случае, если почва содержит карбонаты кальция, то

Таблица 2 – Физико-химические и химические свойства аллювиальных солончаковых почв в долинах малых рек

№ разреза	Место отбора	Глубина, см	C <sub>орг</sub> , %	pH <sub>вод</sub>	pH <sub>сол</sub>	Обменные катионы, ммоль(экв)/100 г					ЕКО, ммоль(экв)/100 г	%	
						Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	H <sup>+</sup> +Al <sup>3+</sup>		CO <sub>2</sub> карб.	Гипс
5	Долина р. Быгель	0-10	2,73	6,51	5,27	0,80	1,28	4,64	13,67	2,07	22,46	0	0
		20-30	0,65	6,16	5,21	0,64	0,80	3,48	11,76	1,13	17,81	0	0
		40-50	-	5,95	5,55	0,80	0,96	3,97	17,39	1,69	24,81	0	0
		57-67	-	6,42	5,96	0,64	1,12	8,20	19,34	2,45	31,75	0	0
		81-91	-	6,78	6,15	0,80	0,96	3,81	15,07	0	20,64	1,18	0
		102-112	-	6,17	5,78	0,96	0,96	3,81	14,69	1,32	21,74	0	0
7	Долина р. Черная	0-9	1,18	7,2	7,1	3,36	1,6	2,61	2,36	0	9,93	2,08	4,52
		15-25	0,79	7,6	7,6	2,32	0,4	3,04	3,59	0	9,35	6,70	0
		35-45	-	6,2	6,0	1,84	0,88	6,61	7,03	2,68	19,04	0	0
		50-60	-	5,9	5,6	2,24	1,04	6,96	7,18	3,54	20,96	0	4,04
		70-80	-	6,7	6,4	2,24	0,8	4,52	5,13	1,10	13,79	0	0,69
		85-95	-	6,4	6,3	2,48	0,88	5,22	6,15	1,65	16,38	0	0,99
13	Долина р. Ленва	9-19	1,15	7,23	6,81	2,80	1,20	4,77	8,82	0	17,59	1,6	2,1
		25-35	1,43	6,83	6,57	2,00	0,76	4,59	7,71	0	15,06	1,6	1,3
		45-55	-	6,55	6,45	1,84	0,88	4,45	6,67	0	13,84	1,5	1,8
		63-73	-	6,41	6,29	1,76	0,76	3,83	6,30	0	12,65	1,2	1,8
19	Долина р. Ленва	0-5	0,42	3,34	3,14	3,68	2,72	2,70	0,35	30,34	39,79	0	4,13
		10-20	0,39	3,03	2,64	5,44	2,56	2,71	0,17	15,79	26,67	0	4,99
		25-35	-	2,94	2,61	7,04	2,88	4,05	0,35	14,96	29,28	0	4,99
		44-54	-	4,39	3,89	11,36	4,16	10,85	0,17	6,65	33,19	0	4,99
		60-70	-	4,81	4,21	11,68	3,20	11,13	0,35	4,16	30,52	0	5,42
		92-98	-	6,12	5,61	8,48	3,36	7,23	0,17	1,25	20,49	0	5,50
3	Долина р. Усолка	2-12	1,51	7,2	6,7	13,52	1,60	7,69	0,41	0	23,22	0,99	2,97
		12-22	1,28	6,8	6,5	11,12	1,48	9,04	0,48	0	22,12	0,89	2,92
		24-34	-	7,4	7,1	8,56	0,92	9,04	0,66	0	19,18	1,39	1,81
		55-65	-	7,7	7,5	9,32	0,96	9,04	0,66	0	19,98	1,19	2,11
		80-90	-	7,2	7,3	-	-	-	-	-	-	-	1,19

Примечание: (-) – не определялось.

они будут замещены гипсом [Перельман 1966; Глазовская, 2007; Rabenhorst et al, 2012].

### 3.3.3. Техногенно засоленные аллювиальные почвы в долине р. Ленва

В результате разгрузки подземных вод, фильтрующихся от шламохранилища БКПРУ-3, в речной долине сформировались преимущественно нейтрально-слабощелочные насыщенные и сильноокислые ненасыщенные аллювиальные солончаковые почвы и вторичные солончаки; обнаружен также вторичный соровой солончак.

