

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Пахоруков Иван Владимирович

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

1.5.19. Почвоведение

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Научный руководитель:

Доктор биологических наук, профессор

Еремченко Ольга Зиновьевна

Пермь – 2024

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	10
1.1. Генезис, свойства и классификация засоленных почв.....	10
1.1.1. Генезис и свойства засоленных почв	11
1.1.2. Классификации засоленных почв.....	15
1.1.3. Формирование и свойства техногенно засоленных почв	21
1.2. Образование, свойства и классификация аллювиальных почв	26
1.3. Сульфидогенез и общие представления о кислых сульфатных почвах	32
ГЛАВА 2. УСЛОВИЯ, ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	37
2.1. Природно-техногенные условия территории исследований.....	37
2.2. Объекты исследований	45
2.3. Методы исследований	52
ГЛАВА 3. РАЗВИТИЕ СОЛОНЧАКОВОГО ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ В АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ПОЧВАХ.....	55
3.1. Характеристика фоновых аллювиальных почв Вятско-Камской почвенной провинции	55
3.2. Ионно-солевой состав поверхностных и подземных вод, формирующихся под влиянием отходов отвалльно-шламового хозяйства	58
3.3. Характеристика техногенно засоленных аллювиальных почв	62
3.3.1. Техногенно засоленные аллювиальные почвы в долине р. Быгель.....	62
3.3.2. Техногенно засоленные аллювиальные почвы в долине р. Черная.....	71
3.3.3. Техногенно засоленные аллювиальные почвы в долине р. Ленва.....	92
3.3.3.1. Свойства аллювиальных солончаковых насыщенных почв	92
3.3.3.2. Свойства аллювиальных солончаковых ненасыщенных почв.....	106
3.4. Динамика полевой влажности, показателей рН и Eh в аллювиальных солончаковых почвах	116

3.5 Распространение аллювиальных солончаковых почв и солончаков вторичных в долинах малых рек.....	129
3.6 Галогенез аллювиальных почв возле рассолоподъемных скважин XVI в.....	137
3.7. Классификация техногенно засоленных аллювиальных почв	150
ВЫВОДЫ.....	153
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	155
Приложение А.....	179
Приложение Б.....	180
Приложение В.....	181
Приложение Г.....	183
Приложение Д.....	185
Приложение Е.....	186
Приложение Ж.....	187
Приложение З.....	188
Приложение И.....	189
Приложение К.....	190
Приложение Л.....	191
Приложение М.....	192

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследований. 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.

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

Основные задачи исследования:

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.

Методология и методы исследования. Методология исследований основана на классических и современных представлениях об эволюции засоленных почв. Программа и методика исследований включали комплекс методов полевого и лабораторного изучения почв. В полевых условиях изучены морфологические свойства, режимы влажности, pH и Eh. Лабораторные исследования проводились с использованием общепринятых и гостированных методов изучения генетических свойств почв. Используются цифровые технологии, методы статистического анализа.

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.

Степень достоверности результатов исследования обеспечивается значительным объемом фактического материала, применением общепринятых аналитических и инструментальных методов исследований. Результаты исследований и их интерпретация, соотносятся с экспериментальными и аналитическими данными других авторов.

Апробация работы и публикации. 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).

По теме научно-квалификационной работы опубликовано 16 работ, в том числе 3 – в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 – в изданиях Scopus и Web of Science.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 192 страницах печатного 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 объем лабораторных работ по анализу почвенных образцов и проб воды, обработке и систематизации полученных данных, их интерпретации. Подготовка к печати научных работ осуществлялась как самостоятельно, так и при участии соавторов.

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, а также за

предоставление некоторых рисунков, использованных в настоящей работе.
Автор благодарит за помощь, ценные советы и замечания сотрудников ИПА
СО РАН.

Глава 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1. Генезис, свойства и классификация засоленных почв

Большинство исследователей к засоленным относят почвы, в жидкой и твердой фазах которых содержатся легкорастворимые соли в количестве, снижающем плодородие почв, отрицательно влияющем на рост и развитие растений-негалофитов [Почвоведение, 1988; Панкова и др., 1996; Засоленные почвы..., 2006; Панкова, Горохова, 2020]. К легкорастворимым относят соли, растворимость которых превышает растворимость гипса [Почвоведение, 1988]. По USDA Agriculture Handbook [Diagnosis..., 1954], к засоленным относят почвы, удельная электрическая проводимость фильтратов из паст которых выше 2–4 мСм/см ($t=25^{\circ}\text{C}$).

Разделение засоленных и незасоленных почв проводят по показателям порога токсичности легкорастворимых солей, установленного для среднесолеустойчивых культур. За рубежом главным показателем засоленности почв является удельная электропроводность (мСм/см, дСм/м), определяемая в фильтратах из насыщенных водой паст. В России наиболее распространен метод водной вытяжки. По данным водных вытяжек (1:5), приняты следующие пороги токсичности (по сумме солей): для почв хлоридного и сульфатно-хлоридного засоления – 0,1%, для почв хлоридно-сульфатного засоления – 0,2%, для почв сульфатного засоления – 0,3% (с участием гипса – до 1,0%), а для почв, засоленных щелочными солями, – 0,1–0,15% [Классификация и диагностика..., 2004]. В странах Европы и США в качестве порога токсичности используют удельную электропроводность фильтратов из насыщенных водой почвенных паст, равную 2–4 мСм/см [Diagnosis..., 1954].

Среди засоленных почв выделяют две крупные группы: 1) почвы, засоленные нейтральными солями (хлоридами и сульфатами) и 2) почвы, засоленные гидролитически щелочными солями – преимущественно содой [Szabolcs, 1989; Воробьева, Панкова, 2008].

1.1.1. Генезис и свойства засоленных почв

Общими признаками засоленных почв служат: 1) формирование в аккумулятивных или палеоаккумулятивных ландшафтах, 2) участие в почвообразовании (постоянно, либо на какой-то стадии развития) водорастворимых солей при высокой концентрации почвенных растворов, 3) неблагоприятные условия существования растений, за исключением галофитов, за счет присутствия в той или иной части профиля высокой концентрации почвенных растворов, либо высокой щелочности [Ковда, 1946; Почвоведение, 1988; Засоленные почвы..., 2006; Хитров, 2016; Панкова и др., 2018; Иванищев и др., 2020].

Условия аккумуляции солей в почвах. Для формирования засоленных почв необходимо наличие двух процессов – образование свободных солей в ландшафте и накопление их в почве. Основные источники солей в почвах – это разрушающиеся под воздействием выветривания горные породы, соленосные горные породы разного происхождения, извержения вулканов, эоловый перенос солей с моря на сушу.

Непосредственным источником солей в природных почвах служат почвенно-грунтовые воды, если они испаряются физически или через корневую систему растений при достаточно близком залегании.

Если количество осадков превышает количество испаряемой влаги, соленакопление в природных почвах невозможно, так как, вместе с атмосферной влагой, соли выносятся за пределы почвенного профиля. Соли могут аккумулироваться в природных почвах лишь в том случае, если испаряемость преобладает над количеством осадков [Ковда, 1946; Почвоведение, 1988; Перельман, 1999; Franzen et al, 2003; Засоленные почвы..., 2006; Хитров, 2016; Иванищев и др., 2020].

В зависимости от увлажненности климата накапливаются разные соли. В условиях более влажного климата аккумулируются менее растворимые соли, по мере усиления сухости климата накапливаются все более

растворимые соли. На начальных стадиях слабого засоления накапливаются сода, при усилении степени засоления на первое место выходят сульфаты, затем хлориды.

Соленакпление развивается в почвах отрицательных форм рельефа, где может быть обеспечен накопительный баланс веществ [Ковда, 1946; Почвоведение, 1988; Перельман, 1999; Franzen et al, 2003; Засоленные почвы..., 2006; Иванищев и др., 2020].

Свойства засоленных почв. Засоление может проявляться в разных типах почв на разном таксономическом уровне. Но в особую группу выделяются солончаки, у которых в верхней части почвенного профиля выделяется горизонт максимального скопления солей; и солонцы, в которых, помимо солевого горизонта, выделяется еще и солонцовый горизонт, обладающий специфическими свойствами [Бреслер и др., 1987; Засоленные почвы..., 2006].

Солонцы, как и солончаки, не образуют какой-то почвенной зоны, а встречаются либо крупными массивами, либо пятнами среди почв другого генезиса.

Главное свойство, по которому диагностируются солончаки, – высокое содержание солей (более 1%) с поверхности. Солонцы – это почвы, засоленные на глубине, легкорастворимые соли содержатся в подсолонцовом и глубоколежащих горизонтах.

Профиль солончаков не дифференцирован по валовому содержанию, по гранулометрическому, минералогическому или химическому составу, если только дифференциация не связана с неоднородностью почвообразующей породы. Профиль солонцов же четко дифференцирован по валовому, гранулометрическому и минералогическому составу.

Реакция хлоридных и сульфатных солончаков – нейтральная; содержащих в составе солей соду – щелочная (до 9-10). Крайне редко встречаются и кислые солончаки. Реакция почвенного раствора в нижней

части профиля солонцов щелочная, в надсолонцовом горизонте может быть нейтральной и слабокислой.

От типа засоления и реакции среды будут зависеть и водно-физические свойства. Солончаки, засоленные нейтральными солями, обладают хорошими водно-физическими свойствами, поскольку высокое содержание нейтральных солей обеспечивает коагуляцию коллоидов, микроструктурность и соответственно достаточно высокую пористость и водопроницаемость. Солончаки, засоленные щелочными солями, исключительно неблагоприятны по своим свойствам, так как щелочная реакция среды обуславливает пептизацию коллоидов, слитость почвенной массы.

Солонцы обладают плохими водно-физическими свойствами. Солонцовый горизонт отличается высокой вязкостью и липкостью, сильно набухает во влажном состоянии и уплотняется и твердеет при иссушении. В целом солонцы характеризуются низкой пористостью и водопроницаемостью, слабой физиологической доступностью влаги [Ковда, 1946; Бреслер и др., 1987; Почвоведение, 1988; Засоленные почвы..., 2006].

Генезис засоленных почв. Природное засоление почв проявляется в климатических условиях с коэффициентом увлажнения менее 1,0 [Ковда, 1937, 1946; Почвоведение, 1988; Засоленные почвы..., 2006]. В областях гумидного и резкоконтинентального климата ареалы в той или иной степени засоленных гидроморфных почв образуются на выходах минеральных источников и при близком залегании высокоминерализованных грунтовых вод [Лопатовская и др., 2011; Парамонова и др., 2017; Симонова и др., 2018; Хитров и др., 2019; Лопатовская, 2020; Черноусенко и др., 2017; Симонова, 2023].

Солончаковый процесс в классическом виде – это накопление в верхней части профиля почвы легкорастворимых в воде солей. Солончаковый процесс развивается при выпотном водном режиме, когда

количество выпадающих осадков меньше способности почвы и растений расходовать влагу [Ковда, 1937, 1946; Ямнова и др., 2005; Засоленные почвы..., 2006; Почвообразовательные процессы, 2006; Родикова, 2007; Черноусенко и др., 2011; Özcan et al., 2018].

Образование солонцов происходит в результате комплексного проявления нескольких почвообразовательных процессов: солонцовый, осолодение, элювиально-иллювиальная дифференциация профиля почвы, дерновый, выщелачивание. *Солонцовый процесс* связан с внедрением в почвенный поглощающий комплекс обменных ионов натрия. При этом происходит подщелачивание среды до рН около 9 в связи с появлением в почвенном растворе соды. *Осолодение*, или щелочной гидролиз, представляет собой разрушение минеральной части под воздействием щелочных растворов. *Элювиально-иллювиальная дифференциация профиля* почвы происходит под воздействием нисходящих токов атмосферной влаги. Возникает интенсивный вынос веществ, представленных в преобладающей массе органоминеральными коллоидами гидроксидов железа и алюминия с гуминовыми веществами. Это приводит к относительному накоплению в верхнем элювиальном горизонте кремнезема и формированию уплотненного глинистого иллювиального горизонта, обогащенного полуторными оксидами. Таким образом, в солонцах образуется резко дифференцированная по составу и свойствам почвенная толща [Ковда, 1946; Бреслер и др., 1987; Почвоведение, 1988; Засоленные почвы..., 2006; Почвообразовательные процессы, 2006; Воробьева, Панкова, 2008; Сеньков, Попов, 2017].

Выщелачивание и миграция легкорастворимых солей под воздействием нисходящих токов воды приводят к освобождению элювиально-иллювиальной почвенной массы от легкорастворимых солей и формированию ниже этой толщи солевых горизонтов скопления карбонатов, гипса, хлоридов кальция, магния, натрия, сульфатов магния и натрия. В связи с непромытым водным режимом все соли остаются заключенными в

солевом профиле солонца и не мигрируют за его пределы. *Дерновый процесс* ослаблен и охватывает только элювиальную толщу солонцов [Ковда, 1946; Бреслер и др., 1987; Почвоведение, 1988; Засоленные почвы..., 2006; Почвообразовательные процессы, 2006; Сеньков, Попов, 2017].

Анализ засоленных почв РФ показал, что по доминирующим катионам преобладает натриевый (38,6%) и натриево-магниевый (34,5%) химизм засоления. На почвы с кальциевым, наряду с разносмешанным (равная доля Ca, Mg, Na), химизмом засоления приходится лишь около 2% [Черноусенко, Хитров, 2023]. Калиевый химизм засоления отсутствует.

1.1.2. Классификации засоленных почв

Современное положение в почвоведении характеризуется тем, что:

- 1) отсутствует единая общепринятая система классификации почв мира,
- 2) отсутствует общепринятый принцип научной классификации почв мира,
- 3) практически во всех странах мира, особенно в тех, где исторически сложились развитые научные школы и имеется достаточно квалифицированных кадров почвоведов, существуют своеобразные национальные системы классификации почв, основанные на различных подходах [Прокофьева и др., 2014].

Классификационная проблема является одной из наиболее сложных теоретических проблем большинства естественных наук. Сложность классификационной проблемы в почвоведении определяется спецификой почвы. Почва, по современным представлениям, – это биокосная, многофазная, полидисперсная, многокомпонентная, гетерохронная, термодинамически открытая природная система, являющаяся функцией многих факторов почвообразования. Следовательно, можно выделить ряд различных признаков и свойств почв, на основании которых возможно построение их классификации – от петрографического состава породы до

режимов биогеохимических процессов, определяющих развитие и эволюцию почв [Добровольский, Трофимов, 1996; Прокофьева и др., 2014].

В настоящее время российские ученые-почвоведы чаще всего пользуются тремя классификациями, основанными на различных критериях классификации почв: Классификация и диагностика почв СССР [1977], Классификация и диагностика почв России [2004], World reference base for soil resources [2022].

Классификация и диагностика почв СССР

По своей методологической сущности данная классификация является эколого-генетической, учитывающей в диагностике условия почвообразования.

Солончаки. В рамках данной классификации солончаки подразделяются на тип автоморфных солончаков, образовавшихся на засоленных породах, и на тип гидроморфных солончаков, сформировавшихся под влиянием засоленных почвенно-грунтовых вод. По стадиям перехода от солончака к зональной почве автоморфные солончаки делятся на два подтипа: типичные и отакыренные. Тип гидроморфных солончаков разделяется на: типичные, луговые, болотные, соровые, грязево-вулканические и бугристые подтипы.

Далее солончаки делятся на роды по химизму засоления, а также по источникам засоления (литогенные, древнегидроморфные, биогенные). Разделение солончаков на виды производится: 1) по характеру распределения солей в профиле (поверхностные, и глубокопрофильные); 2) по морфологии поверхностного горизонта (пухлые, отакыренные, выцветные, корковые, черные, мокрые) [Классификация и диагностика..., 1977].

Солонцы. По характеру водного режима солонцы делятся на три типа: солонцы автоморфные, полугидроморфные и гидроморфные. Подтипы солонцов выделяются в зависимости от расположения в той или иной биоклиматической зоне (черноземные, каштановые, полупустынные, лугово-

черноземные, лугово-каштановые, полугидроморфные мерзлотные, черноземно-луговые, каштаново-луговые, луговые мерзлотные, лугово-болотные). Солонцы делятся на роды по глубине залегания солей, по химизму и степени засоления: 1) разделение солонцов на солончаковые, солончаковатые, глубокосолончаковатые и глубокозасоленные с указанием химизма (типа) засоления; 2) по степени засоления почвы подразделяются на слабо-, средне-, сильно- и очень сильно засоленные; 3) по химизму засоления выделяются солонцы с хлоридным и сульфатно-хлоридным, хлоридно-сульфатным и т.д. химизмом засоления.

Разделение солонцов на виды производится по мощности надсолонцового горизонта, содержанию обменного натрия в солонцовом горизонте и по структуре солонцового горизонта [Классификация и диагностика..., 1977].

Классификация и диагностика почв России

Данная классификация является субстантивно-генетической, т.к. в основе ее диагностики преобладают свойства самих почв. Условия и факторы почвообразования практически исключаются из диагностики [Тонконогов и др., 2008].

В классификации засоленные почвы входят в ствол постлитогенных почв, объединяющий почвы, в которых процесс почвообразования идет на сформировавшейся почвообразующей породе. Солончаки и солонцы относятся к двум разным отделам; солончаки относятся к отделу галоморфных почв, а солонцы – к отделу щелочно-глинисто-дифференцированных почв.

Солончаки. К отделу галоморфные почвы относятся почвы, главным диагностическим признаком которых является поверхностный солончаковый (солевой) горизонт. Специфика выделения солончакового горизонта (наличие определенного количества солей) служит причиной объединения в отдел галоморфных почв с различным строением профиля.

Типы солончаков выделяются в зависимости от характера солончакового горизонта. Кроме того, выделяется особая группа вторичных солончаков, образующихся в результате поверхностной аккумуляции солей в любом сформированном профиле. Отдел включает в себя три типа: солончаки глеевые, солончаки сульфидные, солончаки вторичные [Полевой определитель почв, 2008]. В варианте классификации и диагностики почв России, представленной на сайте почвенного института им. В.В. Докучаева [URL: <http://soils.narod.ru/index.html> (дата обращения 12.04.2023)] в отделе галоморфных почв выделяется четыре типа: солончаки, солончаки глеевые, солончаки сульфидные (соровые), солончаки вторичные.

Тип солончаки сульфидные представлен только одним подтипом – типичные.

По признакам оглеения, присутствию такырной корки, особенностям дифференциации профиля тип солончаки делится на 4 подтипа: типичные, такыровидные, солонцеватые и слабодифференцированные (литогенные).

Тип солончаки глеевые по признакам оглеения, присутствию такырной корки, особенностям дифференциации профиля делится на 3 подтипа: типичные, такыровидные и солонцеватые.

Разделение типа солончаки вторичные на подтипы проводится по особенностям вторично-засоленного профиля.

Солонцы. Отдел щелочно-глинисто-дифференцированных почв объединяет почвы, в профиле которых обязательно присутствует солонцовый или темносолонцовый горизонты.

Солонцы разделяют на типы по характеру поверхностного (солонцово-элювиального, тёмногумусового или светлогумусового) горизонта, его сочетаний с тёмносолонцовым или солонцовым горизонтами, а также по наличию в профиле квазиглеевого горизонта. Отдел включает в себя 8 типов природных почв: солонцы темные, солонцы светлые, солонцы темные квазиглеевые, солонцы светлые квазиглеевые, солонцы светлогумусовые,

солонцы темногумусовые, солонцы светлогумусовые квазиглеевые, солонцы темногумусовые квазиглеевые [Полевой определитель почв, 2008; URL: <http://soils.narod.ru/index.html> (дата обращения 12.04.2023)].

По наличию признаков гидр метаморфизма, механического нарушения системы надсолонцовых горизонтов типы солонцов темных, солонцов светлых, солонцов темногумусовых и солонцов светлогумусовых делятся на 3 подтипа: типичные, гидр метаморфизованные, турбированные. В типах солонцов темных квазиглеевые, солонцов светлых квазиглеевые, солонцов светлогумусовых квазиглеевых и солонцов темногумусовых квазиглеевых кроме типичного, выделяется подтип по механическим нарушениям поверхностных горизонтов (поверхностно-турбированный).

Засоленные почвы делятся на роды по следующим показателям: 1) по наличию в почвенном профиле карбонатов: карбонатосодержащие и бескарбонатные; 2) по химизму засоления – по соотношению катионов (натриевый, магниевый, магниевый-кальцевый и т.д.) и анионов (хлоридный и сульфатно-хлоридный, хлоридно-сульфатный и т.д.); 3) по насыщенности почвенного поглощающего комплекса основаниями (% от суммы обменных оснований) – ненасыщенные (<80) и насыщенные (>80); 4) по наличию в почвенном профиле карбонатов – карбонатосодержащие и бескарбонатные; 5) по наличию в почвенном профиле гипса – гипссодержащие (присутствие гипса в почвенном профиле >1%) и безгипсовые (гипс в профиле отсутствует).