В аллювиальных гумусовых глееватых солончаковых сильнозасоленных насыщенных почвах (Gipsiric Sodic Gleyic Fluvisol (Loamic, Ocric, Salic)) с преимущественно нейтрально-слабощелочной реакцией среды установлен хлоридный кальциево-натриевый / натриево-магниевый-кальциевый / магниевый-натриево-кальциевый химизм засоления (рис. 2А). Солончак соровой (Fluvic Gypsic Sodic Gleyic Solonchak (Loamic, Chloridic, Ochric, Hypersalic)) характеризовался калиево-натриевым сульфатно-хлоридным химизмом.

Аллювиальные почвы с преимущественно нейтрально-слабощелочной реакцией среды содержали карбонаты в количестве 1,2-1,6%. В составе обменных катионов доминировали  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$ ; в солончаке соровом содержание обменного калия достигало 50% ЕКО (табл. 2) [Еремченко, Pakhorukov, Shestakov, 2020].

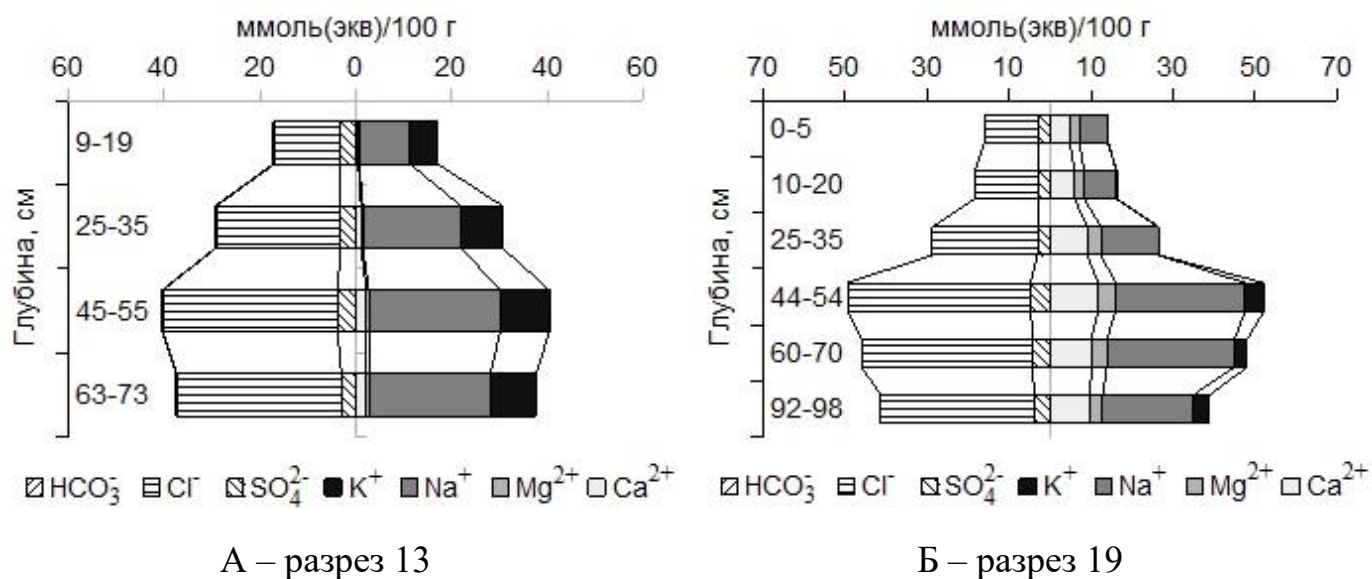


Рисунок 2 – Содержание ионов в водных вытяжках из аллювиальных насыщенных (А) и ненасыщенных (Б) почв долины р. Ленва

Аллювиальные гумусовые глеевые солончаковые сильнозасоленные ненасыщенные почвы (Sodic Gleyic Fluvisols (Loamic, Salic, Thionic)) с резкоокислой реакцией почвенной среды характеризовались хлоридным кальциевым и кальциево-натриевым химизмом засоления (рис. 2Б). Как правило, у этих почв рН был меньше 4 единиц; доля обменных  $\text{H}^+$  и  $\text{Al}^{3+}$  составляла от 6 до 77% от емкости катионного обмена. Почвы содержали гипс в количестве 2,5-5,5% (табл. 2).