Разделение засоленных почв на виды производится: 1) по мощности надсолонцового горизонта в типах солонцов – корковые (<5 см), мелкие (5-10 см), средние (10-20 см), глубокие (>20 см); 2) по содержанию обменного натрия в солонцовом горизонте солонцов – слабонатриевые (до 10% от ЕКО), малонатриевые (10-25% от ЕКО), средненатриевые (25-40% от ЕКО) и многонатриевые (>40% от ЕКО); 3) по глубине залегания карбонатов – карбонатные (<30 см), высоко карбонатные (30-50 см), среднекарбонатные

(50-80 см), глубоко карбонатные (80-120 см); 4) по глубине залегания солевого горизонта – солончаковые (0-30 см), солончаковатые (30-80 см), глубокосолончаковатые (80-150 см), глубокозасоленные (>150 см); 5) по степени насыщенности почвенного поглощающего комплекса (% от суммы обменных оснований) – сильноненасыщенные (<30), ненасыщенные (30-50), слабонасыщенные (50-80), насыщенные (>80); 6) по степени засоления почв (слабая, средняя, сильная, очень сильная), в зависимости от химизма засоления (хлоридный, сульфатный, содовый, содово-хлоридный и т.д.).

Мировая реферативная база почвенных ресурсов (WRB)

Система WRB также, как и классификация и диагностика почв России [2004], является примером субстантивно-генетического подхода в классификации почв [World reference base..., 2022].

В данной классификации засоленные почвы объединены в 2 реферативные почвенные группы: *Solonchaks* и *Solonetz*. Реферативная почвенная группа *Solonchaks* объединяет почвы с горизонтом *salic*, верхняя граница которого находится на глубине ≤ 50 см от поверхности, при этом почвы не должны иметь горизонта *thionic*, начиная с глубины ≤ 50 см от поверхности, и не находиться в зонах постоянного затопления или морских приливов. Горизонт *salic*, являющийся диагностическим для данной реферативной группы, представляет собой поверхностный или близко залегающий к поверхности горизонт с педогенным накоплением легкорастворимых солей, т.е. солей, более растворимых, чем гипс.

Реферативная почвенная группа *Solonetz* объединяет почвы с горизонтом *natric*, находящимся в толще ≤ 100 см от поверхности почвы. Горизонт *natric* – плотный срединный горизонт с более высоким содержанием ила по сравнению с вышележащим горизонтом или горизонтами; имеет повышенное содержание обменного натрия, а в некоторых случаях – магния.

Кроме того, в данной классификации имеется возможность отмечать засоление в других почвенных реферативных группах при помощи главных и дополнительных квалификаторов *Natric (na)* и *Salic (sz)*.

1.1.3. Формирование и свойства техногенно засоленных почв

Если тема влияния естественного засоления на почву хорошо изучена и отражена в монографиях и учебных пособиях, то работ по техногенному засолению почв сравнительно немного. Большинство проанализированных работ посвящено солевому загрязнению при нефтедобыче [Соромотин, 1996; Ронжина, 2009], проблемам применения антигололедных покрытий [Москвина, 2004; Ramakrishna et al., 2005; Никифорова и др., 2017; Азовцева и др., 2018]. Вторичное засоление почв связано с производством солей, в частности соды [Grunewald et al., 2007; Hulisz et al., 2010]. В Польше вблизи от Иновроцловского содового завода и его прудов-отстойников с отходами производства засоленные почвы образовались на площади 135 га [Hulisz et al., 2010; Хулиш и др., 2018].

Поступление пластовых вод на поверхность приводит к формированию засоленных почв, с различным типом распределения легкорастворимых солей в профиле почв [Гайнутдинов и др., 1979; Baker, Brendecke, 1983; Солнцева, 1998]. Как правило, зона аккумуляции легкорастворимых солей приурочена к ядру ореола загрязнения, а по мере продвижения к краевым частям разлива концентрации снижаются. В радиальном распределении максимальные значения характерны для верхней части профиля почв [Солнцева, 1998, 2004].

В природных условиях накопление солей в почвах возможно в том случае, если испаряемость преобладает над количеством осадков, что соответствует условиям аридного климата. Между тем, появились работы по влиянию выходов минеральных источников и близко залегающих высокоминерализованных грунтовых вод на почвенный покров тайги и

лесостепи, где они становятся фактором формирования засоленных интразональных почв [Лопатовская, 2009; Лопатовская и др., 2011; Якимов и др., 2014; Рамамонова и др., 2017; Хайрулина и др., 2017; Симонова и др., 2018; Хитров и др., 2019].

Накопление солей в почвах гумидных территорий определяется не только их высокой концентрацией в загрязнителях, но и систематическим поступлением высокоминерализованных вод в ландшафт, а также природными факторами: заболоченностью и/или слабой дренированностью почв. В работах Н.П. Солнцевой [1998, 2004] отмечается, что в районах нефтедобычи при техногенном засолении в составе солей доминируют хлориды, много сульфатов и карбонатов. Наиболее распространено хлоридно-натриевое засоление, однако состав солей, равно как их содержание и пути миграции в ландшафтах, крайне динамичны.

Высокая миграционная способность солей, оказавшихся в почвах достаточного или избыточного увлажнения, определяет динамичность техногенного засоления во времени. Непосредственно после попадания на поверхность почвенного покрова соли концентрируются в верхних горизонтах почв, постепенно распространяясь вглубь. Существенно изменяется количество и состав солей, как во времени, так и по почвенному профилю. Все это объясняет сложность процесса техногенного засоления, мозаичность его пространственных проявлений и разнообразие формирующихся химически-трансформированных почв.

В процессе техногенного засоления почв гумидных ландшафтов происходит перестройка почвенного поглощающего комплекса (ППК), впервые выявленная для дерново-подзолистых почв на нефтепромыслах Пермского Прикамья и впоследствии подтвержденная для ряда почв севера Западной Сибири [Солнцева, 1998, 2004].

После сброса в почвы сырой нефти или других загрязнителей с высоким содержанием легкорастворимых солей свойства ППК меняются следующим образом:

- сумма поглощенных катионов может возрастать в 1,3-1,5 раза;
- в ППК внедряются ионы натрия, при одновременном увеличении содержания катионов кальция и магния. Среднее содержание поглощенного натрия в почвах составляет 8-10% от емкости катионного обмена. В исключительных случаях содержание поглощенного натрия может достигать 45-80%;
- в тундрово-глеевых, подзолистых и дерново-подзолистых почвах происходит активное вытеснение ионов водорода и алюминия из ППК;
- увеличивается щелочность (рН водных суспензий достигает значений 7,8-8,3).

Повышение содержания поглощенного натрия в техногенных почвах может служить показателем развития солонцового почвообразовательного процесса. Как известно, в фоновых дерново-подзолистых почвах гумидных ландшафтов этот процесс невозможен [Солнцева, 2004].

В 2001 г. и 2003 г. на территории Красноборского нефтяного месторождения Калининградской области произошли разливы высокоминерализованных пластовых вод, что привело к техногенной трансформации почвенного покрова. Поступление пластовых вод в дерново-подзолистые почвы привело к их геохимической трансформации в почвы засоленного ряда с содержаниями легкорастворимых солей более 1%. В результате ионного обмена изменился состав легкорастворимых солей с гидрокарбонатно-кальциевого на хлоридный магниево-кальциево-натриевый. Аварийный разлив пластовых вод привел к формированию комплекса засоленных почв. Почвы в центре ореола загрязнения были представлены солончаками на техногенных наносах по дерново-подзолистой маломощной

среднесуглинистой сильнозасоленной почве на карбонатной морене. Для зоны средних воздействий были характерны дерновые или дерново-глеевые средне и сильнозасоленные среднесуглинистые почвы на карбонатной морене. В краевых частях разливов, где техногенная трансформация почв минимальна – формируются незасоленные дерново-подзолистые среднесплошные среднесуглинистые почвы на карбонатной морене. При поступлении высокоминерализованных пластовых вод в кислые почвы произошел обмен натрия почвенного раствора на водород и алюминий в ППК. Это привело к снижению обменной кислотности и к росту кислотности почвенного раствора. Миграция подкисленных растворов в карбонатную толщу привела к растворению карбонатов и снижению глубины их залегания. Увеличение содержания иона кальция в составе почвенного раствора при росте рН создали условия для новообразования карбоната кальция [Ронжина, 2011].

В южной тайге Западной Сибири под воздействием артезианских минерализованных вод хлоридно-натриевого состава получил развитие солончаковый процесс. За двадцатипятилетний период воздействия подземных вод почвы первой надпойменной террасы и высокой поймы трансформировались в солончаки хлоридно-натриевые со слабощелочной и щелочной реакцией, а также сформировались засоленные варианты дерново-глееватых почв. Морфологическое строение сформировавшихся солончаков отличается от фоновых почв слабой дифференциацией на генетические горизонты и сохраняет реликтовые признаки гумусовых и иллювиальных горизонтов. В пределах низкой поймы аллювиальные луговые кислые слоистые почвы трансформировались в аллювиальные луговые насыщенные слоистые солончаковые слабозасоленные и сильнозасоленные почвы [Сванидзе и др., 2014; Якимов и др., 2014].

В таежно-лесной зоне Пермского края ведется добыча калийных удобрений, поэтому многие из проанализированных работ посвящены

проблеме засоления компонентов природной среды [Бабошко, Бачурин, 2004; Максимович и др., 2010; Еремченко и др., 2013; Лискова, 2017; Хайрулина и др., 2017]. В работах по влиянию производства калийных солей на окружающую среду, как правило, внимание уделяется проблеме состояния поверхностных и подземных вод [Бабошко, Бачурин, 2004; Белкин, 2008, Голубцова, Карманова, 2015; Лискова, 2017; Хайрулина и др., 2017; Шейкман, Ивлева, 2023].

Объекты отвально-шламового хозяйства являются постоянным источником загрязнения гидросферы – открытый сброс промстоков в поверхностную гидросеть и фильтрация рассолов в грунтовые воды привели к формированию обширных ореолов засоления гидросферы. Несмотря на принимаемые мероприятия по гидроизоляции шламохранилищ, объемы фильтрационных утечек рассолов, даже по официальным данным, достигают в отдельных случаях сотни тысяч кубометров в год [Бабошко, Бачурин, 2004].

В то же время характер и степень воздействия отвально-шламового хозяйства на почвенный покров рассмотрены недостаточно. Имеются единичные работы [Еремченко и др., 2013, 2017], посвященные исследованию состояния почвенного покрова вблизи солеотвалов в городах Соликамск и Березники. Показано, что в зоне воздействия солеотвалов формируются засоленные техногенные поверхностные образования, а также аналоги природных почв (дерново-подзолистых, серогумусовых, глееземов и т.д.) различной степени солончаковатости, вплоть до солончаков вторичных, как правило, обладающие щелочной реакцией среды, солонцеватостью и хлоридно-натриевым химизмом засоления.

Ряд научных работ посвящены описанию морфологического строения и свойств аллювиальных вторично засоленных почв в Прикамье. На примере нескольких почвенных разрезов показан хлоридный натриево-магниевый кальциевый химизм засоления в аллювиальных солончаковых почвах и

сульфатно-хлоридный натриево-кальциевый химизм – во вторичном солончаке. Отмечена преимущественно слабокислая и нейтральная реакция среды в солончаках, сильнокислая реакция ($pH_{вод} = 4,2-5,5$) и значительная гидролитическая кислотность – в аллювиальной почве. В солончаках отметили присутствие карбонатов (0,2-0,3%) и гипса (от 1,4 до 8,5%) [Митракова, 2018; Митракова, Хайрулина, 2020]. Определено классификационное положение вторично засоленных почв: аллювиальная солончаковая почва Gleyic Fluvisols (Salic) и солончак вторичный Gleyic Fluvic Solonchak [Хайрулина, 2022].

Анализ научных трудов показал, что данных по вторичному засолению аллювиальных почв в зонах разгрузки подземных минерализованных вод в долинах малых рек Прикамья не достаточно. Не установлена общая направленность эволюционных изменений этих почв с учетом изменений основных почвенных свойств. Не описано морфогенетическое разнообразие почв, не установлена их классификационная принадлежность до подтипового, родового, видового уровня. До настоящего времени не проведена оценка масштабов распространения солончакового почвообразования в долинах речной сети Прикамья.

1.2. Образование, свойства и классификация аллювиальных почв

В поймах рек наблюдается большая пестрота почв. Она обусловлена несколько отличными от водораздельных участков природными условиями. В речной пойме имеют место два специфических процесса – поемный и аллювиальный. Поемный процесс – это периодическое затопление почв пойменной террасы паводковыми водами. Аллювиальный процесс заключается в отложении полыми водами реки аллювиального наноса. Также неизменным фактором аллювиального почвообразования являются грунтовые воды. Кроме того, в поймах чрезвычайно разнообразен рельеф, представляющий систему валов, понижений, бугров. Все это очень влияет на

процесс почвообразования и усиливает пестроту почв [Коротаев, 1962; Шраг, 1969; Почвоведение, 1988; Добровольский и др., 2011].

В поперечном направлении поймы состоят из прирусловой приподнятой части (или прируслового вала), центральной наиболее выровненной части и притеррасного понижения. Не имеют выраженных пойм лишь мелкие горные реки. В прирусловой части поймы залегают аллювиальные слоистые почвы. У больших рек они могут занимать значительные территории; у средних и малых рек полоса аллювиальных слоистых почв оказывается узкой или совсем не выражена. При разливе реки в половодье наибольшая скорость потока создается в прирусловой части поймы. Соответственно в прирусловье откладывается наиболее грубый галечниково-песчаный аллювий. В центральной части поймы аллювий более тонкий, пылевато-суглинистый. В притеррасном же понижении, обычно занятом болотом с высокостебельной растительностью, скорость потока минимальная, и здесь откладывается наиболее тонкий глинистый органоминеральный аллювий [Шраг, 1969; Почвоведение, 1988; Добровольский и др., 2011].

Пойма служит геохимическим барьером для веществ, приносимых грунтовыми водами с водораздельных пространств; из гумусовых вод здесь могут выпадать органические вещества и кремнезем, из железистых – оксиды железа и марганца, из гидрокарбонатных – известь и гипс, из соленых – гипс, сульфат и хлорид натрия [Шраг, 1969; Почвоведение, 1988; Добровольский и др., 2011].

Почвы прирусловой поймы, преимущественно песчаные, слоистые, слабо переработанные почвенной фауной и корневыми системами растений. Слаборазвитый гумусовый горизонт содержит 1-3% гумуса. В меженный период они имеют лишь атмосферное водное питание при глубоких грунтовых водах, поэтому влажность почвы неустойчива, часто недостаточна. Окислительно-восстановительный потенциал высокий (более

400 мВ) сезонно-устойчивый, поэтому по всему профилю Fe^{3+} преобладает над Fe^{2+} . Эти почвы могут быть кислыми, насыщенными или карбонатными в зависимости, прежде всего, от зонального положения и степени промывания атмосферными осадками. В связи с песчаным составом и низкой гумусированностью они имеют невысокую емкость катионного обмена (10-15 мг-экв/100 г) и низкую буферность. В зависимости от зонального положения содержание гумуса может находиться в пределах от 1-2% до 3-5%. Характерна биогенная и механическая аккумуляция соединений железа. Это наименее развитые и наименее плодородные почвы поймы [Шраг, 1969; Почвоведение, 1988; Добровольский и др., 2011].

В центральной пойме под высокопродуктивной разнотравно-злаковой луговой растительностью с мощной корневой системой характерна высокая оструктуренность почв. Их профиль простой, но содержит обычно много переходных по гумусированности горизонтов. Характерна высокая гумусированность верхнего горизонта (8-12%), высокая емкость катионного обмена (30-50 мг-экв/100 г). Верхняя граница капиллярной каймы постоянно или периодически находится в пределах почвенного профиля. Влажность оптимальна, иногда избыточна. Характерно преобладание Fe^{3+} в верхней части профиля, а Fe^{2+} – в нижней. Они часто конкреционные: содержат железисто-марганцовые или карбонатные конкреции, иногда те и другие вместе; железистые конкреции преобладают в типе кислых почв, а карбонатные – в насыщенных и карбонатных почвах [Шраг, 1969; Почвоведение, 1988; Добровольский и др., 2011].

Почвы притеррасных либо старичных понижений всегда сильно заилены. Образуются под осоково-тростниковой растительностью. Органические остатки быстро разлагаются, превращаясь в черную или сизо-черную мажущуюся массу. Характерно высокое содержание органических и минеральных соединений серы и фосфора. Свойственно обилие негумифицированных растительных остатков и восстановленных

соединений, подавленность микробиологических процессов. Почвы постоянно подтоплены выклинивающимися водами, влажность почв постоянно избыточная. Окислительно-восстановительный потенциал низкий (менее 300 мВ), Fe^{2+} резко преобладает над Fe^{3+} . Гидроморфизм проявляется в полной мере в процессах оглеения и торфонакопления [Шраг, 1969; Почвоведение, 1988; Добровольский и др., 2011].

Отличительными особенностями аллювиальных почв таежно-лесной зоны являются: серо-бурый цвет, кислая и слабокислая реакция среды, ненасыщенность основаниями, фульватный состав, большая профильная и пространственная динамичность свойств, а также неоднородный минералогический состав, формирующийся водосборной питающей провинцией [Добровольский и др., 2011].

Все разнообразие аллювиальных почв объединено классификацией почв СССР [Классификация и диагностика..., 1977] в три группы: дерновые, луговые и болотные.

По характеру водного режима, а также по реакции почвенной среды и особенностям их состава и свойств аллювиальные дерновые и луговые почвы разделяются на шесть следующих типов почв: аллювиальные дерновые кислые, аллювиальные дерновые насыщенные, аллювиальные дерново-опустынивающиеся карбонатные, аллювиальные луговые кислые, аллювиальные луговые насыщенные и аллювиальные луговые карбонатные.

Группу аллювиальных болотных почв делят на типы по степени разложения и аккумуляции органических веществ на следующие три типа: аллювиальные лугово-болотные, аллювиальные болотные иловато-перегнойно-глеевые и аллювиальные болотные иловато-торфяные.

В рамках российской классификации почв [Классификация и диагностика почв России, 2004] аллювиальные почвы входят в ствол синлитогенных почв, объединяющий почвы, в которых почвообразование

протекает одновременно с аккумуляцией свежего минерального материала на поверхности почвы, что вызывает рост почвенного профиля вверх.

На основании комбинаций различных органогенных, гумусовых, глеевого, квазиглеевого и слитого горизонтов, а также горизонтов гидрогенной аккумуляции железа и карбонатов в отделе аллювиальные почвы выделяется 10 типов природных почв: аллювиальные гумусовые, аллювиальные темногумусовые, аллювиальные темногумусовые глеевые, аллювиальные темногумусовые квазиглеевые, аллювиальные перегнойно-глеевые, аллювиальные гумусовые глеевые, аллювиальные рудяковые, аллювиальные слитые, аллювиальные мергелистые, аллювиальные торфяно-глеевые [Полевой определитель почв, 2008; URL: <http://soils.narod.ru/index.html> (дата обращения 12.04.2023)].

В типе аллювиальные гумусовые по признакам оподзоливания, оглеения и нарушенности естественного залегания горизонтов выделяют следующие основные 4 подтипа: типичные, оподзоленные, глееватые, турбированные.

В типе аллювиальные темногумусовые по признакам солонцеватости, засоления, слитизации, оглеения и гидрометаморфизма выделяются 6 подтипов: типичные, солонцеватые, засоленные, слитизированные, глееватые, квазиглеевые.

По признакам солонцеватости и засоления в типе аллювиальные темногумусовые глеевые выделяется 3 подтипа: типичные, солонцеватые и засоленные.

Тип аллювиальные темногумусовые квазиглеевые на основе признаков солонцеватости, засоления, слитизации, омергелирования разделяется на 5 подтипов: типичные, солонцеватые, засоленные, слитизированные, омергеленные.

В тип аллювиальных перегнойно-глеевых по признакам засоления, омергелирования, оруденения и заиливания включены 5 основных подтипов: типичные, засоленные, омергеленные, оруденелые, иловато-перегнойные.

Подтипы в типе аллювиальные гумусовые глеевые выделяются по наличию признаков гидрогенной аккумуляции железа (оруденения). Выделяется 2 подтипа: типичные и оруденелые.

По признакам оглеения в типе аллювиальные рудяковые почвы выделяется 2 подтипа: типичные и глееватые.

В типе аллювиальные слитые по признакам засоления и гидрометаморфизма выделяется 3 основных подтипа: типичные, засоленные, гидрометаморфизованные.

Тип аллювиальные мергелистые представлен только одним подтипом – типичные.

Тип аллювиальные торфяно-глеевые на основе признаков засоления, омергеливания, оруденения и заиливания разделяется 4 подтипа: типичные, омергеленные, оруденелые и торфяно-минеральные [Классификация и диагностика..., 2004; Полевой определитель почв, 2008; URL: <http://soils.narod.ru/index.html> (дата обращения 12.04.2023)].

В системе WRB аллювиальные почвы часто коррелируют с реферативной почвенной группой *Fluvisols*. В группу *Fluvisols* входят генетически молодые почвы, которые формируются не только на речных отложениях, но также и на озёрных и морских отложениях. Реферативная почвенная группа *Fluvisols* диагностируется по наличию в профиле материала *fluvic* в слое мощностью ≥ 25 см, начиная с глубины ≤ 25 см от поверхности минеральной почвы. Материал *fluvic* относится к речным, морским и озёрным отложениям с современным поступлением свежих наносов либо с их поступлением в прошлом, но сохранивших стратификацию. Материал *fluvic* всегда связан с водными объектами (реками, озёрами, морем) [World reference base..., 2022].

Причиной засоления аллювиальных почв в условиях засушливого климата являются минерализованные грунтовые воды [Перельман, 1966; Перельман, Касимов, 1999; Аюшина и др., 2018; Митракова, 2018; Елизаров и др., 2023]. По разным оценкам в РФ аллювиальные засоленные почвы занимают от 965,7 тыс. га (0,06% общей площади) [Столбовой, Шерemet, 1997] до 2797,2 тыс. га (0,2% общей площади) [Почвенный покров ..., 2001].

1.3. Сульфидогенез и общие представления о кислых сульфатных почвах

Сульфидогенез – процесс восстановления серы сульфатов до сероводорода и образования сульфидов, идущий при помощи сульфатредуцирующих бактерий [Глазовская, 2007].

Сульфидогенез часто происходит в донных отложениях, богатых органическими остатками, на дне солоноватых водоемов, где создается восстановительный режим. В таких условиях развиваются сульфатредуцирующие бактерии-галофилы преимущественно рода *Desulfovibrio*. Они восстанавливают серу сульфатов в процессе потребления органических соединений. В результате биохимических процессов в среде образуются сульфиды, которые при взаимодействии с углекислотой, выделяющейся при разложении органики, дают углекислые соли и сероводород [Глазовская, 2007].

Подобные процессы могут развиваться в почвах на затопляемых рисовых полях, в которых идет полное вытеснение почвенного воздуха поливными водами и установление восстановительных условий. Как известно [Зайдельман, 1998; Водяницкий, 2008], в почвах при отсутствии свободного кислорода, развиваются глеевые процессы, имеющие микробиологическую природу. Наряду с восстановлением серы происходит восстановление железа, увеличивается его подвижность. В анаэробной и сильновосстановительной среде, где железо находится в подвижной форме, появление сероводорода приводит к образованию сульфидных минералов

(пирит, гидротроилит). Если в такой почве за счет просыхания устанавливается окислительный режим, железо и сера окисляются с образованием гидроксидов железа и серной кислоты. В присутствии карбонатов из-за взаимодействия с серной кислотой образуется гипс. В отсутствие карбонатов серная кислота разрушает силикаты, что приводит к оглиниванию почвы [Глазовская, 2007].

Солончаки сульфидные (соровые) формируются в гидроморфных условиях, как правило, на днищах периодически высыхающих соленых озер. Грунтовые воды залегают на глубине 0,5-1,0 м, сезонно выходят на поверхность, благодаря чему создаются условия для процессов увлажнения-иссушения и установления окислительно-восстановительной зональности. По всему почвенному профилю отмечается сильное оглеение и ощущается запах сероводорода. [Классификация и диагностика ..., 1977; Классификация и диагностика ..., 2004].

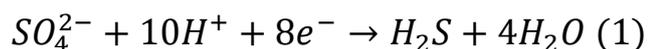
На поверхности соровых солончаков формируется солевая корка, пропускающая солнечный свет; на ее нижней поверхности могут поселиться зеленые водоросли, поэтому в самом верхнем почвенном слое господствует резкоокислительная среда. Отмирая, водоросли постоянно поставляют питательный субстрат для сульфатредуцирующих бактерий. На глубине 5-10 см формируется темный (почти черный) горизонт (мокрая соленая грязь) с резковосстановительными условиями, в котором уже развивается сульфатредукция и образуются восстановленные соединения (H_2S , пирит, гидротроилит). Ниже этого горизонта количество органического вещества и степень восстановленности среды уменьшаются, и формируется глеевый горизонт [Перельман, 1966].

Сульфидные солончаки могут характеризоваться разной реакцией почвенной среды. Солончаки сульфидные в Забайкалье и Предбайкалье имеют сильнощелочную реакцию среды (рН 9,0-10,3) [Хадеева, 2021]. Отмечают существование кислых сульфидных солончаков, которые

формируются при испарении сульфатных вод. Появление pH <3-4 обязано окислению пирита и других дисульфидов в почвах и породах, приводящее к образованию H₂SO₄ [Перельман, 1966; Перельман, Касимов, 1999].

В зарубежной литературе кислыми сульфатными называют почвы, содержащие в своем составе сульфидные минералы (главным образом пирит) или продукты трансформации сульфидов железа. Такие почвы могут либо содержать серную кислоту (активные кислые сульфатные почвы), либо обладать потенциалом к ее образованию (потенциальные кислые сульфатные почвы). Кислые сульфатные почвы обладают высокой токсичностью и ограниченной доступностью питательных элементов для растений. Токсичность кислых сульфатных почв, прежде всего, связана с низкими значениями pH (≤4). Те части почвенного профиля, в которых произошло окисление сульфидных минералов, могут содержать сульфатные минералы (ярозит, швертманнит, сидеронатрит и др.) в виде пятен желтого или оранжевого цвета. Образование ярозита считается диагностическим признаком для кислых сульфатных почв, поскольку он образуется только при высоких значениях Eh (≥400 мВ) и очень низких значениях pH (≤4) [Rabenhorst et al, 2012].

Во влажных засоленных почвах, содержащих достаточное количество органического вещества, анаэробные гетеротрофные микроорганизмы во время поглощения углерода органических соединений способны использовать кислород сульфатов (SO₄²⁻), который восстанавливается до сульфида в соответствии с уравнением (1). Этот процесс получил название сульфатредукция:



Осуществлять сульфатредукцию способны около 15 родов бактерий, включая *Desulfovibrio*, *Desulfotomaculum* и *Desulfobacter*. Необходимо отметить, что температурный оптимум для большинства сульфатредуцирующих бактерий находится в диапазоне 30-40°C, поэтому

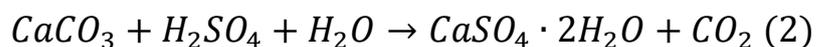
максимальная скорость снижения содержания сульфатов происходит в тропиках. В более высоких широтах этот процесс идет значительно медленнее [Rabenhorst et al, 2012].

Сульфид, образовавшийся в результате сульфатредукции способен образовывать новые минералы в почвах, в том числе пирит (при наличии достаточного количества восстановленного железа).

Чаще всего сульфиды накапливаются в почвах приморских болот (в условиях умеренного климата) и мангровых зарослей (в тропиках), так как именно в этих экосистемах складываются благоприятные условия для сульфатредукции: наличие сульфатов, органического вещества и восстановленного железа, а также анаэробная обстановка. Восстановление сульфатов может происходить и в других экосистемах, при выполнении перечисленных выше условий. Сульфатредукция будет преобладать в солоноватых системах, в пресной же среде восстановление сульфатов может замещаться метаногенезом по мере истощения запасов сульфатов [Rabenhorst et al, 2012].

Сульфиды практически сразу начинают окисляться, как только попадают в окислительные условия. Чаще всего такие условия создаются благодаря человеку, например, при осушении болот, но также в результате природных катаклизмов (засуха, тектонический подъем и т.д.). При высоком рН окисление сульфида осуществляется кислородом, но при низких значениях рН сульфид окисляется железом (III) [Rabenhorst et al, 2012]. Окисление восстановленных соединений серы часто происходит при участии автотрофных бактерий, таких как *Thiobacillus* spp., что приводит к образованию серной кислоты и, как следствие, к резкому подкислению почвы [Dent, 1993; Husson et al, 2000; Michael, 2018]. Высвобождение H_2SO_4 , в свою очередь, разрушает минеральную матрицу почв, мобилизуя металлы, такие как железо (Fe^{2+} , Fe^{3+}), алюминий (Al^{3+}) и другие токсичные элементы, которые в растворенном виде рассеиваются в окружающей среде [Åström,

Björklund, 1995; Sohlenius, Öhborn, 2002; Ljung et al, 2009; Poch et al, 2009]. Когда в почвенном растворе присутствует CaCO_3 , серная кислота вступает с ним в реакцию с образованием гипса (2). До тех пор, пока в растворе присутствует карбонат кальция, почва не становится кислой [Rabenhorst et al, 2012].



В мире выявлено более 17 млн га кислых сульфатных почв, из которых 6,5 млн га находится в Азии, 4,5 млн – в Африке, 3 млн – в Австралии, 3 млн – в Латинской Америке, а остальная часть – в Европе, главным образом, в Финляндии и Швеции [Andriessse, van Mensvoort, 2002; Fitzpatrick et al, 2009]. В прибрежных регионах мира эти почвы оказывают значительное негативное воздействие на сельское хозяйство, аквакультуру и окружающую среду, т.к. их местоположение часто совпадает с густонаселенными районами. Кислые сульфатные почвы требуют усиленного внимания и углубленного изучения почвоведрами и экологами [Ljung et al, 2009; Fanning et al, 2017].

Глава 2. УСЛОВИЯ, ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Природно-техногенные условия территории исследований

Климат. Климат Пермского края можно охарактеризовать как умеренно-континентальный с продолжительной холодной и многоснежной зимой и умеренно-теплым сравнительно коротким летом [Назаров, 2006].

Климат сформировался под влиянием Уральских гор, которые задерживают движения теплых и влажных воздушных масс, приходящих с Атлантического океана, так и холодных арктических масс – с Северного Ледовитого океана [Шкляев, Балков, 1963].

По данным метеостанции в г. Березники средняя годовая температура равна $+1,7^{\circ}\text{C}$. Наиболее холодным месяцем является январь ($-14,9^{\circ}\text{C}$), а наиболее теплым – июль ($+17,9^{\circ}\text{C}$). Среднегодовое количество осадков составляет 660 мм (Приложение А) [Расписание погоды..., 2023].

За время исследований (2018-2022 гг.), по данным метеостанции г. Березники, климатические условия отличались от средних многолетних данных, в большинстве случаев, повышенной температурой воздуха в июле и пониженной – в августе (рис. 1). В июле максимальные среднемесячные температуры зафиксированы в 2018, 2020 и 2022 гг., минимальная температура – в 2019 г. Наименьшая среднемесячная температура воздуха в августе была в 2019 г., а наибольшая температура – 2022 г.

В количестве выпавших осадков были зарегистрированы значительные отклонения от средних многолетних данных (см. рис. 1). Наименьшее количество июльских осадков было выявлено в 2018, 2020 и 2022 гг., наибольшее – в 2021 г. В августе меньше всего осадков наблюдалось в 2022 г., а больше всего – в 2019 г.

Таким образом, за время исследований, самым холодным и одним из самых дождливых годов был 2019 г., а одним из наиболее жарких и засушливых – 2022 г.

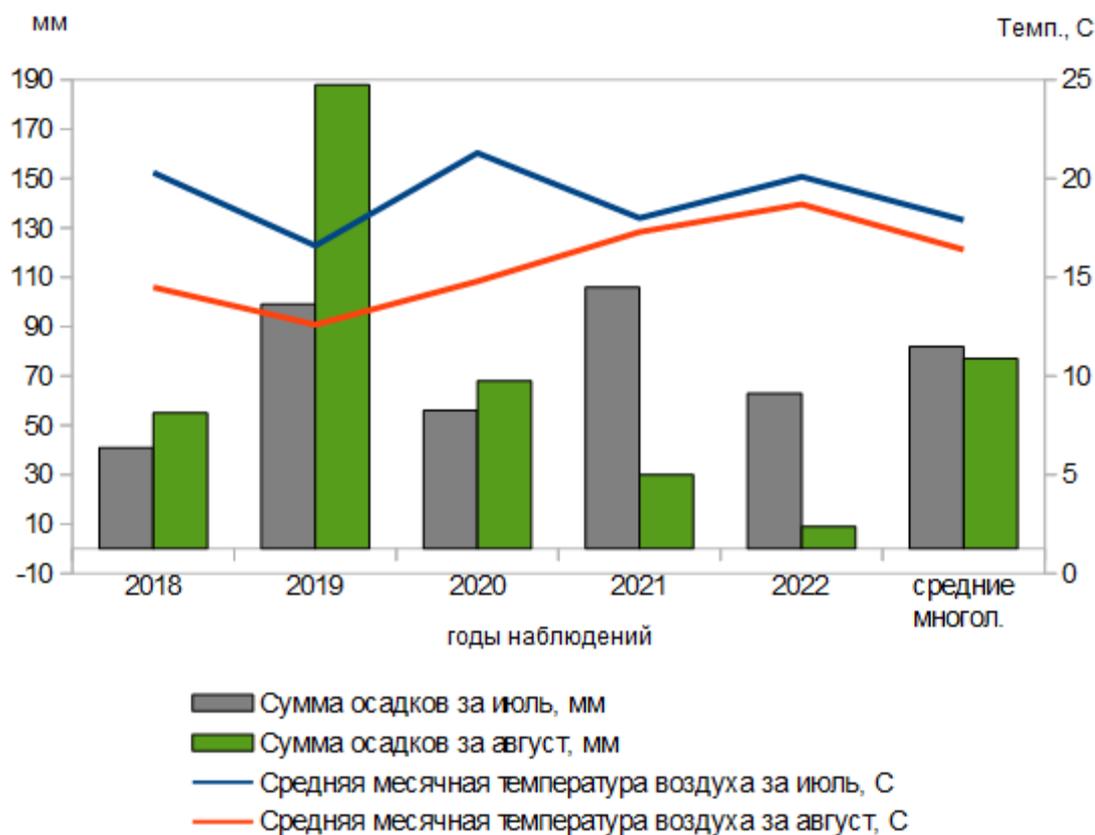


Рисунок 1 – Метеорологические показатели (количество осадков, средняя месячная температура воздуха в июле и августе) в сравнении со средними многолетними данными [по данным метеостанции г. Березники]

Сезонное промерзание почвы – явление, распространенное на всей территории Прикамья. Наиболее общей характеристикой режима сезонного промерзания почвы является средняя месячная глубина промерзания, которая нарастает от ноября к марту. Увеличение глубины промерзания происходит в направлении с юга на север: в Чернушке средняя месячная глубина промерзания в марте – 67 см, в Перми – 89 см, в Кудымкаре – 107 см. Максимальная глубина промерзания может достигать 175 см [Назаров, 2006].

Рельеф и геологическое строение. По геоморфологическому районированию Пермский край входит в Уфимско-Пермскую подобласть Среднерусской провинции Русской равнины и представляет собой эрозионно-денудационную равнину, сложенную пермскими отложениями

Уфимского свода, Камской впадины, Предуральяского краевого прогиба. Преобладающий тип рельефа – сильно расчлененная равнина на западном крыле Уфимского свода [Ястребов, 1959; Ананьев и др., 1980].

Территория исследований находится в западной части Пермской края, которая является слабоприподнятой, сильноэродированной частью Русской равнины. Город Березники расположен на левом берегу р. Камы. Территория города отличается спокойным рельефом и пологим наклоном в западном и юго-западном направлениях. Перепад высот более 130 м. Село Усть-Игум расположено на левом берегу реки Яйва в устьях рек Игум и Усолка. Низменный рельеф, а также речная долина р. Яйва, способствуют заболачиванию местности [Сафроницкий, 1959; Коротаев, 1962; Борисевич, 1968; Оленев, Горчаковский, 1969].

Средняя густота долинной (речной) сети в Пермском крае составляет 0,6-0,8 км/км² (суммарная протяженность речных долин на площади в 1 км²). В зависимости от водности водотоков выделяются долины крупных (Кама, Вишера, Чусовая, Сылва), средних (Колва, Яйва, Косьва) и малых рек, различающиеся своими размерами и морфологией.

Долины крупных и средних равнинных рек имеют довольно сходное строение. Развиваясь длительное время, водотоки сформировали широкие поймы и 4-5 надпойменных террас, сложенных аллювием. Ширина долин главных рек региона, особенно в местах развития крупных излучин или впадения в них основных притоков, может достигать нескольких десятков километров.

Долины малых рек (длиной до 50 км) явно преобладают как в количественном отношении, так и по суммарной длине. Ширина их долин колеблется – от сотен метров до 1-2 км. В пределах днищ долин узкими фрагментами представлены пойма и одна-две надпойменные террасы [Назаров, 2006].

Геологическими напластованиями, слагающими внегорную часть Пермского края, являются отложения пермской системы. Территория исследований расположена в зоне отложений казанского яруса верхней перми [Коротаев, 1962]. Отложения казанского яруса верхней перми состоят из красно-бурых (малиново-бурых) и коричнево-бурых мергелистых глин, переслаивающихся серыми и зеленовато-серыми слабоизвестковистыми песчаниками. Эти коренные породы покрыты плащом четвертичных отложений, дневные горизонты которых являются материнскими почвообразующими породами [Сафроничский, 1959; Коротаев, 1962; Борисевич, 1968; Оленев, Горчаковский, 1969].

Верхнекамское месторождение солей приурочено к центральной части Соликамской впадины Предуральяского краевого прогиба. Соляная толща месторождения, имеющая форму линзы площадью 8,1 тыс. км², прослеживается в меридиональном направлении на 205 км, в широтном – до 55 км. Внутри контура соляной толщи расположена многопластовая залежь калийно-магниевых солей протяженностью 135 км при ширине до 41 км, площадь основной части калийной залежи – 3,7 тыс. км².

Соляные породы месторождения представлены калийной солью, сильвинитами и карналлитовыми породами. Геологические запасы месторождений оцениваются по карналлитовой породе – 96,4 млрд т, по сильвинитам – 113,2 млрд т, по каменной соли – 4650 млрд т.

Каменная соль представляет собой породу, сложенную галитом (NaCl). В качестве примесей в ней встречаются ангидрит, силикаты (в основном глинистые минералы), карбонаты (доломит, кальцит) и др. Химический состав каменной соли: NaCl (80-96%), CaSO₄, MgCl₂, KCl – следы, нерастворимый остаток.

Сильвинит – биоминеральная порода, сложенная галитом и сильвином (KCl), содержание последнего в сильвините 20-45%. В качестве примесей присутствуют несоляные минералы (ангидрит, карбонаты, глинистые

минералы и др.). Химический состав сильвина: KCl (97-99,3%), $NaCl$, $CaSO_4$, $MgCl_2$, H_2O .

Карналлитовая порода состоит из карналлита ($KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$) и галита. В качестве примесей карналлитовая порода содержит сильвин и несоляные минералы (ангидрит, карбонаты, глинистые минералы и др.) [Кудряшов, 2013].

Гидрологические условия. В гидрологическом отношении границы Пермского края в большинстве случаев совпадают с важнейшими водоразделами рек европейской части России. Территория Уральского Прикамья имеет хорошо развитую речную сеть, относится к бассейну р. Волги. В настоящее время в связи с гидротехническим строительством в пределах области сложилось деление р. Камы на два участка – Верхняя Кама (от западной границы области до устья Вишеры) и Средняя Кама (Камское и Воткинское водохранилища, до устья р. Сивы).

Основной водной артерией на территории Верхнекамского месторождения является р. Кама. Более мелкие реки (Волим, Большая Уньва, Ленва, Зырянка, Быгель, Затопыч, Извер, Боровая, Усолка, Клестовка, Поповка и др.) и ручьи образуют речную сеть [Кудряшов, 2013].

В условиях Пермского края, как и во многих других регионах, почвенная вода (верховодка) не минерализована. Грунтовые же воды минерализованы в значительной степени. Грунтовая вода содержит значительное количество гидрокарбоната кальция и магния, попавших в нее в результате растворения карбонатов этих элементов, имеющихся в коренных пермских породах [Коротаяев, 1962].

Почвы и почвообразующие породы. Согласно почвенно-географическому районированию исследования проведены на территории, частично расположенной в пределах Чердынско-Гайнско-Соликамского подрайона и Кудымкарско-Чермозского почвенного района Пермского края [Коротаяев, 1962; Почвенная карта..., 1979.; Филькин и др., 2014].

Территория Чердынско-Гайнско-Соликамского почвенного подрайона представляет депрессию, заполненную водно-ледниковыми и частично озерно-ледниковыми и древнеаллювиальными песками и супесями. В центральной части района с отметками 140-170 м, мощность песков составляет 3 м и более, а к границам района, с повышением местности до 180-200 м, их мощность снижается и сходит на нет. Пески отсутствуют на возвышенностях и склонах к долинам рек. В почвенном районе доминируют подзолы и подзолистые песчаные почвы. На всхолмленных и крутых склонах на элювии пермских мергелей, известняков и глин сформированы серогумусовые почвы (рис. 2) [Коротаев, 1962].