### 3.4. Динамика полевой влажности, показателей рН и Eh в аллювиальных солончаковых почвах

В течение летне-осеннего периода 2022 г. в аллювиальной солончаковой насыщенной почве реакция почвенной среды колебалась в пределах 6,5-7,8 рН (рис. 3). В почве преобладали восстановительные условия (Eh от +200 мВ до –250 мВ). Согласно современных представлений [Ivarson et al, 1982; Kittrick et al, 1982; Pons et al, 1982; Fanning, 2017] в таких почвах имеется потенциал для образования сульфидов, а именно, присутствие сульфат-ионов, железосодержащих минералов и органического вещества. На редукцию железа указывает присутствие железистых новообразований в профиле техногенно засоленных почв. Черная окраска глеевых горизонтов и образование гидротроиллита в местах разгрузки засоленных подземных вод [Хайруллина и др., 2018] свидетельствуют о процессах восстановления серы с образованием сульфидных минералов.

В аллювиальных глеевых солончаковых ненасыщенных почвах реакция почвенной среды на глубине около 10-20 см колебалась в пределах 2,5-4,1 рН, одновременно чередовались окислительные и слабовосстановительные условия (Eh от –50 мВ до +550 мВ) (рис. 4) [Пахоруков, Еремченко, 2023].

Установлена регрессионная зависимость рН (y) от величины Eh (x) в аллювиальных почвах:  $y = 6,35 - 0,0068x$ ; коэффициент корреляции  $R = -0,84$ ; критерий Фишера  $F = 130$ ; уровень значимости  $P = 0,000$ . Считается, что изменения Eh резко влияют на реакцию среды в почвах, содержащих пирит, при окислении которого образуется серная кислота [Dent, 1993; Husson et al, 2000].