Рельеф территории Кудымкарско-Чермозского почвенного района сглаженно-широковолнистый, преобладают высоты 160-180 м. Территория сложена красноцветными глинами, с прослойками мергеля и известняков, которые перекрыты элювиально-делювиальными (покровными) суглинками и глинами. Преобладают дерново-подзолистые тяжело- и реже среднесуглинистые почвы. На склонах, где покровные отложения удалены текучими водами, на элювии пермских пород сформировались серогумусовые почвы. В долинах рек аллювиальные почвы характеризуются глинистым и тяжелосуглинистым гранулометрическим составом [Коротаев, 1962].

Растительность. Территория исследований входит в район южнотаежных пихтово-еловых лесов с мелколиственными породами и липой в древесном ярусе. Южно-таежные леса, характеризуются сложным строением древостоя; преобладанием травяных типов лесов; моховой покров малой мощности, не сплошной. Этот район относится к Камско-Печорско-Западноуральской подпровинции Урало-Западносибирской таежной провинции. Лесопокрытые земли составляют 65-75% [Овеснов, 2009].

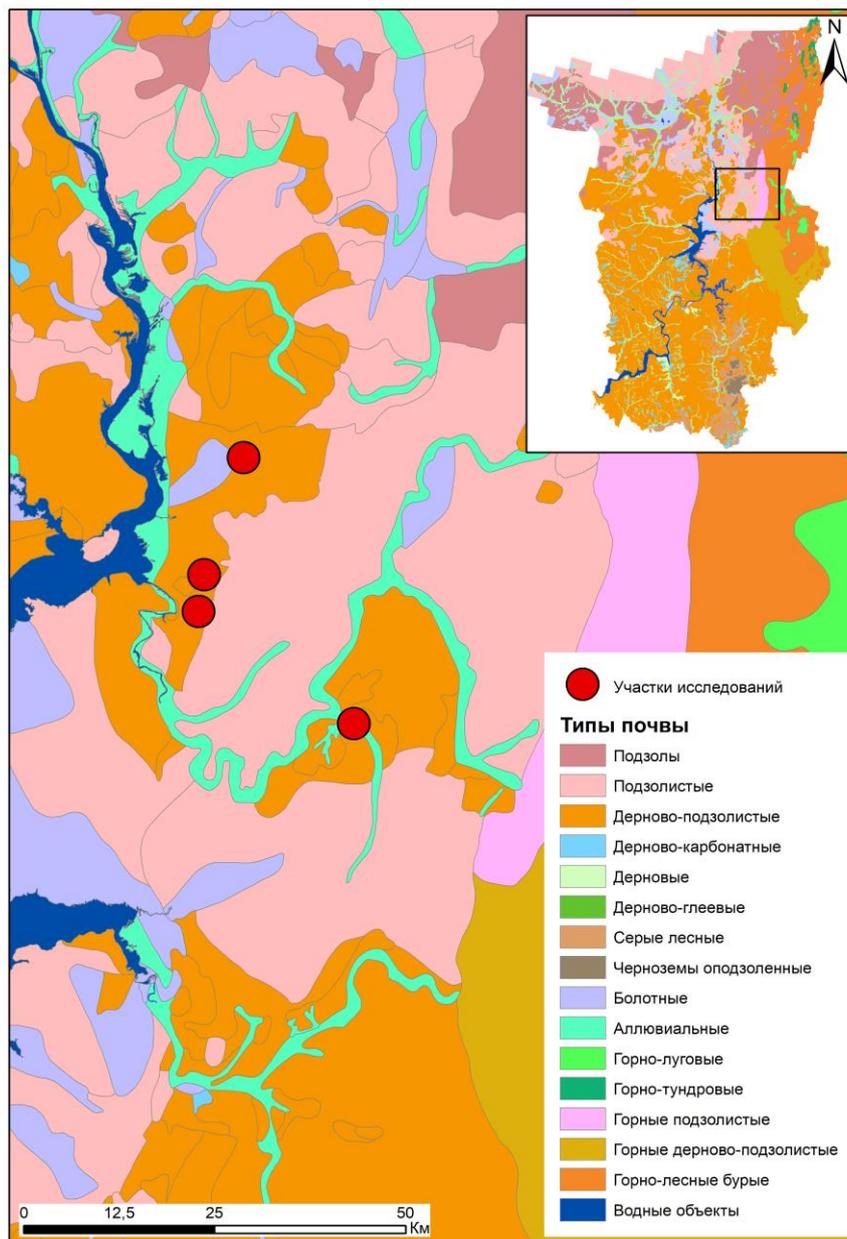


Рисунок 2 – Карта почв района исследований (фрагмент карты почвенного покрова Пермского края [Филькин и др., 2014])

Техногенные условия. Город Березники – крупный промышленный центр, второй по величине город Пермского края. Площадь города – 525 км², население – 198 тыс. чел. [Пермская область..., 1997; Состояние..., 2002].

Первые поселения на территории города возникли в XVI-XVIII вв. на базе соляных промыслов [Пермская область..., 1997]. Город Березники был

основан в 1932 г. В связи со строительством заводов: азотно-тукового, калийного, титаномагниевого, а также с разработкой Верхнекамского месторождения калийных солей. Непосредственно на территории города находятся Березниковский и Дурыманский участки месторождений. Современный центр города был застроен в 1930-х - 1940-х гг. Позднее (1960-е гг.) на месте пригородного лесопарка возникли район Околица, а на берегу созданного пруда – район Семино.

Ряд промышленных предприятий города являются (и официально признаны) монополистами на российском рынке: АО «Уралкалий» (производит более половины калийных удобрений страны), АО «ЕвроХим» АО «Бератон» (производство полиакриламида), АО «Ависма, титаномагниевый комбинат» (титан, магний, натриевые сплавы), АО «Азот» (калиевая селитра).

Усть-Игум – село в Александровском районе Пермского края, входит в состав Всеволодо-Вильвинского городского поселения, население 450 чел. Поселение возникло при пильной мельнице (лесопилке), построенной в 1753 г. (на ней строили деревянные суда – коломенки для перевозки руды). Селом стало в 1893 г., когда здесь была сооружена Свято-Николаевская деревянная церковь. С 1890 по 1 мая 1963 г. в Усть-Игуме работал кирпичный завод (в последнее время – завод «Огнеупор»). В 1913 г. создано Усть-Игумское кредитное товарищество, в 1914 г. – Усть-Игумское потребительское общество. В 1930 г. образовался колхоз «Уральский рабочий», который 1 мая 1935 г. был разукрупнен (существовал до 1956 г.). С 1 октября 1947 г. приступила к лесозаготовкам Усть-Игумская лесозаготовительная контора Сталинградского живтреста совхозов. Одно время (в 1940-1950-х гг.) в селе находилась контора Усть-Игумского леспромхоза, который в 1952 г. вошел в состав Ивакинского ЛПХ. Усть-Игум являлся центром Усть-Игумской волости Соликамского уезда и Усть-Игумского сельского совета (до января 2006 г.) [Шумилов, 1994].

Близ села расположены старые рассолоподъемные скважины, которые существуют со времен одного из первых русских поселений с производством соли – Яйвинского острожока, основанного в 1570 г. Производство соли было остановлено в XVIII в. В настоящее время территория поселения значительно удалена от промышленных предприятий и представляет собой суходольные и пойменные луга [Хайрулина и др., 2017].

2.2. Объекты исследований

На территории Пермского края в связи с неоднородностью рельефа, почвообразующих пород и растительности, наблюдается значительное разнообразие почв [Коротаев, 1962; Еремченко и др., 2016]. Почвенно-экологическое районирование территории [Карта почвенно-экологического..., 1997] включает Камско-Верхневыхгодскую, Вятско-Камскую, Прикамскую почвенные провинции и Уральский почвенный округ (рис. 3). Объекты исследований расположены в Вятско-Камской почвенной провинции дерново-подзолистых почв.

Согласно открытым источникам, в окрестностях г. Березники складирование отходов предприятием ПАО «Уралкалий» началось в 60-70 гг. XX в., в настоящее время в пределах развитой речной сети расположены 4 солеотвала и 4 шламохранилища (рис. 4). Основной компонент отходов в солеотвалах – галит (NaCl) – 90,55-94,54%, также содержатся KCl – 3,2-7,34%, MgCl_2 – 0,07-0,08%, CaSO_4 – 1,34-1,48% [Еремченко и др., 2013]. Минерализация воды в шламохранилище БКПРУ-3 составляет 99 г/л, состав солей хлоридный натрий – калиевый (см. табл. 4).

В 2018-2022 гг. в долинах указанных малых рек заложен 21 почвенный разрез, почвы изучены до глубины водонасыщенных грунтов. Расположение почвенных разрезов на техногенно засоленных почвах отмечено на рисунках 5-8. Координаты почвенных разрезов указаны в системе координат WGS-84. Пробы почв отобраны по горизонтам (слоям) с трех стенок разреза. Полевую

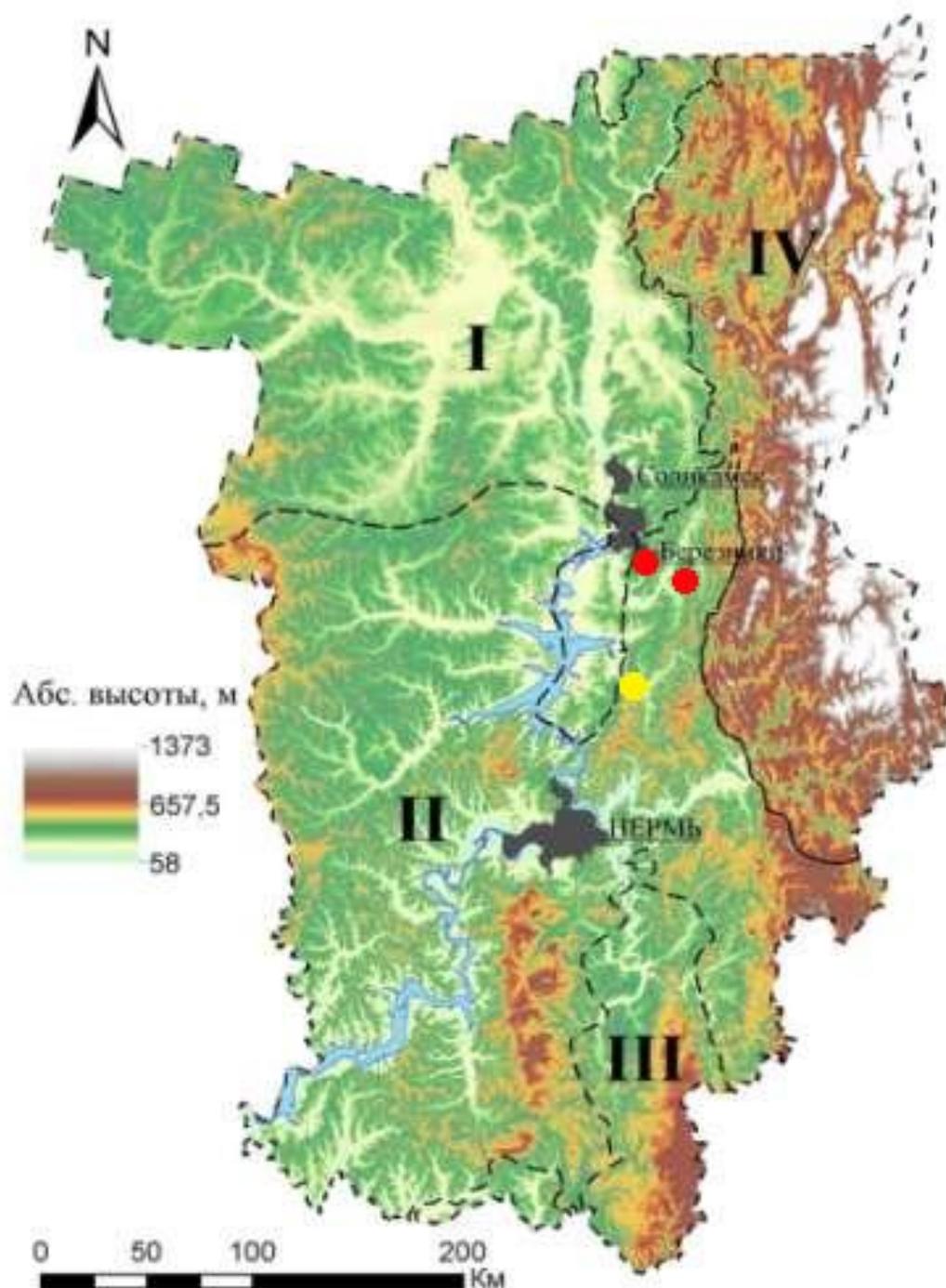


Рисунок 3 – Почвенно-экологическое районирование территории Пермского края [автор рисунка Шестаков И.Е., с добавлениями];

Почвенные провинции: I – Камско-Верхневыхгодская, II – Вятско-Камская, III – Прикамская, IV – Уральский почвенный округ, кружками отмечены места проведения исследований (желтый кружок – фоновые почвы)

диагностику почв провели в соответствии с современной классификацией почв России [Классификация почв..., 2004] и мировой корреляционной базой почвенных ресурсов [WRB, 2022]. Для исследования химического состава поверхностных и почвенно-грунтовых вод взяли 14 проб воды. Почвенно-грунтовые воды отбирали непосредственно из почвенных разрезов.

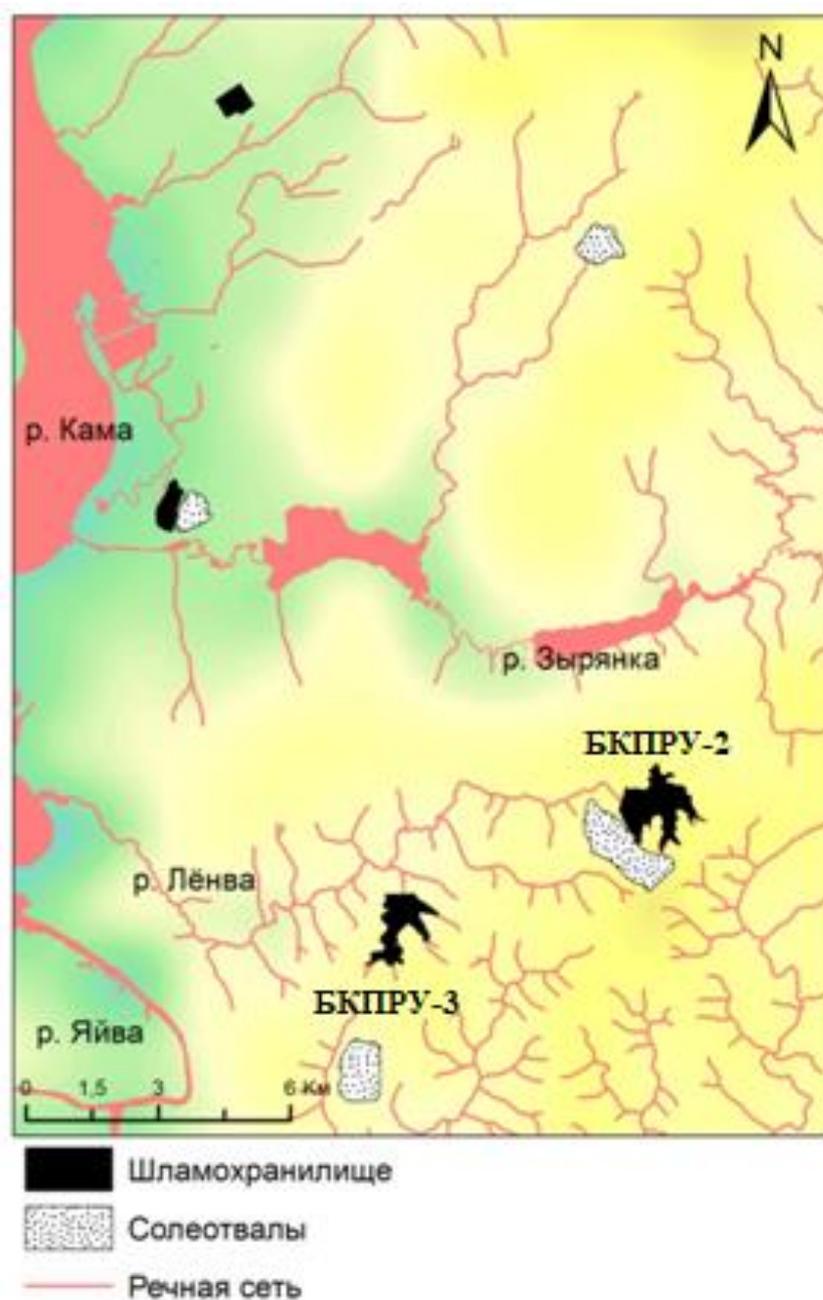


Рисунок 4 – Расположение солеотвалов и шламохранилищ ПАО «Уралкалий» (автор рисунка Шестаков И.Е.)

В долине малой р. Быгель под воздействием подземных минерализованных вод, сформированных на территории солеотвала Березниковского калийного производственного рудоуправления №4 (БКПРУ №4), образовался засоленный участок. Для исследований были заложены два почвенных разреза (рис. 5); взяты две пробы почвенно-грунтовых вод.

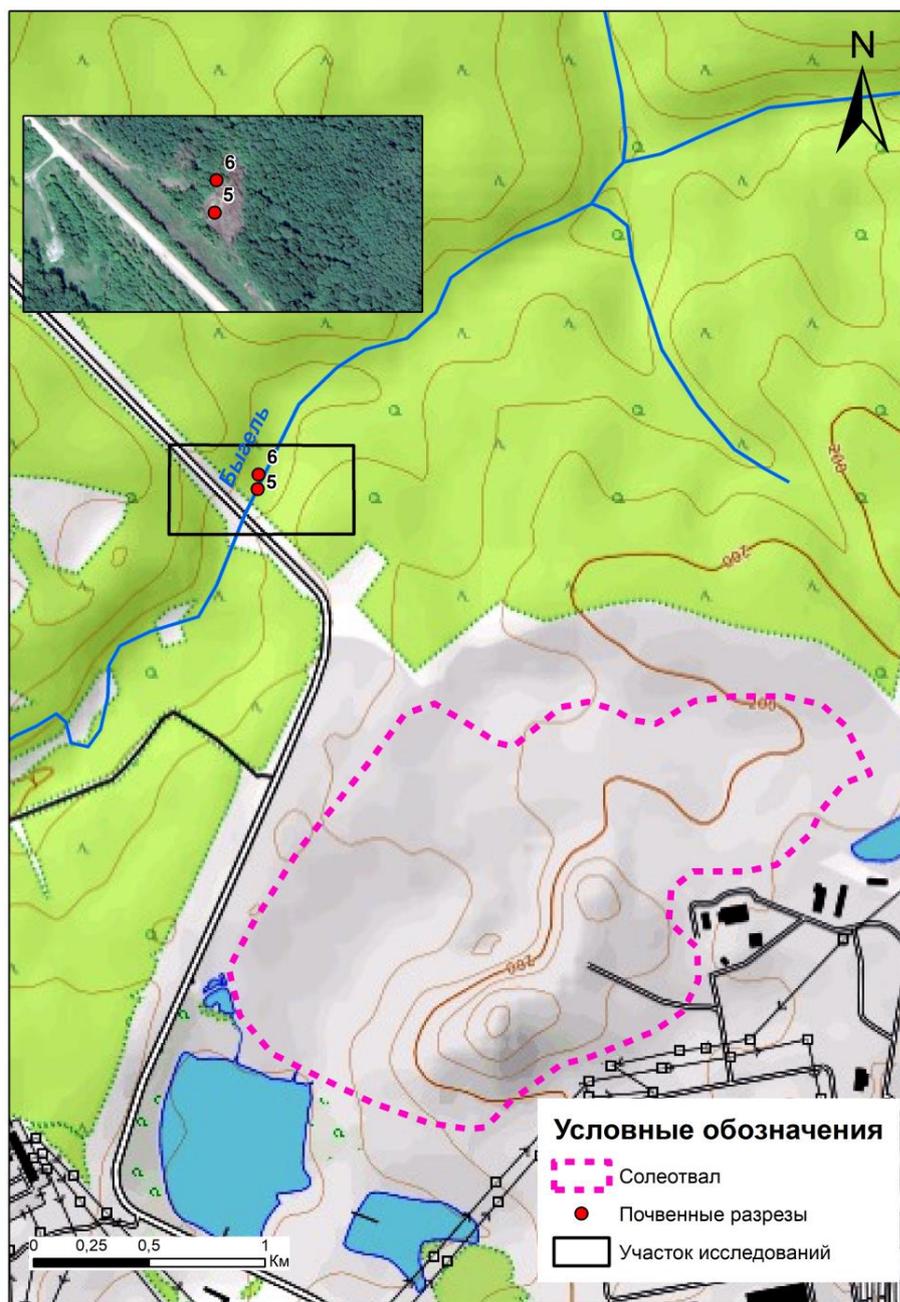


Рисунок 5 – Расположение почвенных разрезов в долине р. Быгель

На космоснимках долины р. Черная, расположенной в зоне стока подземных, а местами и поверхностных минерализованных вод от солеотвала, выявлены участки с изменением растительного покрова. В летний период 2019-2020 гг. проведены маршрутные исследования почв речной долины. Установлено, что выделяющиеся на космоснимках участки, характеризуются отсутствием растительности, либо имеют низкое проективное покрытие с доминированием 1-5 видов солеустойчивой и солелюбивой растительности (*Puccinellia distans* (Jacq.) Parl., *Atriplex prostrata* Boucher ex DC., *Spergularia salina* J. et C. Presl и др.). На шести контрольных участках с нарушенной растительностью заложили 6 почвенных разрезов (рис. 6), а также взяты пробы воды из р. Черная, ручья с соленой водой и две пробы почвенно-грунтовых вод.