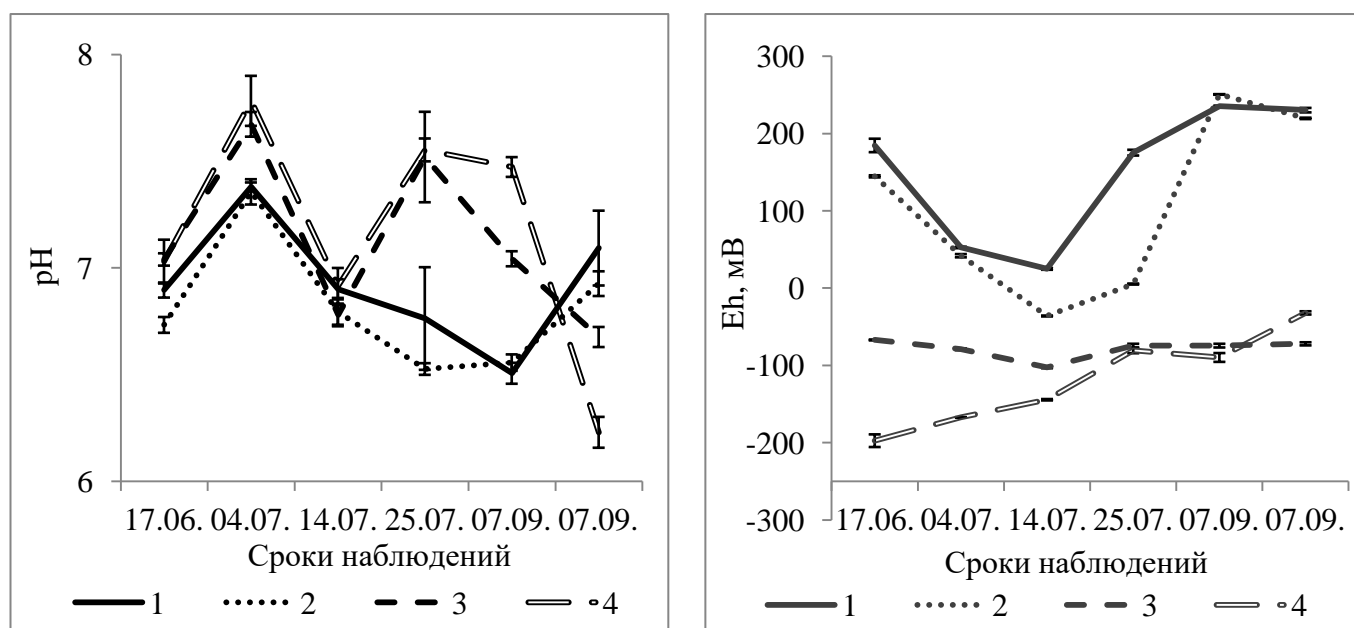


Рисунок 3 – Динамика рН<sub>вод</sub> и Eh в аллювиальной солончаковой насыщенной почве из долины р. Черная на глубине: 1 – 10±2 см; 2 – 20±2 см; 3 – 30±2 см; 4 – 40±2 см

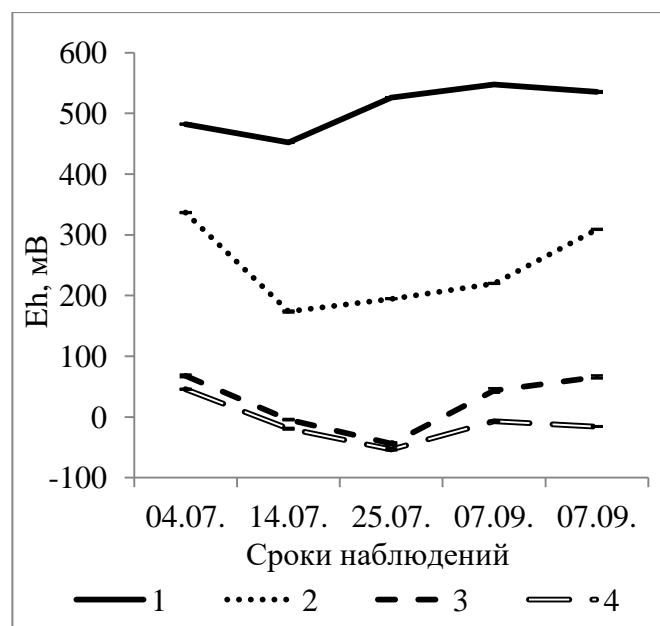
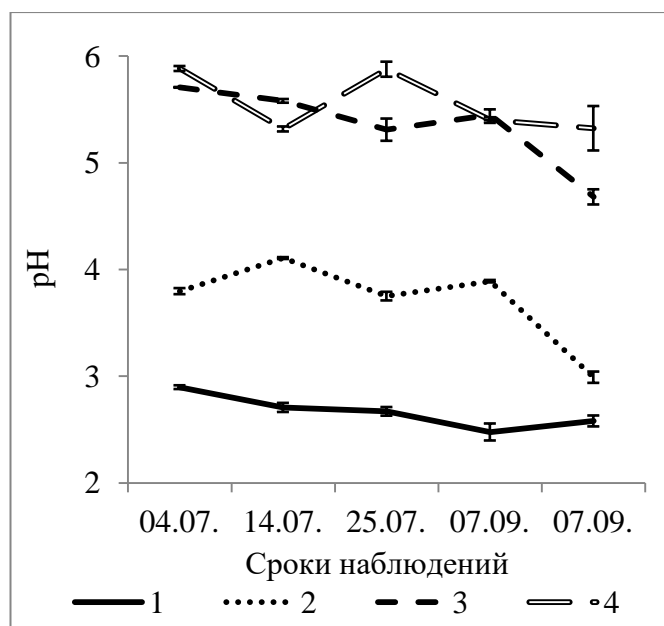


Рисунок 4 – Динамика  $pH_{\text{вод}}$  и  $Eh$  в аллювиальной солончаковой ненасыщенной почве (разрез 18) из долины р. Ленва на глубине: 1 –  $10 \pm 2$  см; 2 –  $20 \pm 2$  см; 3 –  $30 \pm 2$  см; 4 –  $40 \pm 2$  см

### 3.5. Распространение аллювиальных солончаковых почв и солончаков вторичных в долинах малых рек

На основе визуального дешифрирования космических снимков были выделены ареалы аллювиальных техногенно засоленных почв в долинах трех малых рек Прикамья. В долине малой р. Быгель в период с 2011 по 2013 гг. образовался участок с аллювиальными солончаковыми почвами площадью  $2027 \text{ м}^2$ . В долине р. Черная в период с 2015 г. по 2021 г. площадь солончаковых почв и вторичных солончаков увеличилась с 4,9 га (около 16% речной долины) до 8,7 га или 28% от общей площади речной долины (рис. 5). В обследованной нами части долины р. Ленва аллювиальные солончаковые почвы и солончаки вторичные под изреженной растительностью в 2015 г. занимали около 14 га (7,8% долины). В 2021 г. площадь аллювиальных солончаковых почв и вторичных солончаков выросла до 22,2 га, что соответствует 12,4% площади речной долины.