На территории исследований в долине р. Ленва разгружаются подземные воды, в которые фильтруются рассолы из шламохранилища БКПРУ-3. Кроме того, соли поступают с водами р. Ленва, испытывающей воздействие солеотвала и шламохранилища БКПРУ-2. В соответствии с растительностью и рельефом в долине реки выделены семь контрольных участков, в пределах которых закладывали почвенные разрезы до глубины водонасыщенных грунтов (рис. 7). Отобраны пробы воды из шламохранилища БКПРУ-3, из р. Ленва, из мелководного водоема в заболоченной части поймы, а также одна проба почвенно-грунтовых вод.

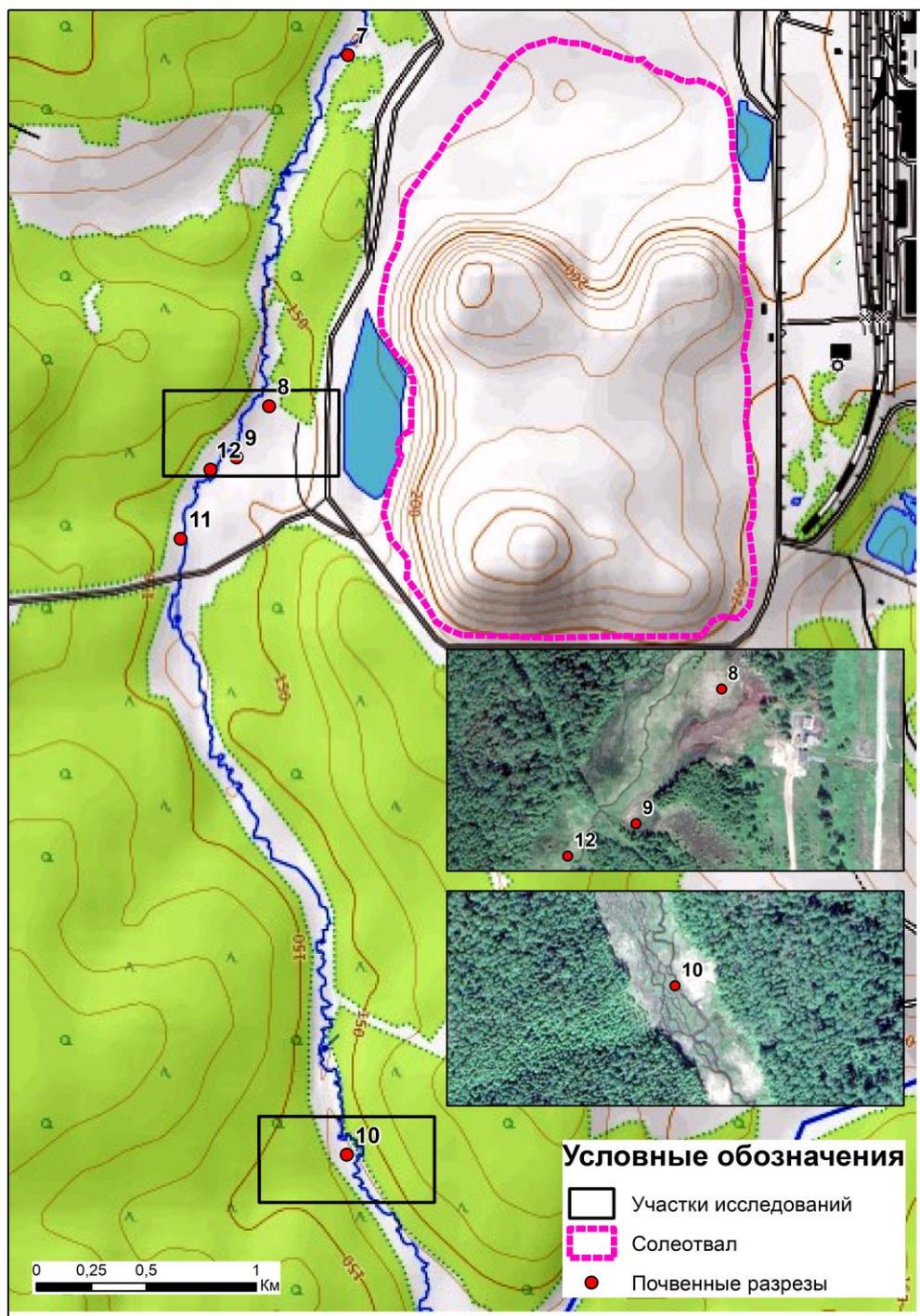


Рисунок 6 – Расположение почвенных разрезов в долине р. Черная



Рисунок 7 – Расположение почвенных разрезов в долине р. Ленва

На берегах р. Усолка возле двух рассолоподъемных скважин, функционирующих, по мнению археологов, с XVI в., были заложены четыре почвенных разреза; отобраны почвенные пробы и пробы вод, изливающихся из рассолоподъемных скважин (рис. 8).

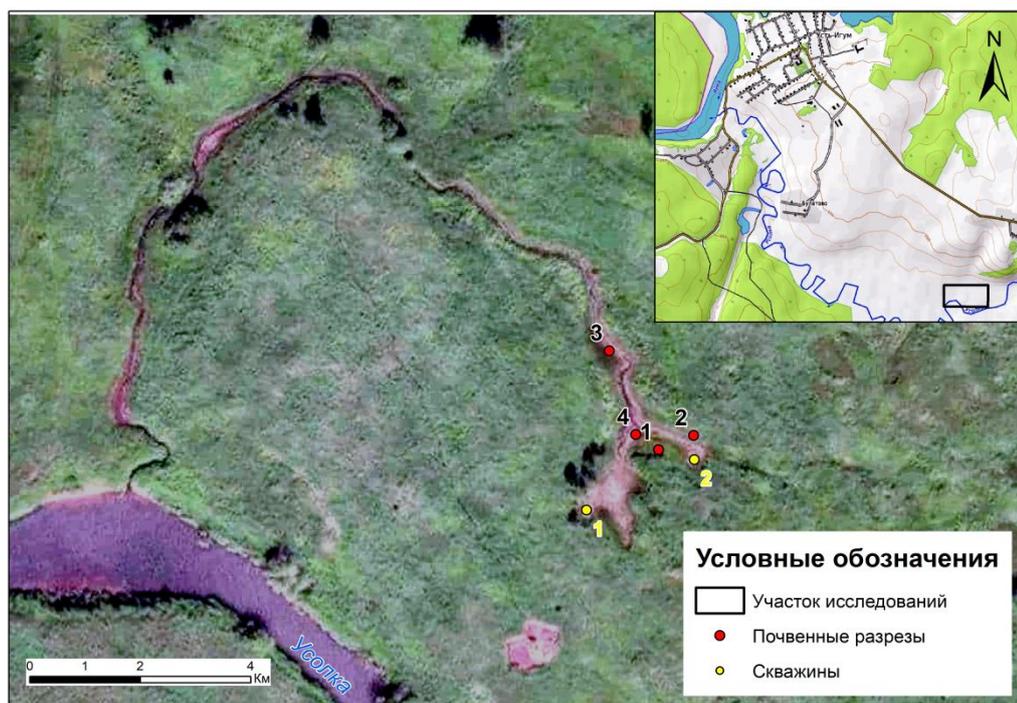


Рисунок 8 – Расположение почвенных разрезов в долине р. Усолка

2.3. Методы исследований

В пробах поверхностных и почвенно-грунтовых вод определяли:

- рН – потенциометрическим методом [ГОСТ 34774-2021];
- минерализацию (сухой остаток) – весовым методом [ГОСТ 18164-72];
- ионы кальция и магния – титриметрическим методом [ГОСТ 23268.5-78];
- ионы натрия и калия – пламенно-фотометрическим методом [ГОСТ 23268.6-78; ГОСТ 23268.7-78];
- содержание хлоридов – аргентометрическим методом [ГОСТ 4245-72];
- содержание сульфатов – гравиметрическим (весовым) методом [ГОСТ 4389-72];
- содержание HCO_3^- – титрованием раствором серной кислоты [ГОСТ 31957-2012];

В образцах из фоновых и засоленных почв определяли:

- содержание углерода органических соединений (гумуса) – титриметрическим методом, вариант Тюрина;
- $pH_{\text{вод}}$, $pH_{\text{сол}}$ – потенциометрическим методом [ГОСТ 26423-85; ГОСТ 26483-85];
- гидролитическая кислотность – по методу Каппена в модификации ЦИНАО [ГОСТ 26212-2021];
- состав обменных катионов в засоленных почвах – методом Пфеффера в модификации Молодцова и Игнатовой [Молодцов, Игнатова, 1975];
- сумма оснований в фоновых почвах по методу Каппена [ГОСТ 27821-2020];
- емкость катионного обмена (ЕКО) рассчитали путем сложения суммы оснований и гидролитической кислотности;
- содержание карбонатов и гипса – по методу Молодцова [Молодцов и др., 1979];
- ионно-солевой состав изучали в водной вытяжке (в соотношении почва : вода равным 1:5) [Аринушкина, 1970]: Na^+ и K^+ – пламенно-фотометрическим методом, Cl^- – аргентометрическим методом по Мору, SO_4^{2-} – гравиметрическим (весовым) методом; HCO_3^- – титрованием раствором серной кислоты; Ca^{2+} , Mg^{2+} – комплексонометрическим методом, сумма солей (%) и сумма токсичных солей (%) – расчетным методом;
- плотный остаток – весовым методом [ГОСТ 26423-85].

По результатам лабораторных исследований уточнили диагностику почвенных горизонтов, определили классификационное положение аллювиальных почв в соответствии с современной классификацией почв РФ

[Классификация и диагностика почв..., 2004] и мировой реферативной базой почвенных ресурсов [WRB, 2022].

В 2022 г. на контрольных участках в долинах рек Черная и Ленва в почвенных прикопках провели наблюдения за динамикой показателей рН и Eh – потенциометрическим методом с помощью портативного рН метра HI-9125 (Hanna Instruments, Германия), оборудованного электродами редокс HI 3230, рН HI 1230 и термокомпенсатором. Измерения провели на глубинах 10±2, 20±2, 30±2, 40±2 см – в трехкратной повторности, в период с 17 июня по 7 сентября 2022 г.: 17.06, 04.07, 14.07, 25.07, 02.08 и 07.09. Сопряженно из прикопок отбирали смешанные почвенные пробы для определения в лабораторных условиях полевой влажности – весовым методом.

Результаты режимных наблюдений за полевой влажностью, окислительно-восстановительным потенциалом (Eh), величиной рН были обработаны методом регрессионного анализа; адекватность полученных уравнений оценили при уровне значимости нулевой гипотезы $P < 0,05$.

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

ГЛАВА 3. РАЗВИТИЕ СОЛОНЧАКОВОГО ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ В АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ПОЧВАХ

3.1. Характеристика фоновых аллювиальных почв Вятско-Камской почвенной провинции

Зональные почвы таежно-лесных ландшафтов незасоленные и, как правило, характеризуются кислой реакцией почвенной среды [Перельман, 1966; Перельман, Касимов, 1999]. Ландшафты речных долин таежно-лесной зоны Пермского края отнесены к пресным кислородно-глеевым гидрокарбонатно-кальциевым ландшафтам кислого класса [Хайрулина, 2022].

Фоновые почвы долин малых рек представлены на примере двух аллювиальных почв с территории Вятско-Камской почвенной провинции, расположенных в Добрянском районе Пермского края.

Разрез 20 на фоновой аллювиальной серогумусовой глеевой почве (рис. 9) заложен в нескольких метрах от русла р. Нижний Лух, под осоково-злаково-разнотравной растительностью (осока, кострец, вейник, крапива, иван-чай, бодяк, хвощ, щитовник и др.).

Морфологическое описание почвенного профиля:

A_{Yg} – серогумусовый глееватый, 0-10/8 см; буровато-серый, комковатый, легкосуглинистый, мажущийся, с очень обильными корнями; переход постепенный волнистый.

G[~] – глеевый, 10-37 см; буровато-сизый с ржаво-рыжими пятнами; супесчаный, рыхлый, слаболипкий, сырой, содержит корни, переход постепенный.

CG[~] >37 см – почвообразующая глеевая порода, серо-сизая, песчаная, грунтовая вода на глубине около 40 см.

Сизые оттенки в окраске почвы указывают на развитие оглеения. Холодные оттенки (сизый, зеленоватый, серо-голубой) традиционно

интерпретируются как результат переувлажнения почв и присутствия соединений Fe (II) [Зайдельман, 2004; Смирнова, Козлов, 2023].

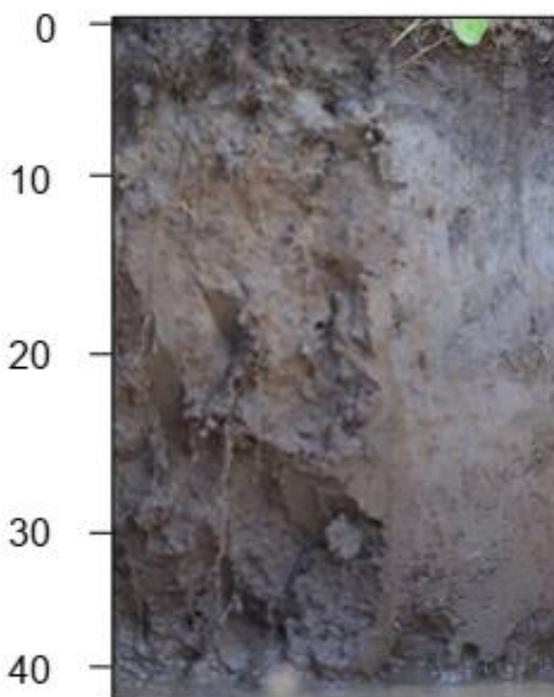


Рисунок 9 – Аллювиальная серогумусовая поверхностно оглеенная почва в долине р. Нижний Лух (разрез 20)

Разрез 21 на фоновой аллювиальной серогумусовой глееватой почве (рис. 10) заложен в 3-4 м от русла р. Большой Висим, под осоково-злаково-разнотравной растительностью (дудник, осока, кострец безостый, вейник, иван-чай, бодяк, хвощ, кислица, щитовник и др.).

Морфологическое описание почвенного профиля:

A_Yg – серогумусовый глееватый, 0-11(9) см; серовато-коричнево-бурый, рыхлый, комковатый; легкосуглинистый; влажный, с обильными корнями и встречаются ржавые прожилочки и пятна; переход заметный ровный.

A_Y/C_g[~] – переходный глееватый 11-26/15 см; желтовато-бурый с ржавыми пятнами и прожилками; бесструктурный, суглинистый, сырой, корней много, обломки гниющей древесины.

C_g[~] –почвообразующая порода с глубины 26 см – буроватый суглинок. Сочится вода.

В верхних частях профиля обеих фоновых аллювиальных почв присутствуют ржавые прожилочки и пятна, которые появляются при кратковременной смене постоянного застойного водного режима на застойно-промывной [Таргульян и др., 1987; Зайдельман, 2004.].

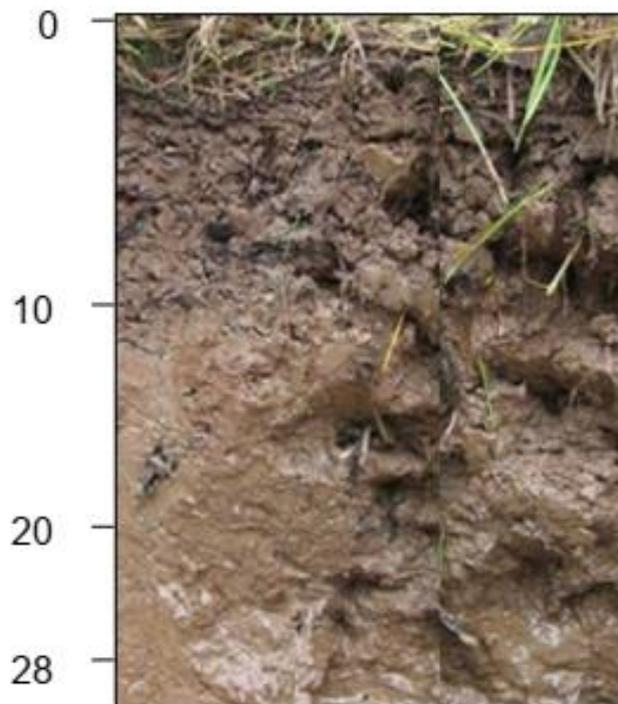


Рисунок 10 – Аллювиальная серогумусовая поверхностно оглеенная почва в долине р. Большой Висим (разрез 21)

У фоновых аллювиальных серогумусовых почв мелкие по мощности гумусовые горизонты (около 10 см), по количеству гумуса они мало гумусированные. Емкость катионного обмена связана с гранулометрическим составом; поглотительная способность крайне низкая у минеральных песчаных и супесчаных горизонтов, низкая – у гумусовых легкосуглинистых горизонтов. По величине $pH_{\text{вод}}$ почвы имеют сильноокислую и слабоокислую реакцию среды (5,1-6,0 pH), слабонасыщены основаниями ($V = 50-61\%$) (табл. 1).

Свойства исследованных 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].

Таблица 1 – Физико-химические и химические свойства фоновых аллювиальных почв

Расположение разреза	Горизонт	Глубина, см	pH _{вод}	pH _{сол}	C, %	H ⁺ +Al ³⁺	S*	ЕКО
						ммоль(экв)/100 г		
Долина р. Н. Лух	AУg	10-20	5,09	4,17	2,22	7,2	7,1	14,3
	G	20-30	5,44	4,31	1,05	4,2	5,7	9,9
	CG	37-47	5,99	5,62	-	-	-	-
Долина р. Б. Висим	AУg	3-10	5,30	4,52	1,85	8,2	14,7	22,9
	AУ/Cg	15-25	5,65	4,85	0,45	5,3	8,4	13,7

Примечание: S – сумма обменных оснований; (-) – не определялось.

Согласно классификации почв России [Классификация и диагностика почв России, 2004] фоновые почвы получили следующее название: аллювиальная серогумусовая поверхностно оглеенная мало гумусированная ненасыщенная (в долине р. Н. Лух) / слабонасыщенная (в долине р. Б. Висим) легкосуглинистая (в долине р. Н. Лух) / среднесуглинистая (в долине р. Б. Висим) почва.

В соответствии с мировой реферативной базой почвенных ресурсов [WRB, 2022] фоновая почва в долине р. Н. Лух классифицирована как Dystric Gleyic Fluvisols (Loamic); в долине р. Б. Висим – Eutric Gleyic Fluvisols (Loamic).

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

Согласно открытым источникам, в окрестностях г. Березники складирование отходов предприятием ПАО «Уралкалий» началось в 60-70 гг. XX в., в настоящее время в пределах развитой речной сети расположены 4

солеотвала и 4 шламохранилища. За полстолетия от шламохранилища Березниковского производственного рудоуправления БКПРУ-2 в направлении ручья Понамаревский Лог (приток р. Зырянка) образовался ореол загрязнения подземных вод протяженностью около 3,5 км и шириной 1-3 км. Другая часть фильтрационных рассолов мигрирует в южном направлении и разгружается в р. Ленва. Объекты отвально-шламового хозяйства БКПРУ-3 являются источниками загрязнения рек Волим, Черная и Ленва. В северном направлении от шламонакопителя БКПРУ-3 сформировался ореол засоления подземных вод шириной до 2,5 км. От промплощадки и солеотвала БКПРУ-4 образовался ореол засоления протяженностью около 1 км и шириной до 1,5 км, вытянутый в направлении р. Быгель, содержание хлоридов в котором составляет 0,2-2,0 г/л [Бабошко, Бачурин, 2004; Шейнкман, Ивлиева, 2023].

Под влиянием атмосферных осадков солевые отходы растворяются, образующиеся рассолы являются фактором засоления поверхностных и подземных вод; соли из шламонакопителей за счет инфильтрации также поступают в подземные воды [Максимович и др., 2010]. Химический состав дренажных вод от солеотвалов и шламохранилищ характеризуется хлоридно-натриевым составом. Дренажные воды пополняют местные водоносные горизонты. В процессе миграции грунтовых вод происходит трансформация химического состава в результате взаимодействия с горными породами [Хайрулина, 2022].