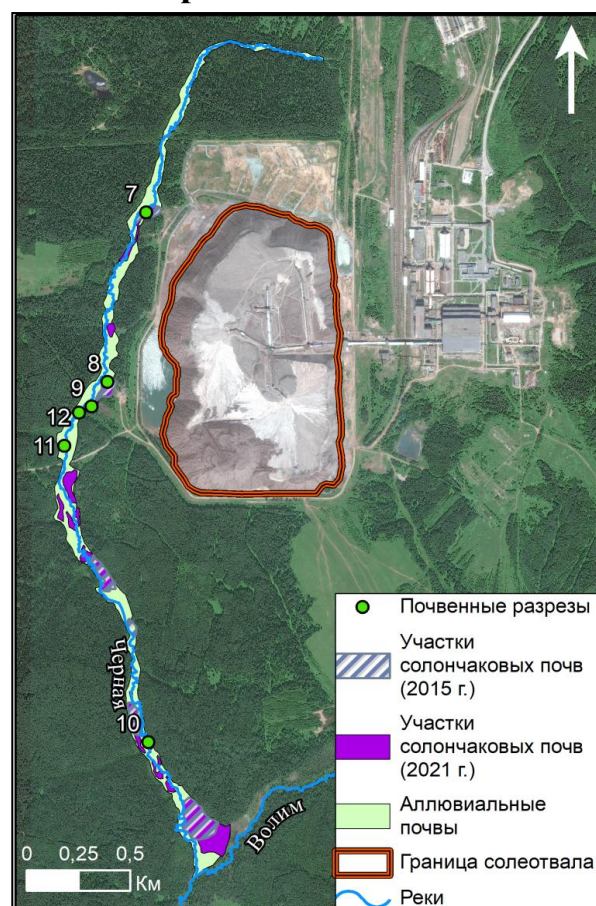


Рисунок 5 – Картосхема расположения аллювиальных солончаковых почв в долине р. Черная



### 3.6. Галогенез аллювиальных почв возле рассолоподъемных скважин XVI в.

В долине р. Усолка (рис. 6) под воздействием минерализованных (30-35 г/л) хлоридно-натриевых вод, изливающихся в течение нескольких столетий из рассолоподъемных скважин, сформировались комплексы аллювиальных гумусовых поверхностно глееватых солончаковых сильнозасоленных почв (Sodic Gleyic Fluvisols (Loamic, Salic)) и солончаков вторичных (Sodic Fluvic Gleyic Solonchak (Loamic, Hypersalic)).

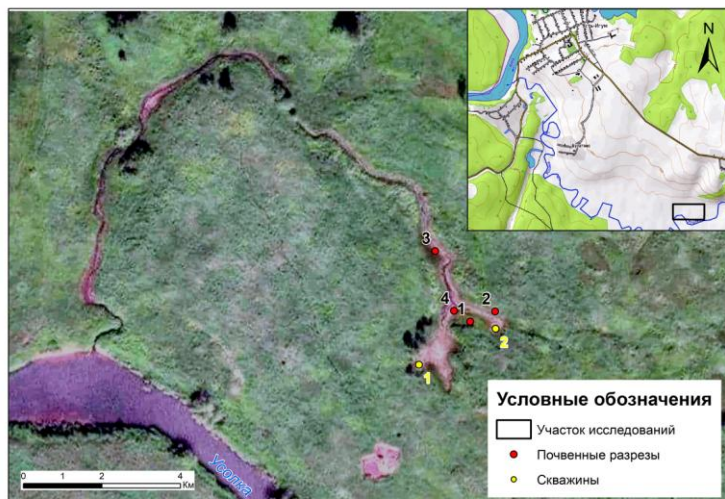


Рисунок 6 – Расположение почвенных разрезов в долине р. Усолка

В морфологическом профиле аллювиальных почв (рис. 7) присутствовали новообразования мелкокристаллического гипса, запах сероводорода и черная окраска, что позволяет утверждать, что в почвенном профиле развиваются процессы восстановления сульфатов до  $H_2S$  и образования сульфидов [Перельман 1966; Глазовская, 2007; Rabenhorst et al, 2012].

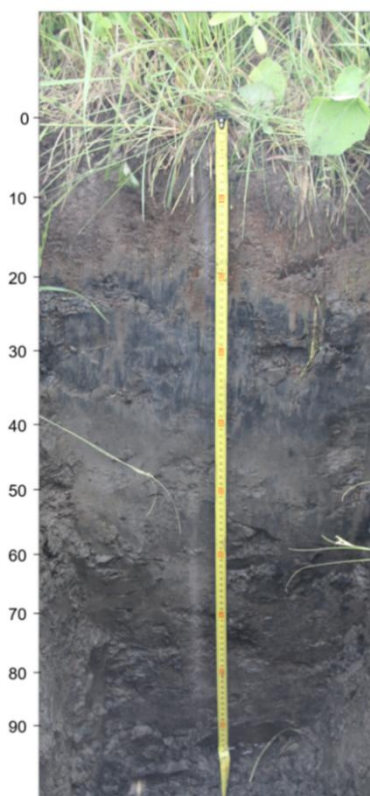


Рисунок 7 – Аллювиальная солончаковая почва (разрез 3) из долины р. Усолка

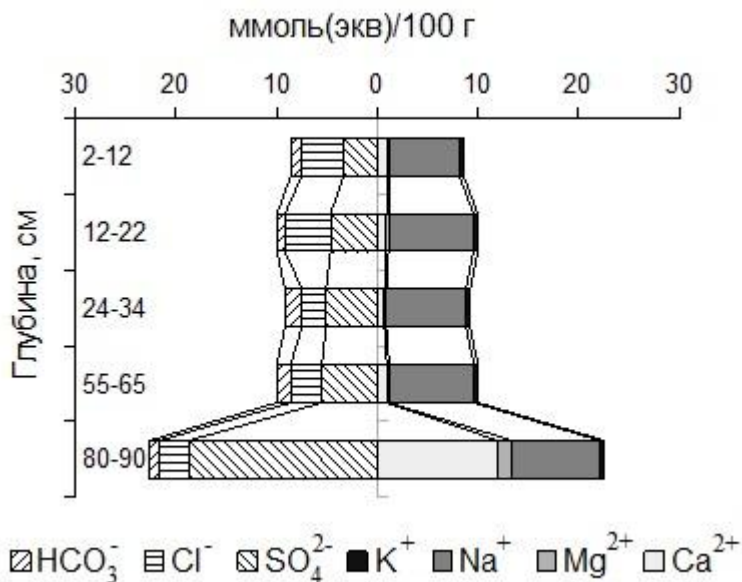


Рисунок 8 – Содержание ионов в водных вытяжках из аллювиальной почвы долины р. Усолка (разрез 3)

Аллювиальные почвы долины р. Усолка являются солончаковыми со средней и сильной степенью засоления; химизм засоления большинства почв по соотношению катионов – натриевый, по соотношению анионов – сульфатно-хлоридный (рис. 8). Почвы характеризуются нейтральной и слабощелочной реакцией почвенной среды. Доля  $\text{Na}^+$  в поглощающем комплексе гумусовых горизонтов колебалась в пределах 33-41%. Все почвенные горизонты содержали немного карбонатов (1-2,9%). Количество гипса находилось в пределах 1-3%, при наличии гипсовых стяжений возрастало до 11% (табл. 2) [Eremchenko et al, 2022].

### **3.7. Классификация техногенно засоленных аллювиальных почв**

В мировой корреляционной базе почвенных ресурсов [WRB, 2022] дополнительные квалификаторы Chloridic, Gypsic, Salic, Sodic обозначают признаки антропогенного происхождения, связанные с водной миграцией техногенных солей. Вслед за предложением использовать квалификатор Calcitechnic для обозначения карбонатов кальция техногенного происхождения [Hulisz et al, 2018], нам представляется логичным предложить использовать дополнительные квалификаторы Salictechnic, Chloridictechnic, Gypsictechnic, Sodictechnic для почв с аккумуляцией техногенных солей, хлоридных солей, гипса, а также насыщенных обменным натрием (более 15% от ЕКО).