Почвенно-грунтовые воды в долине р. Быгель, залегающие на глубине 90-120 см, по степени минерализации относятся к рассолам [Овчинников, 1970; Классификация почв, 1977] (табл. 2). Согласно А.И. Перельману [1982] грунтовые воды относятся к классу слабокислых вод. Среди анионов в них преобладали хлориды, на долю сульфатов приходилось около 4% от суммы анионов. В составе катионов доминировали Na^+ и K^+ , т.е. химизм вод был хлоридным калиево-натриевым.

Таблица 2 – Содержание ионов в почвенно-грунтовых водах долины
р. Быгель, ммоль(экв)/л

pH	Минерализация, г/л	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
6,3	111,4	108	26	1080	494	1644	67	0
6,5	106,9	48	11	1070	500	1564	63	0

Химизм вод р. Быгель был хлоридным кальциево-натриевым; по степени минерализации, согласно А.М. Овчинникову [1970], воды относятся к категории соленых вод.

Установлено, что минерализация вод соленого ручья в долине р. Черная, составляла 26 г/л (табл. 3), что, согласно используемым критериям [Овчинников, 1970], позволяет отнести их к категории вод с повышенной соленостью. Воды ручья относятся к классу слабокислых вод [Перельман, 1982], среди катионов в них преобладают Na⁺ и Ca²⁺, среди анионов доминируют хлориды. Таким образом, химизм вод соленого ручья был хлоридным кальциево-натриевым.

Таблица 3 – Содержание ионов в поверхностных и почвенно-грунтовых водах долины р. Черная, ммоль(экв)/л

Место отбора	pH	M*, г/л	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Соленый ручей	6,4	25,8	118	79	248	21	397	25	2
Река Черная	7,0	5,7	40	8	30	2	71	11	2
Грунтовые воды	6,3	12,4	38	22	115	23	177	12	4
	6,2	5,7	10	3	63	11	79	6	0

Примечание: * – минерализация

Согласно предложенным критериям [Овчинников, 1970], почвенно-грунтовые воды относятся к группе вод с повышенной соленостью. Среди катионов в грунтовых водах доминировал Na⁺, на втором месте, как правило,

был Ca^{2+} . В составе анионов преобладали хлориды, относительное содержание SO_4^{2-} составляло 6-7% от суммы анионов. Таким образом, химизм грунтовых вод в долине р. Черная хлоридно-натриевый. По щелочно-кислотным условиям грунтовые воды отнесли к классу слабокислых вод [Перельман, 1982].

Воды шламохранилища БКПРУ-3 по степени минерализации, согласно А.М. Овчинникову [1970], относятся к рассолам и характеризуются нейтральным составом солей (табл. 4). В водах шламохранилища среди анионов преобладали хлориды, на сульфат-ионы приходилось около 3% от суммы анионов. В составе катионов доминировали Na^+ и K^+ , доля Ca^{2+} и Mg^{2+} составляла менее 4%. Соответственно, химизм вод шламохранилища был хлоридным калиево-натриевым. Воды мелководного заболоченного водоема в долине р. Ленва имели подобный химизм при несколько повышенной минерализации [Eremchenko, Pakhorukov, Shestakov, 2020].

Воды р. Ленва были несколько менее минерализованными (группа вод с повышенной соленостью) [по Овчинникову, 1970] и хлоридными магниево-натриевыми по химическому составу. Ранее установлено, что в районе шламохранилища сухой остаток речной воды колебался в пределах 8-13 г/л [Хайрулина, 2018].

Таблица 4 – Содержание ионов в водах шламохранилища, в поверхностных и грунтовых водах долины р. Ленва, ммоль(экв)/л

Место отбора	pH	M^* , г/л	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Шламохранилище	6,8	99,0	80	8	1150	434	1520	40	2
Заболоченный водоем	6,7	109,8	137	29	1238	434	1625	40	2
Грунтовые воды	6,5	40,0	110	29	350	180	550	10	2
Река Ленва	6,5	15,3	51	17	113	32	212	6	2

Примечание: M^* – минерализация

Состав почвенно-грунтовых вод в долине р. Ленва формируется под воздействием соленой речной воды и подземных соленых вод, мигрирующих по уклону местности от шламохранилища. Степень минерализации почвенно-грунтовых вод составляла 40 г/л, по А.М. Овчинникову [1970] грунтовые воды относятся к группе вод, переходных к рассолам. Химизм грунтовых вод был хлоридным калиево-натриевым.

По щелочно-кислотным условиям поверхностные и почвенно-грунтовые воды долины р. Ленва относятся к классу нейтральных и слабощелочных вод [Перельман, 1982].

3.3. Характеристика техногенно засоленных аллювиальных почв

Природные поверхностные и подземные воды Пермского края являются пресными, преимущественно, гидрокарбонатно-кальциевыми [Копылов, 2021]. Результаты исследований на контрольных участках долин малых рек Быгель, Черная и Ленва показали, что почвенно-грунтовые воды были солеными (вплоть до рассолов) хлоридного натриевого и калиево-натриевого химизма. В их составе на долю сульфат-ионов приходилось около 2-7% от общего количества анионов. Под влиянием этих вод происходило развитие солончакового почвообразования.

3.3.1. Техногенно засоленные аллювиальные почвы в долине р. Быгель

Разрез № 5 расположен в центре исследуемого участка речной долины. Координаты разреза 5 (в системе координат WGS-84): N 59.27.419, E 056.55.052. Проективное покрытие растительности – 30-40%, произрастают бескильница расставленная (*Puccinellia distans* (Jacq.) Parl.), лебеда раскидистая (*Atriplex patula* L.), марь сизая (*Chenopodium glaucum* L.), ситник жабий (*Juncus bufonius* L.). Лишенная растений поверхность почвы покрыта выцветами солей. Ниже следует морфологическое описание профиля

серогумусовой аллювиальной глеевой техногенно засоленной почвы
(рис. 11).

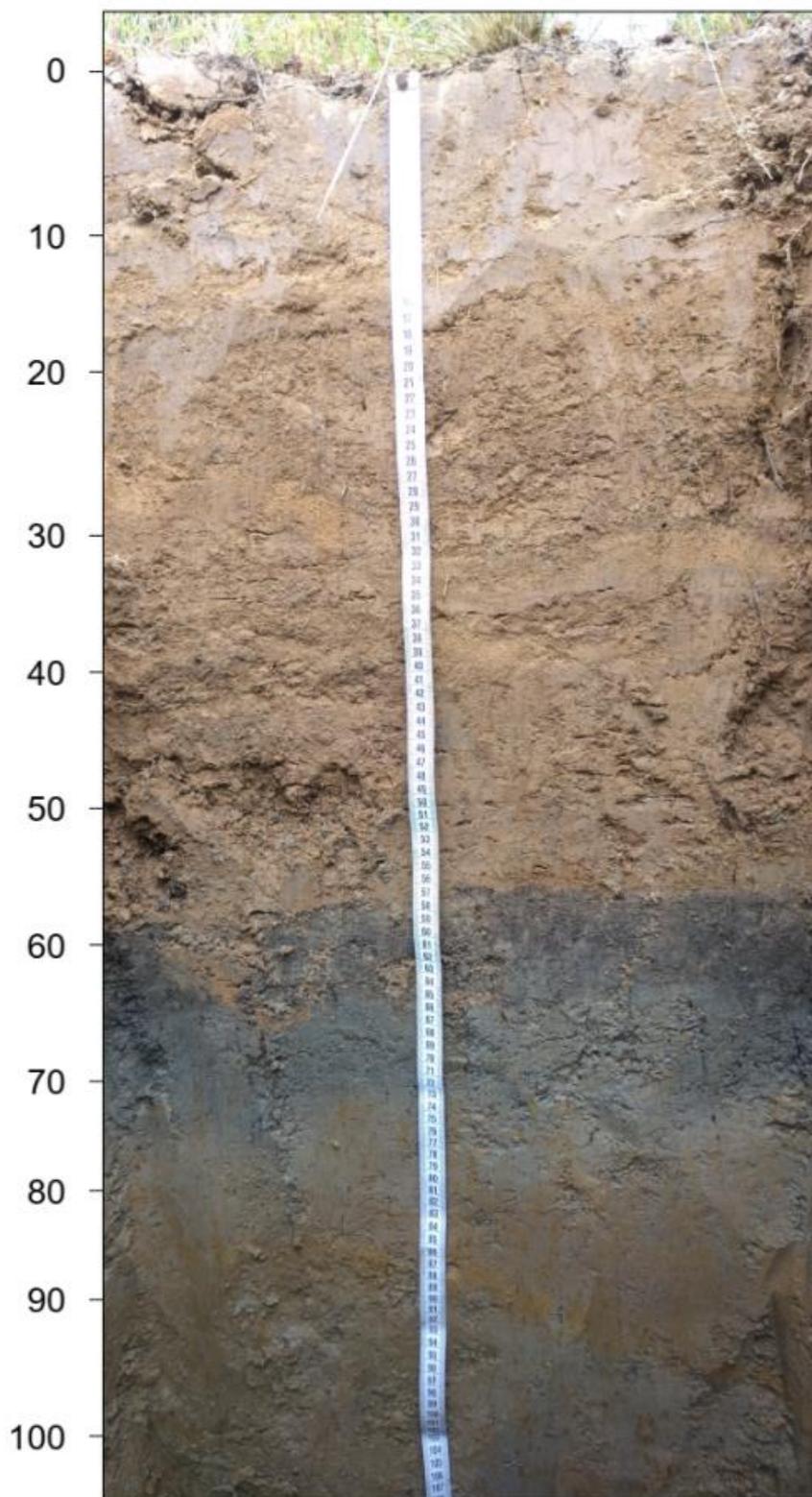


Рисунок 11 – Аллювиальная серогумусовая поверхностно оглеенная
солончаковая почва в долине р. Быгель (разрез 5)

AУ – серогумусовый горизонт, 0-10/10 см, верхний слой 0-4 см переплетен корнями травянистых растений, светлобурый, суглинистый, структура порошистая, влажный, переход очень постепенный.

AУ/Cg[~] – переходный глееватый горизонт, 10-57/47 см, рыжеватобурый, в нижней части горизонта появляются ржавые примазки; слоистый: слои песка перемежаются суглинистыми слоями; корни трав проникают до глубины около 43-45 см; переход к нижележащему горизонту заметный по цвету и структуре.

[AУg] – погребенный гумусовый глееватый горизонт, 57-80/23 см, темно-серой окраски, местами почти черный со стальным блеском, в нижней части появляются сизые тона; пронизан остатками корней трав, сохранивших анатомическое строение, структура крупнозернистая и мелкоореховатая; присутствуют корневины, покрытые железистыми новообразованиями; суглинистый, влажный; переход к нижележащему горизонту постепенный.

CG[~] – почвообразующая глеевая порода, 80-127/47 см, рыже-сизой окраски с множеством ржавых пятен, в нижней части ржавые пятна большего размера; бесструктурный, легкосуглинистый; с глубины около 124 см сочится вода.

Разрез 6 расположен в краевой части исследуемого участка поймы, на расстоянии около 1 м от русла высохшего ручья, поверхность которого покрыта выцветами солей. Координаты разреза 6 (в системе координат WGS-84): N 59.27.442, E 056.55.055. Проективное покрытие растительности не более 30-40%, произрастают бескильница расставленная (*Puccinellia distans*), лебеда раскидистая (*Atriplex patula*), мать-и-мачеха (*Tussilago farfara* L.). Ниже следует морфологическое описание профиля серогумусовой аллювиальной глеевой техногенно засоленной почвы (рис. 12).

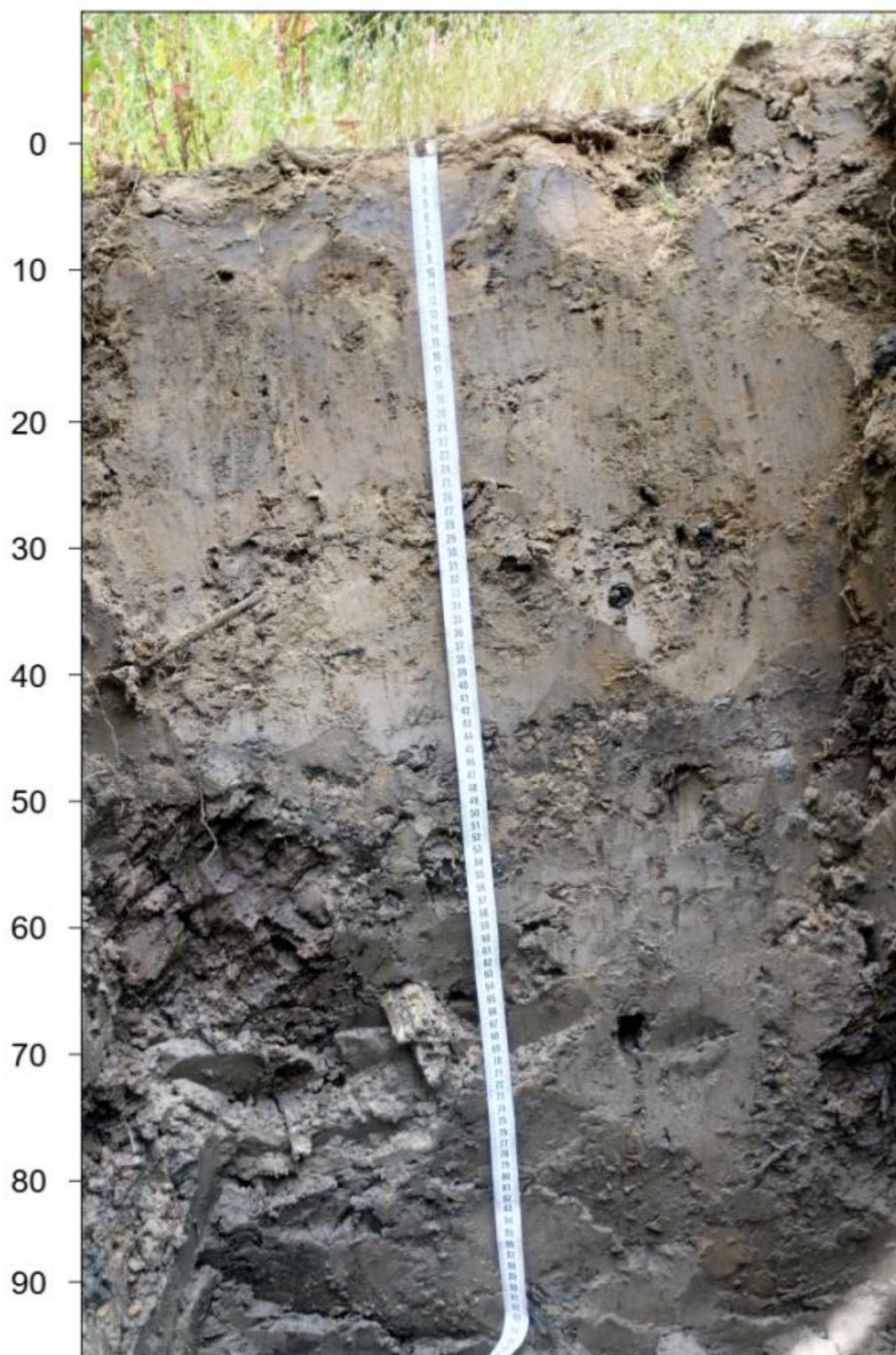


Рисунок 12 – Аллювиальная серогумусовая поверхносто оглеенная солончаковая почва в долине р. Быгель (разрез б)

AУg – серогумусовый глееватый горизонт, 0-10/10 см; темно-бурой окраски с темными, почти черными пятнами в местах скопления органических остатков; бесструктурный, суглинистый, влажный, переплетен корнями; переход к нижележащему горизонту постепенный.

AУ/Cg~~ – переходный глееватый горизонт, 10-41/31 см; неоднородной окраски: рыже-серо-бурый с черными пятнами и ржавыми примазками; слоистый: суглинистые слои чередуются со слоями песка; бесструктурный, влажный; переход к нижележащему горизонту заметный.

[AУg] – погребенный гумусовый глееватый горизонт, 41-56/15 см, темно-серой окраски, суглинистый, включает материал плотных глинистых кусочков, обломки веток, древесины, множество мелких корней, переход к нижележащему горизонту постепенный.

CG~~ – глеевая почвообразующая порода, 56-95/40 см, окраска сизая, песчаная, бесструктурная, сырая, встречаются обломки корней деревьев; с глубины 93 см сочится вода.

Холодная окраска (сизая) почвообразующей породы в описанных разрезах может быть обусловлена, во-первых, освобождением в анаэробной среде минеральных зерен мелкозема (хлорида, плагиоклаза, кварца, каолинита, бейделита и др.) от гидроокисных железистых оболочек и появлением их собственного цвета. Во-вторых, при глееобразовании образуется голубовато-зеленая гидрозакись железа [Зайдельман, 2004].

В верхней части профиля аллювиальных почв отмечено обилие ржавых примазок, которые появляются при кратковременной смене постоянного застойного водного режима на застойно-промывной [Таргульян и др., 1987; Зайдельман, 2004].

Одновременно с признаками глеегенеза характерными, для фоновых аллювиальных почв, в профиле обоих солончаковых почв присутствует черная окраска и черные пятна, возможно, это результат образования сульфидов железа. Потенциал для образования сульфидов в этих почвах

имеется, т.к. для этого требуется присутствие сульфат-ионов, железосодержащих минералов и органического вещества [Ivarson et al, 1982; Kittrick et al, 1982; Pons et al, 1982; Fanning, 2017]. Обилие железистых новообразований свидетельствует о подвижности Fe вследствие редукции. В нижних слоях техногенно засоленных почв Прикамья преобладали анаэробные бактерии рода *Shewanella*, способные к восстановлению железа и марганца, денитрификации, а также к продукции сульфидов [Хайрулина и др., 2022]. На образование сульфидных солончаков техногенного происхождения в Прикамье указывала Е.А. Хайрулина [2022].

В профиле аллювиальных почв, находящихся под постоянным воздействием минерализованных вод, аккумуляровались водорастворимые соли (рис. 13, приложение Б). В водной вытяжке из почв количество гидрокарбонатов было минимальным (0,2-0,3 ммоль(экв)/100 г). Среди анионов доминировали хлориды, их содержание было на уровне 0,7-74,8 ммоль(экв)/100 г почвы. Количество сульфат-ионов находилось в пределах 1,2-6,8 ммоль(экв)/100 г. Среди катионов преобладал Na^+ , на втором месте по содержанию был K^+ , на его долю приходилось около 36% от суммы катионов [Пахоруков, Четина, Еремченко, 2022].

Методом связывания водорастворимых ионов в гипотетические соли [по: Мякина, Аринушкина, 1979] в почвах долины р. Быгель было установлено преобладание хлоридов натрия и калия.

В соответствии с предложенными градациями засоленности [Классификация и диагностика почв..., 2004] почва в разрезе 5 является солончаковой, сильнозасоленной – в серогумусовом горизонте, с хлоридным калиево-натриевым химизмом (рис. 13, А). Почва в разрезе 6 – солончаковатая, сильнозасоленная – в средней части профиля, с хлоридным калиево-натриевым химизмом (рис. 13, Б).

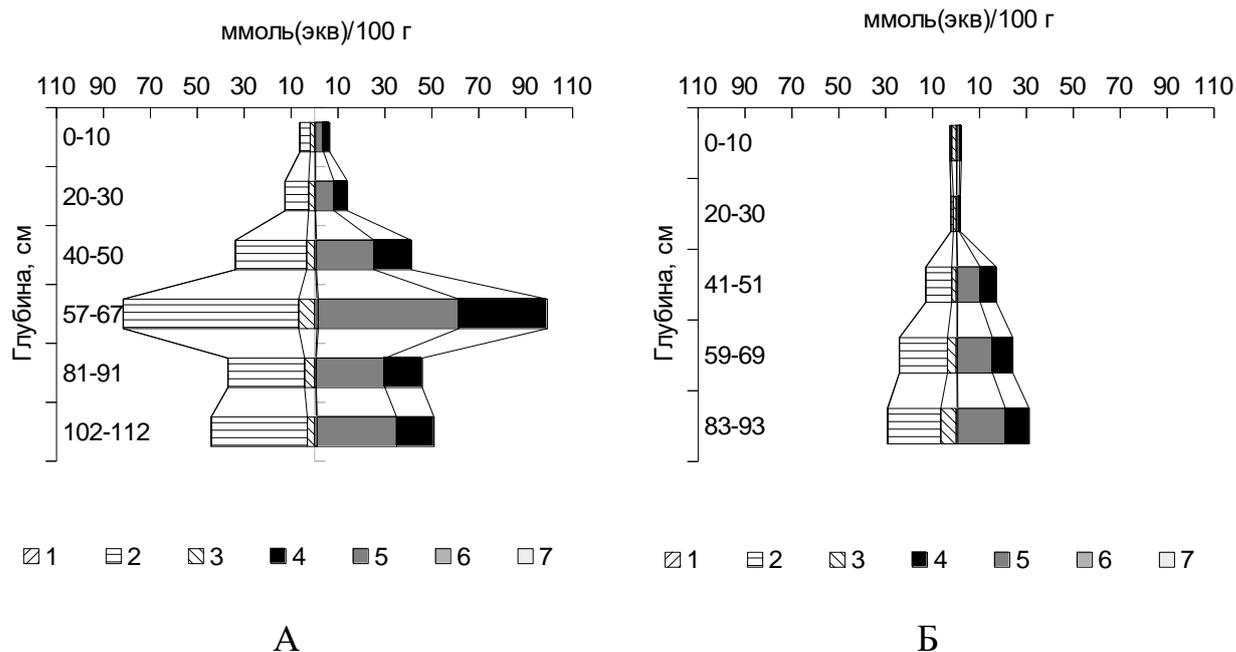


Рисунок 13 – Содержание ионов (1 – HCO_3^- ; 2 – Cl^- ; 3 – SO_4^{2-} ; 4 – K^+ ; 5 – Na^+ ; 6 – Mg^{2+} ; 7 – Ca^{2+}) в водных вытяжках из почв в долине р. Быгель: А – разрез 5, Б – разрез 6

В верхних горизонтах аллювиальных почв долины р. Быгель сумма токсичных солей находилась в пределах 0,2-0,4%, наибольшая аккумуляция токсичных солей (1,6-5,2%), прослеживалась в нижнем полуметровом слое (приложение Б) [Пахоруков, Четина, Еремченко, 2022].