## **ВЫВОДЫ**

1. В зонах складирования солевых отходов ПАО «Уралкалий» под воздействием минерализованных (6-111 г/л) хлоридно-натриевых грунтовых вод по аллювиальным серогумусовым поверхностно оглееным почвам долин малых рек Прикамья за период нескольких десятилетий сформировались солончаковые почвы и вторичные солончаки.

2. Разнообразие солончаковых аллювиальных почв и вторичных солончаков проявилось в степени засоления (средней, сильной или очень сильной), химизме засоления, преимущественно, хлоридном и сульфатно-хлоридном натриевом, реже калиево-натриевом, еще реже – равномешанном (Ca, K, Na). Карбонатные (от 0,5% до 6,7%) и гипсодержащие (от 1% до 19%) солончаковые почвы и солончаки встречались чаще, чем бескарбонатные и безгипсовые.

3. Аллювиальные солончаковые почвы существенно отличались по реакции почвенной среды и составу обменных катионов. В восстановительных условиях почвы характеризовались слабокислой или нейтрально-слабощелочной реакцией среды; в почвенном поглощающем комплексе преобладали  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$  (до 50-90% от ЕКО). В окислительных условиях ( $E_h=450-540$  мВ) в верхних горизонтах почв наблюдали резко кислую реакцию почвенной среды (менее 3-4 pH) и сильную ненасыщенность основаниями ( $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$  до 70% от ЕКО).

4. Эволюционные тренды в аллювиальных серогумусовых поверхностно глееватых почвах, испытывающих в течение нескольких столетий воздействие сильноминерализованных (30-35 г/л) хлоридно-натриевых вод, проявились в солончаковости, сильной и очень сильной степени засоления, сульфатно-хлоридном натриевом химизме, нейтрально-слабощелочной реакции среды (6,8-8,2 рН), в присутствии карбонатов (от 1 до 2,9%) и гипса (от 1-3 до 11%), средней и высокой насыщенности натрием (33-47% от ЕКО).

5. Установлено прогрессирующее засоление почвенного покрова в долинах малых рек Прикамья в результате разгрузки техногенных минерализованных вод. В долине р. Быгель солончаковые почвы появились после 2011 г., в 2021 г. их площадь составила около 0,2 га. В обследованной части долины р. Черная солончаковые почвы и солончаки вторичные занимали 17 га или 16% речной долины; за период 2015-2021 гг. их площадь увеличилась на 3,8 га. В долине р. Ленва площадь солончаковых почв и солончаков вторичных составляет 15 га или 8% территории речной долины; за период 2015-2021 гг. она увеличилась на 8,2 га.

#### **Основные положения диссертации опубликованы в работах:**

##### **Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Eremchenko, O.Z. Development of the Solonchak Process in Soils of Smal River Valleys in the Taiga-Forest Zone in Relation to the Production of Potassium Salts / O. Z. Eremchenko, **I. V. Pakhorukov**, I. E. Shestakov // Eurasian Soil Science. – 2020. – Vol. 53, № 4. – P. 512-522.

2. **Пахоруков, И.В.** Свойства вторично засоленных аллювиальных почв в таежно-лесной зоне Прикамья / И. В. Пахоруков, О. З. Еремченко // Сибирский лесной журнал. – 2021. – № 3. – С. 76-86.

3. **Пахоруков, И.В.** Накопление техногенных солей в аллювиальной почве и растениях в условиях южной тайги / И. В. Пахоруков, О. А. Четина, О. З. Еремченко // Russian journal of ecosystem ecology. – 2022. – Vol. 7, № 2. – P. 1-10.

4. Chetina, O.A. Accumulation of Low-Molecular-Weight Compounds in Plants in Response to Technogenic Soil Salinization / O. A. Chetina, O. Z. Eremchenko, **I. V. Pakhorukov** // Russian Journal of Ecology. – 2023. – Vol. 54, № 2. – P. 88-96.