Реакция почвенной среды в аллювиальных почвах варьировала от слабокислой ($\text{pH}_{\text{вод}}=6,0$) до слабощелочной ($\text{pH}_{\text{вод}}=7,8$) (табл. 5). Присутствие актуальной кислотности в солончаковой почве из разреза 5 рассматриваем как остаточный признак кислотности фоновых аллювиальных почв таежно-лесной зоны. Карбонаты присутствовали в количестве 0,5-1,2%, и в соответствии с ГОСТ Р 70229-2022 почвы являются некарбонатными. Присутствия гипса в почвах не наблюдали. Таким образом, в отличие от аллювиальных техногенно засоленных почв в долинах рек Черная, Ленва и Усолка (см. ниже), солончаковые почвы из долины р. Быгель некарбонатны и в них отсутствует гипс. Солеотвал БКПРУ №4 функционирует только с

1986 г. Для аккумуляции карбонатов и гипса в ненасыщенных аллювиальных почвах необходимо определенное время развития солончакового почвообразования.

Таблица 5 – Физико-химические и химические свойства солончаковых почв в долине р. Быгель

№ разреза	Глубина, см	C _{орг} , %	pH _{вод}	pH _{сол}	Обменные катионы, ммоль(экв)/100 г					ЕКО, ммоль(экв)/100 г	СО ₂ карб., %
					Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	H ⁺ +Al ³⁺		
5	0-10	2,73	6,51	5,27	0,80	1,28	4,64	13,67	2,07	22,46	0
	20-30	0,65	6,16	5,21	0,64	0,80	3,48	11,76	1,13	17,81	0
	40-50	-	5,95	5,55	0,80	0,96	3,97	17,39	1,69	24,81	0
	57-67	-	6,42	5,96	0,64	1,12	8,20	19,34	2,45	31,75	0
	81-91	-	6,78	6,15	0,80	0,96	3,81	15,07	0	20,64	1,18
	102-112	-	6,17	5,78	0,96	0,96	3,81	14,69	1,32	21,74	0
6	0-10	2,08	7,13	5,22	1,60	1,28	5,97	13,67	0	22,52	0,95
	20-30	0,51	7,45	5,55	1,12	1,28	3,10	6,49	0	11,99	0,47
	41-51	-	7,64	7,14	1,76	1,12	6,13	14,30	0	23,31	1,18
	59-69	-	7,43	6,84	0,96	0,96	2,97	8,16	0	13,05	0,95
	83-93	-	7,77	7,41	1,28	0,96	3,23	8,63	0	14,1	0,71

Примечание: (-) – не определялось.

В составе обменных катионов аллювиальных почв преобладают ионы K^+ , которые составляют 54-70% от емкости катионного обмена (ЕКО) (табл. 5). На долю натрия приходится около 16-26% ЕКО, содержание обменного кальция и магния было небольшим [Пахоруков, Четина, Еремченко, 2022]. По содержанию обменного натрия данные почвы можно охарактеризовать как малонатриевые.

В почве из разреза 5 присутствует обменные H^+ и Al^{3+} – около 6-9% от ЕКО, по-видимому, остаточная обменная кислотность унаследована от фоновой аллювиальной почвы. Содержание органического вещества [по шкале: Гришина, Орлов, 1978] в почвах находится на среднем уровне.

В соответствии со строением почвенного профиля и свойствами аллювиальные почвы из долины р. Быгель получили следующие названия:

разрез 5 – аллювиальная серогумусовая поверхностно оглеенная солончаковая сильнозасоленная хлоридная калиево-натриевая ненасыщенная малонатриевая суглинистая почва; Sodic Gleyic Fluvisols (Loamic, Salic).

разрез 6 – аллювиальная серогумусовая поверхностно оглеенная солончаковатая сильнозасоленная хлоридная калиево-натриевая насыщенная малонатриевая суглинистая почва; Sodic Gleyic Fluvisols (Loamic, Salic).

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. Внешний вид почв представлен на рисунках 14-19.

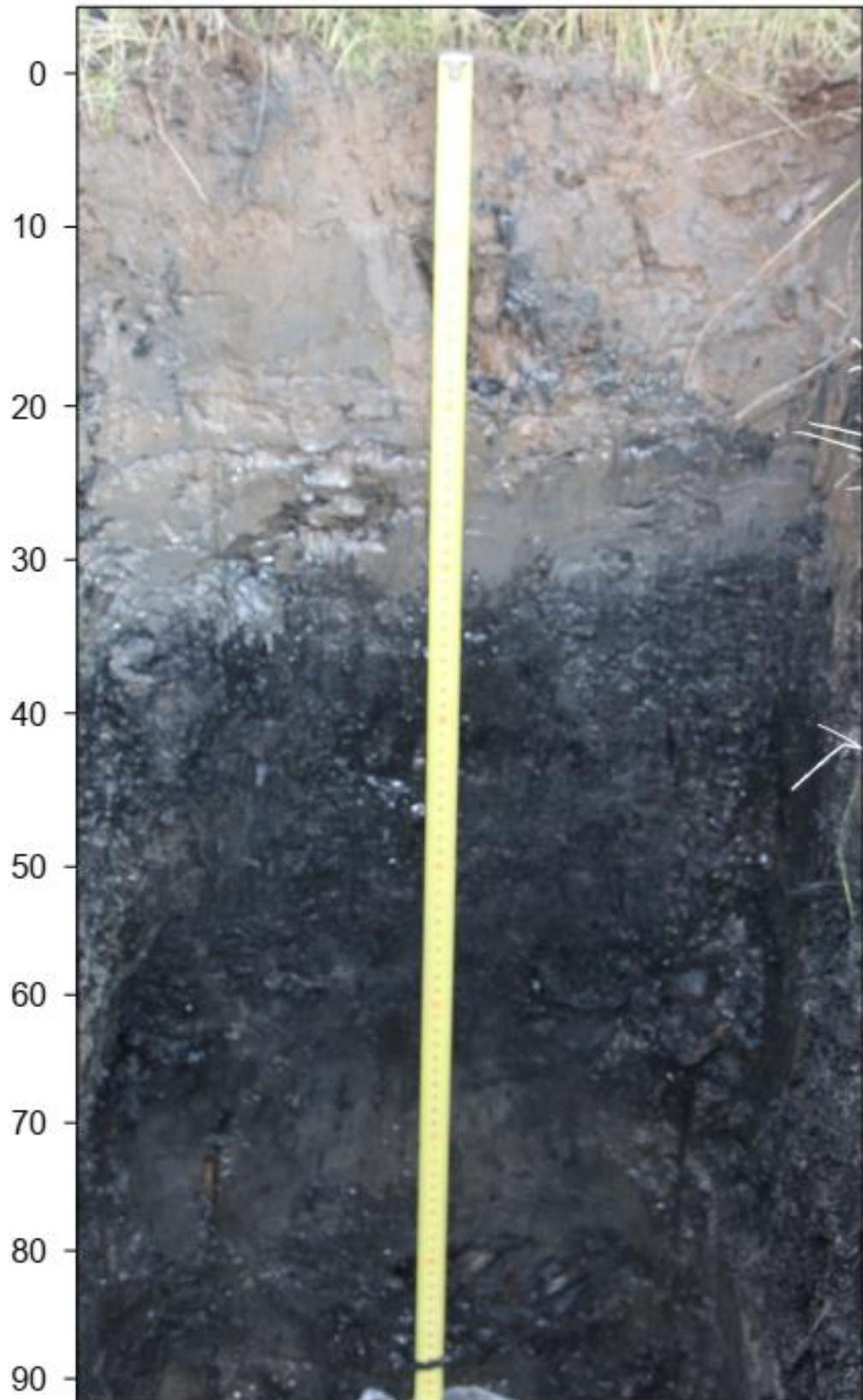


Рисунок 14 – Аллювиальная серогумусовая поверхностно оглеенная солончаковая почва из долины р. Черная (разрез 7)

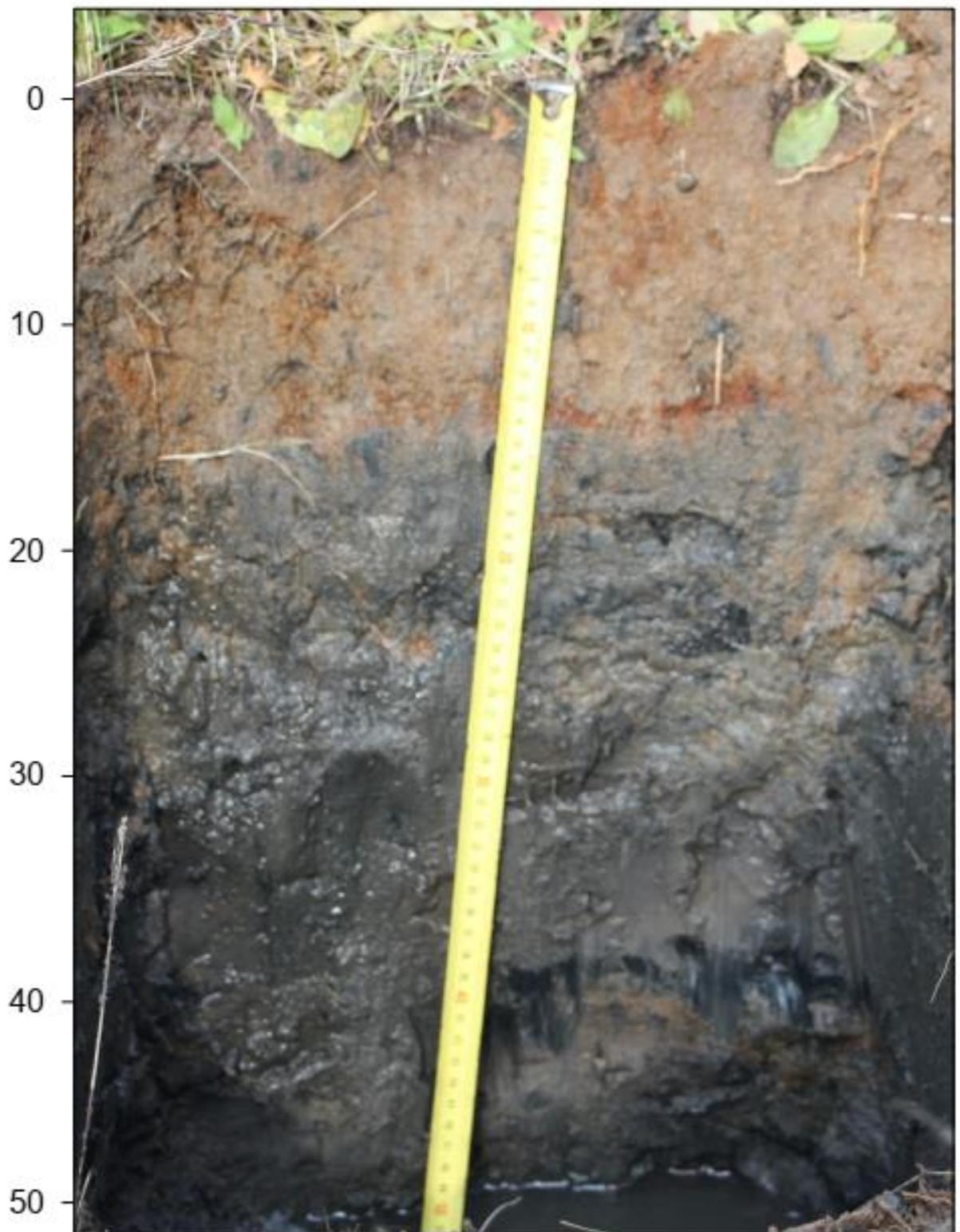


Рисунок 15 – Аллювиальная серогумусовая поверхностно оглеенная солончаковая почва из долины р. Черная (разрез 8)

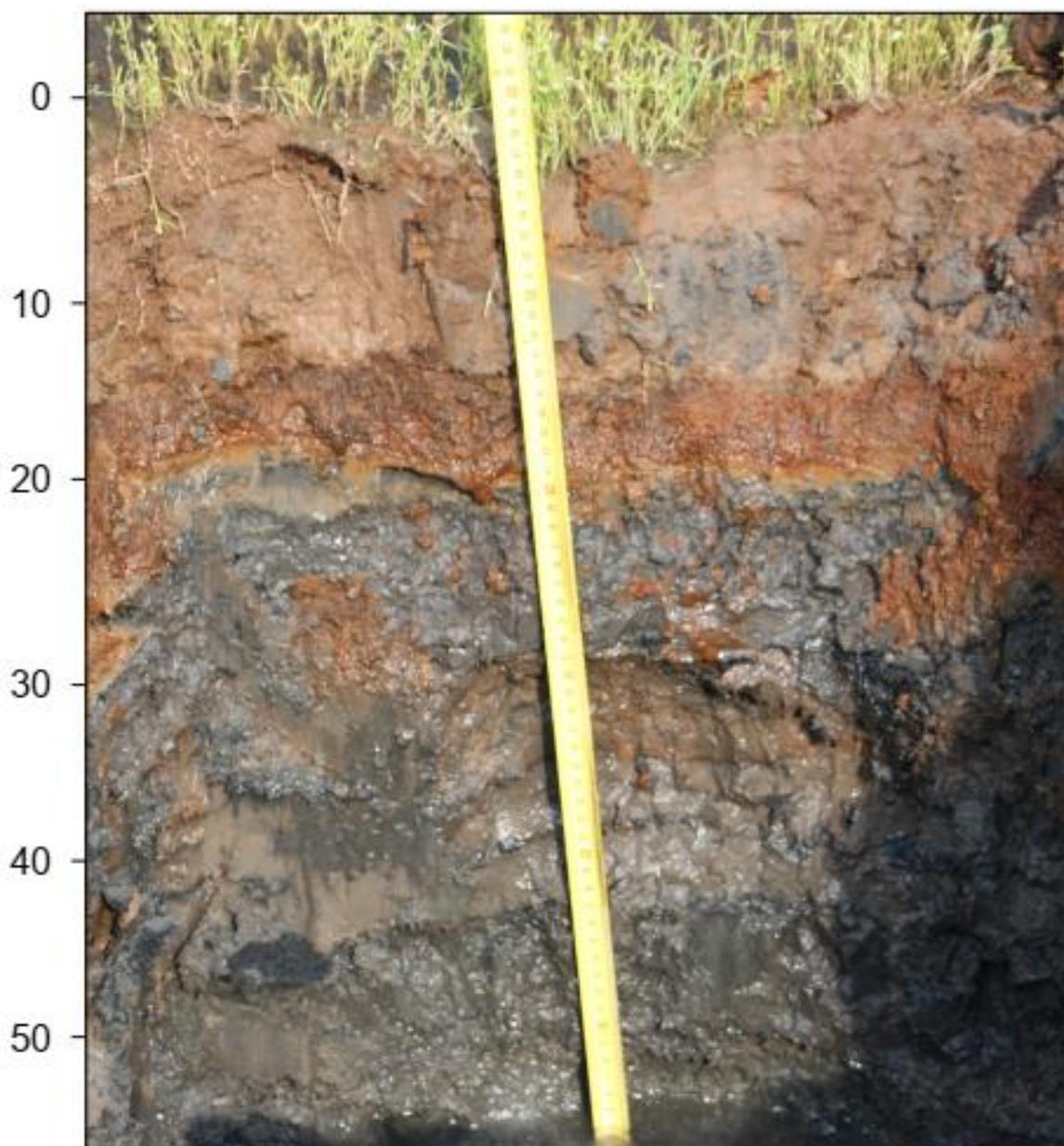


Рисунок 16 – Аллювиальная серогумусовая поверхность оглеенная солончаковая почва из долины р. Черная (разрез 9)

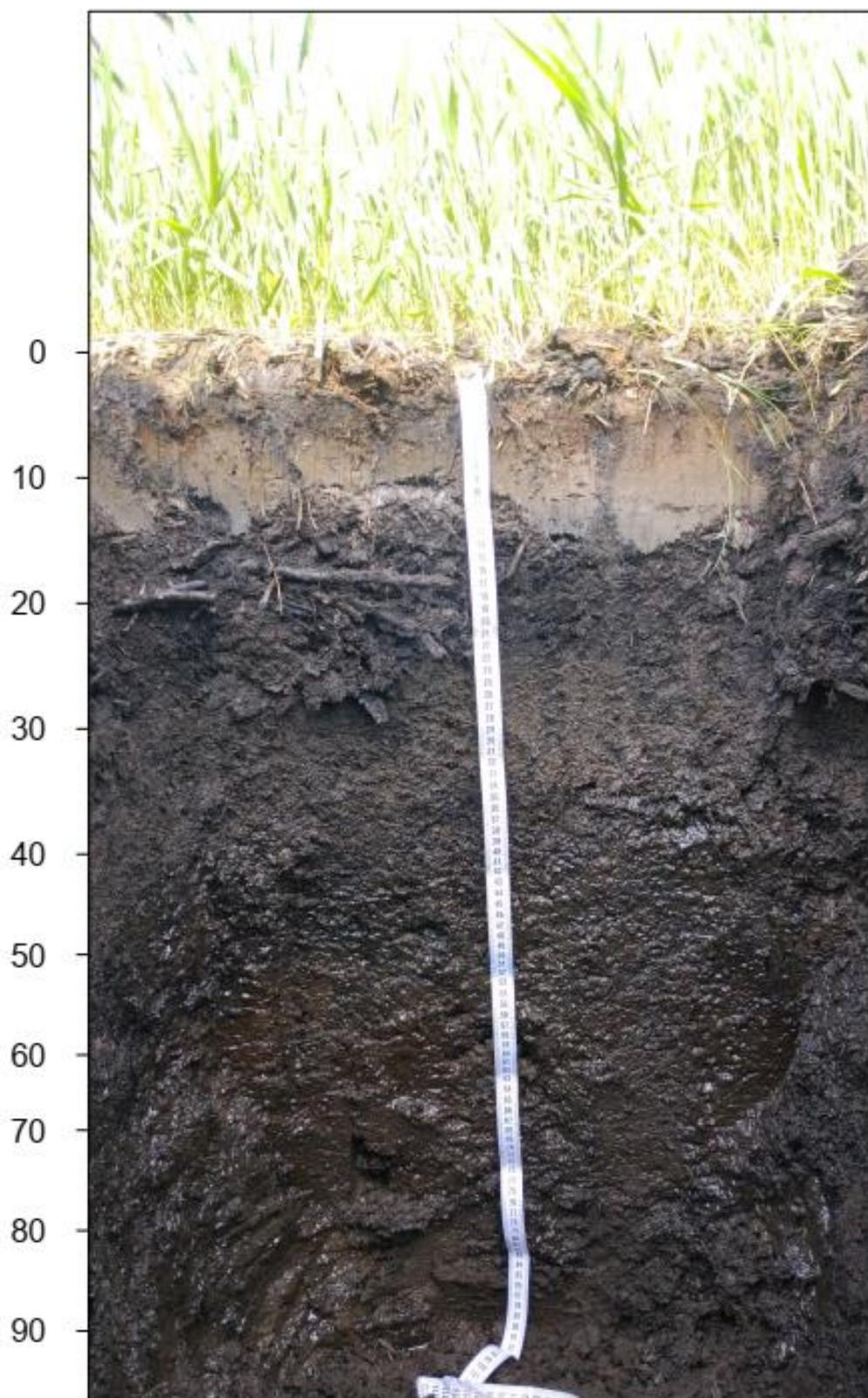


Рисунок 17 – Солончак вторичный по аллювиальной серогумусовой поверхности оглеенной почве из долины р. Черная (разрез 10)