5. **Пахоруков, И.В.** Динамика кислотно-щелочных и окислительно-восстановительных условий в аллювиальных техногенно засоленных почвах таежно-лесной зоны / И. В. Пахоруков, О. З. Еремченко // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2023. – № 4. – P. 1-17.

##### **Другие публикации**

6. **Пахоруков, И.В.** Физико-химические и химические свойства техногенно-засоленных аллювиальных почв / И. В. Пахоруков, Н. В. Митракова // Высокие



технологии, определяющие качество жизни: материалы 2-й Международной научной конференции. – Пермь. – 2018. – С. 100-102.

7. **Пахоруков, И.В.** Свойства почв, находящихся под влиянием соленых вод, изливающихся из рассолоподъемных скважин / И. В. Пахоруков // Симбиоз-Россия 2019: материалы XI Всероссийского конгресса молодых ученых-биологов с международным участием. – Пермь. – 2019. – С. 224-225.

8. Еремченко, О. З. Оценка экологического состояния засоленных, кислых и щелочных почв методом фитотестирования / О. З. Еремченко, Н. В. Москвина, Н. В. Митракова, А. Е. Колбик, **И.В. Пахоруков** // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. – 2019. – Вып. 1. – С. 63-71.

9. **Пахоруков, И.В.** Влияние шламохранилища на состав солей и обменных оснований в аллювиальных почвах таежно-лесной зоны / И. В. Пахоруков // Почва как система функциональных связей в природе: материалы Международной научной конференции XXII Докучаевские молодежные чтения. – Санкт-Петербург. – 2019. – С. 292-293.

10. **Пахоруков, И.В.** Состав обменных катионов вторично засоленных аллювиальных почв / И. В. Пахоруков // Симбиоз-Россия 2020: материалы XII Всероссийского конгресса молодых ученых-биологов с международным участием. – Пермь. – 2020. – С. 200-202.

11. Сюткина, Д.А. Техногенно-засоленные почвы и некоторые особенности адаптации растений в Пермском Прикамье / Д. А. Сюткина, **И. В. Пахоруков**, А. С. Куприна, О. А. Четина // Комплексные проблемы техносферной безопасности: материалы VII Международной научно-практической конференции. – Воронеж. – 2021. – С. 105-111.

12. **Пахоруков, И.В.** Химизм засоления аллювиальных почв в зонах воздействия солевых отходов / И. В. Пахоруков // Фундаментальные и прикладные аспекты биоинформатики, биотехнологии и недропользования: сборник статей Всероссийской научной конференции с международным участием. – Пермь. – 2021. – С. 93-95.

13. Малышкина, Е.Е. Свойства аллювиальных почв долины р. Чёрная, находящихся под воздействием солеотвала / Е. Е. Малышкина, **И. В. Пахоруков** // Фундаментальные и прикладные исследования в биологии и экологии: сборник статей по материалам региональной научной конференции. – Пермь. – 2022. – С. 73-75.

14. Малышкина, Е.Е. Характеристика техногенно засоленных аллювиальных почв долины р. Черная / Е. Е. Малышкина, **И. В. Пахоруков** // Актуальные проблемы биологии и экологии: материалы докладов XXIX Всероссийской молодежной научной конференции. – Сыктывкар. – 2022. – С. 104-105.

15. **Пахоруков, И.В.** Влияние техногенных соленых вод на кислотно-основные свойства аллювиальных почв таежно-лесной зоны Прикамья / И. В. Пахоруков // Симбиоз-Россия 2022: сборник статей XIII Международной конференции ученых-биологов. – Пермь. – 2023. – С. 578-582.

16. **Пахоруков, И.В.** Формирование солончаковых почв в долинах малых рек в условиях южной тайги / И. В. Пахоруков, О. З. Еремченко // Почвы и окружающая среда: материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 55-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН. – Новосибирск. – 2023. – С. 155-158.

Подписано в печать 11.11.2024 г.  
Печать цифровая. Усл. печ. 1,0 л.  
Бумага офсетная. Формат 60×84/16.  
Тираж 100 экз. Заказ № 614.

Типография "Здравствуй"  
г. Пермь, ул. Данщина, 7Д  
(342) 270-14-05  
hellobook@mail.ru