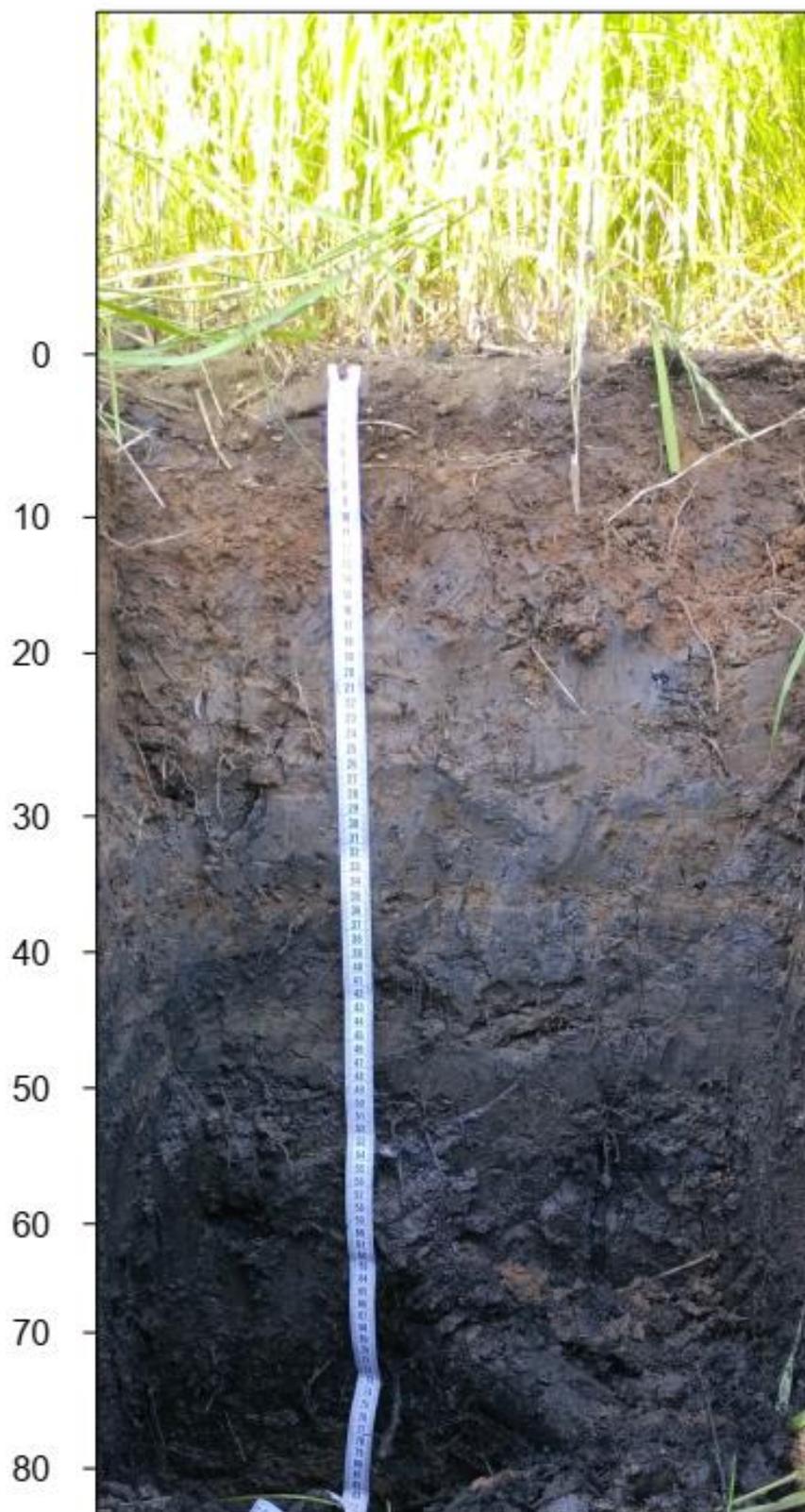


Рисунок 18 – Аллювиальная серогумусовая поверхность оглеенная солончаковая почва из долины р. Черная (разрез 11)

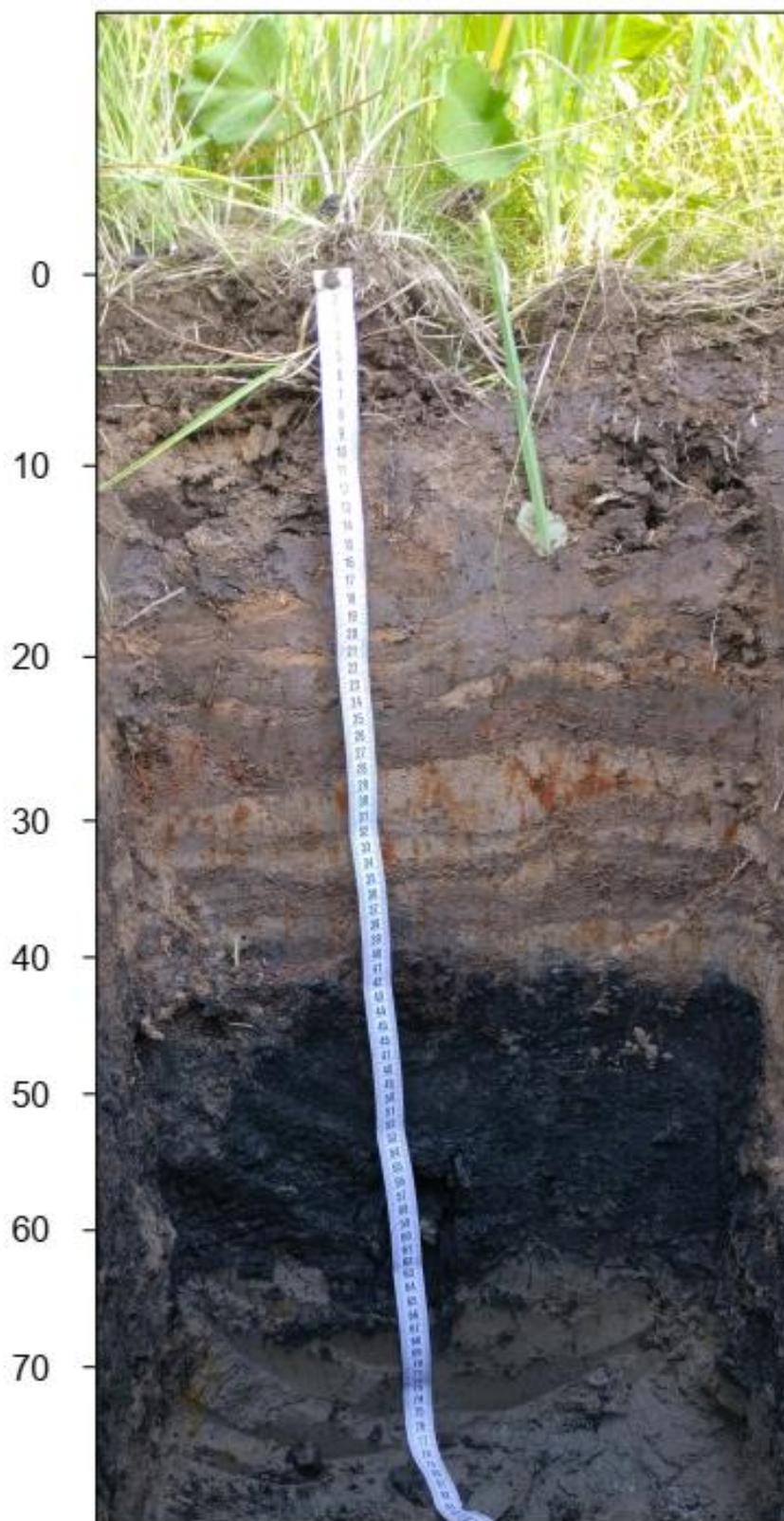


Рисунок 19 – Аллювиальная серогумусовая поверхностно оглеенная солончаковая почва из долины р. Черная (разрез 12)

На участке с фрагментарной растительностью, в 2 м от русла реки и в 200 м от солелотвала БКПРУ-3 описана аллювиальная серогумусовая глеевая солончаковая почва (разрез 7, рис. 14). Координаты разреза 7 (в системе координат WGS-84): N 59.17.050, E 056.49.265.

Почвенный профиль (разрез № 7) имел следующее морфологическое строение:

A_{Ys,g} – серогумусовый глееватый горизонт, 0-25/25 см, до глубины 3 см густо переплетен корнями растений, бурый, с рыжими пятнами, сырой, бесструктурный, по корневинам отложены железистые новообразования ржавого цвета; с глубины 3 см залегает сырой бесструктурный слой, в котором прослойки песка и суглинка сменяют друг друга: песчаные прослойки рыжего цвета, суглинистые – сизого; присутствуют единичные корни, переход постепенный.

G_s[~] – глеевый горизонт: на глубине 25-33/8 см выделяется суглинистая прослойка интенсивной сизой окраски; слой 33-65/32 см – черного цвета, суглинистый, встречаются слаборазложившиеся остатки растительности, переход постепенный.

CG_s[~] – глеевая почвообразующая порода, 65-95/30 см – легкосуглинистый, при раскатывании чувствуются зерна песка, буровато-сизый, со стальным блеском, сырой, бесструктурный; на глубине около 80 см обнаружены остатки древесины.

На притеррасной части поймы, рядом с небольшим лесом, на расстоянии 1 м от ручья с соленой водой описана аллювиальная серогумусовая глеевая солончаковая почва (разрез 8, рис. 15). Координаты разреза 8 (в системе координат WGS-84): N 59.16.555, E 056.49.013.

Почвенный профиль имел следующее морфологическое строение:

A_{Ys,g} – серогумусовый глееватый горизонт, 0-14/14 см, песчаный, влажный, рыже-бурый, в нижней части ржавый, присутствуют корни, переход заметный по цвету.

Gs[~] – глеевый горизонт, постепенно переходящий в почвообразующую породу, 14-52/38 см, сырой, тяжелосуглинистый, темно-сизый, с черными полосами и рыжевато-бурыми пятнами; вязкий, липкий, бесструктурный, встречаются корни растений, но в меньшем количестве, чем в серогумусовом горизонте. На глубине около 60 см вскрылись грунтовые соленые воды.

На притеррасной части поймы вблизи ручья с соленой водой, на участке с низким проективным покрытием, который занят одним видом – торичником солончаковым (*Spergularia salina* J. et C. Presl), заложен разрез 9 (рис. 16). Координаты разреза 9 (в системе координат WGS-84): N 59.16.542, E 056.48.987.

В аллювиальной серогумусовой поверхностно оглеенной солончаковой почве диагностировали следующие горизонты:

A_{Ys,g} – серогумусовый глееватый горизонт, 0-17/17 см, бурый, вязкий, липкий, пластичный, тяжелосуглинистый, бесструктурный, встречаются корни растений, по корневинам отложены железистые новообразования ржавого цвета; в нижней части горизонта (13-17/3 см) расположена песчаная прослойка ярко-рыжего цвета, переход заметный по цвету.

Gs[~] – глеевый горизонт, 17-52/35 см, сизого цвета, сырой, верхняя часть его оструктурена, призматические и тонкопризматические отдельности на изломе имеют ржавый цвет; вязкий, тяжелосуглинистый. На глубине около 60 см вскрылись грунтовые соленые воды.

На расстоянии 1330 м юго-западнее от солеотвала, в 5 метрах от русла р. Черная на правом берегу заложен разрез 10 (рис. 17). Координаты разреза 10 (в системе координат WGS-84): N 59.15.648, E 056.49.259. Участок с низким проективным покрытием, произрастали торичник солончаковый (*Spergularia salina*) бескильница расставленная (*Puccinellia distans*), лебеда раскидистая (*Atriplex patula*), марь сизая (*Chenopodium glaucum*). Лишенная растений поверхность почвы покрыта выцветами солей, повсюду стволы высохших деревьев с белым налетом.

A_{Ys,g} – серогумусовый глееватый горизонт, 0-13/13 см, слой 0-5 см рыжевато-бурой окраски, на поверхности имеет выцветы солей, влажный, липкий, переплетен корнями растений, суглинистый; с глубины 5 см окраска неоднородная: верхняя и средняя часть буроватого цвета с ржавыми пятнами, нижняя – буровато-сизая со стальным оттенком и черными примазками, сырой, структура зернисто-пылеватая, суглинистый, встречаются корни растений, переход заметный по цвету и структуре.

G_s[~] – глеевый горизонт, 13-39/67 см, темно-бурый, глинистый, сырой, в верхней части до глубины 23 см встречаются корни растений, на глубине около 33 см сочится вода, встречаются остатки древесины, переход ясный.

[A_{Ys,g}] – погребенный гумусовый глееватый горизонт, 39-74/35 см, имеет зернистую структуру, рассыпчатый, поверхность педов темного цвета, внутри педов – бурого цвета, суглинистый. С глубины около 70 см окраска становится сизоватой, переход ясный.

CG_s[~] – почвообразующая глеевая порода, 74-110/36 см – сырая, сизая, бесструктурная, тяжелосуглинистая.

Разрез 11 (рис. 18) заложен на расстоянии около 500 м от солееотвала, на пойменном лугу правого берега р. Черная. Координаты разреза 11 (в системе координат WGS-84): N 59.16.434, E 056.48.850. Проективное покрытие высокое, произрастает луговая растительность: бескильница расставленная (*Puccinellia distans*), вейник наземный (*Calamagrostis epigeios* (L.) Roth.), лапчатка гусиная (*Potentilla anserina* L.), ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.), таволга вязолистная (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim.), лебеда раскидистая (*Atriplex patula*), марь сизая (*Chenopodium glaucum*), дудник лесной (*Angelica sylvestris* L.), пырей ползучий (*Elytrigia repens* (L.) Nevski), незабудка дернистая (*Myosotis cespitosa* Schultz).

Аллювиальная почва имеет следующее морфологическое строение.

A_{Ys,g} – серогумусовый глееватый горизонт, 0-15/15 см, плотный, темно-бурый, переплетен корнями трав, суглинистый, влажный,

бесструктурный; встречаются песчаные линзы, ориентированные горизонтально, переход постепенный.

AУ/Cg,s[~] – глееватый переходный к породе горизонт, 15-53/38 см, бурый, с ржавыми примазками и черными полосами в нижней части, суглинистый, бесструктурный, на глубине 33-36 см отмечена песчаная прослойка, переход постепенный.

CG[~] – глеевая почвообразующая порода, 53-88/35 см, неоднородной окраски: на сизо-буром фоне видны темные (почти черные) пятна и полосы, встречается много неразложившейся органики (остатки травянистых растений, древесины), с глубины 80 см цвет становится явно сизым; сырая, вязкая, мажущаяся.

Разрез 12 (рис. 19) заложен на пойменном лугу вблизи русла р. Черная. Координаты разреза 12 (в системе координат WGS-84): N 59.16.521, E 056.48.926. Растительность обильная, проективное покрытие около 80%, произрастают: вейник наземный (*Calamagrostis epigejos*), лапчатка гусиная (*Potentilla anserina*), ежа сборная (*Dactylis glomerata*), пырей ползучий (*Elytrigia repens*), мать-и-мачеха (*Tussilago farfara*). Поверхность почвы неровная, перерыта позвоночными животными.

AУs,tur – турбированный серогумусовый горизонт, 0-15/15 см, в верхней части выделяется плотно переплетенная корнями дернина; влажный, бурый с редкими ржавыми пятнами в верхней части, в нижней части ржавых пятен становится заметно больше, структура мелкозернистая, суглинистый, встречаются небольшие песчаные прослойки и линзы, переход постепенный.

AУ/Cg,s[~] – глееватый переходный к породе горизонт, 15-43/28 см, бурый с обилием ржавых пятен, неоднородный по гранулометрическому составу: песчаный с суглинистыми прослойками, суглинистые прослойки имеют бурый цвет, песчаные – светло-бурый; бесструктурный, влажный, переход заметный по цвету.

CG[~] – глеевая почвообразующая порода, 43-88/35 см, неоднородной окраски: в верхней части темная (почти черная) с остатками органики, в

нижней – сизая; суглинистая, липкая, бесструктурная, сырая, с глубины 78 см слабо сочится вода.

В целом следует отметить, что морфологическое строение профилей исследуемых почв свидетельствует о частой смене окислительно-восстановительных условий, сопровождающейся мобилизацией Fe (II). Отмечено наличие признаков глееватости (железистые новообразования в верхней части профиля, сизые оттенки почвообразующей породы), характерные для водозастойно-промывного и водозастойного режима [Таргульян и др., 1987; Зайдельман, 2004]. Появление темного (черного) цвета в почвенных профилях связано с накоплением сульфидов Fe (II); о сульфидных солончаках техногенного происхождения в Прикамье указывала Е.А. Хайрулина [2022].

В почвах сосуществуют минералогически разные, но биологически примерно одинаково доступные для редукции источники Fe (III): (гидр) оксиды железа и Fe (III)-содержащие слоистые силикаты [Водяницкий, 2008].

В работах по оглеению почв [Зайдельман, 1998], процесс редукции Fe (III) рассматривался как биохимический; роль бактерий сводилась к сбраживанию органического вещества, которое в результате образует определенные низкомолекулярные органические соединения, действующие на Fe (III) как редуцтанты. В конце XX столетия описаны железовосстанавливающие бактерии, способные использовать энергию от восстановления Fe (III) для поддержания роста [Coates et al., 1999]. Многие из них (представители родов *Shewanella*, *Panatoea* и *Rhodoferrax*) не являются строгими анаэробами и способны использовать для дыхания кислород [Lin et al., 2004]. Хайрулиной Е.А. с соавторами [2022] в техногенно засоленных гидроморфных почвах Пермского края установлено присутствие бактерий рода *Shewanella*, способных к восстановлению железа и марганца, денитрификации, а также к продукции сульфидов. Распространенными донорами электронов могут быть некоторые органические кислоты. Переносить электроны к Fe(III) способны восстановленные гуминовые

кислоты, в результате химической реакции образуется Fe(II) и регенерируется окисленная форма гуминовых кислот [Lovley, Blunt-Harris, 1999].

Профиль почвы в разрезе 9 отличался присутствием в серогумусовом горизонте песчаного слоя ржавого цвета, похожего на ортзанды. Для лесных гидроморфных ландшафтов характерен привнос железа; процесс образования ортзандов в районах распространения ожелезненной грунтовой воды описан Ф. Р. Зайдельманом [1998]. Ортзанды генетически связаны с расположением глеевых горизонтов. В верхней части глеевых и глееватых горизонтов Fe (II) окисляется бактериями; представители разных родов железобактерий описаны в техногенно засоленных гидроморфных почвах Пермского края [Хайрулина и др., 2022].

Присутствующие в почвенном профиле призматические и тонко призматические отдельности темной окраски на изломе имеют ржавый цвет. При смене окислительного режима на восстановительный (гидр)оксиды железа могут сохраниться под прикрытием Fe (II)-соединений [Roden, Zachara, 1996].

По классическим представлениям в солоноватых и соленых водах широко распространены процессы восстановления серы сульфатов до сероводорода при участии сульфатредуцирующих бактерий. Сульфатредуцирующие бактерии – это хемоорганотрофные организмы, потребляющие органические вещества; их энергетический обмен связан с восстановлением серы сульфатов [Перельман 1966; Глазовская, 2007]. В анаэробной сильно восстановительной среде, где железо находится в двухвалентной и относительно подвижной форме (преимущественно бикарбонатов), появление сероводорода приводит к образованию сульфидов железа и выпадению их в осадок в виде коллоидального черного осадка гидротроилита $FeS \cdot nH_2O$. В профилях почв из разрезов 7, 10 и 12 присутствовал черный слой, в котором интенсивной редукции железа и серы,

по-видимому, способствовали погребенные органические остатки, служащие энергетическим сырьем биогенного и биохимического восстановления.

В гумидных ландшафтах неоднократно отмечали развитие техногенного сульфидогенеза. В поймах малых рек Ивановской области этот процесс связали с поступлением серы в составе промышленных стоков [Трухина, 1988]. В Белоруссии при проведении исследований в районе рассолошламохранилища в почвенной толще обнаружен горизонт черного цвета. Рентгенографические и химические (макро-, микроэлементный состав, формы серы, окислительно-восстановительный потенциал и др.) исследования показали, что черная окраска обусловлена новообразованными сульфидными минералами типа гидротроилита [Хомич, 1985]. Имеются сведения о формировании гидротроилитового горизонта в сульфидных солончаках в местах разгрузки засоленных вод на Верхнекамском месторождении в Предуралье [Хайрулина с соавт., 2018; Хайрулина, 2022; Хайрулина, 2023].

Изучение состава водной вытяжки из аллювиальных солончаковых почв и солончака вторичного, находящихся под постоянным воздействием почвенно-грунтовых хлоридно-натриевых вод, показало, что водорастворимые соли присутствуют в серогумусовых горизонтах даже тех почв, на поверхности которых имеется обильная растительность, а максимальное содержание солей – в глеевых горизонтах и почвообразующей породе (рис. 20-21, приложение В) [Пахоруков, Еремченко, 2021].

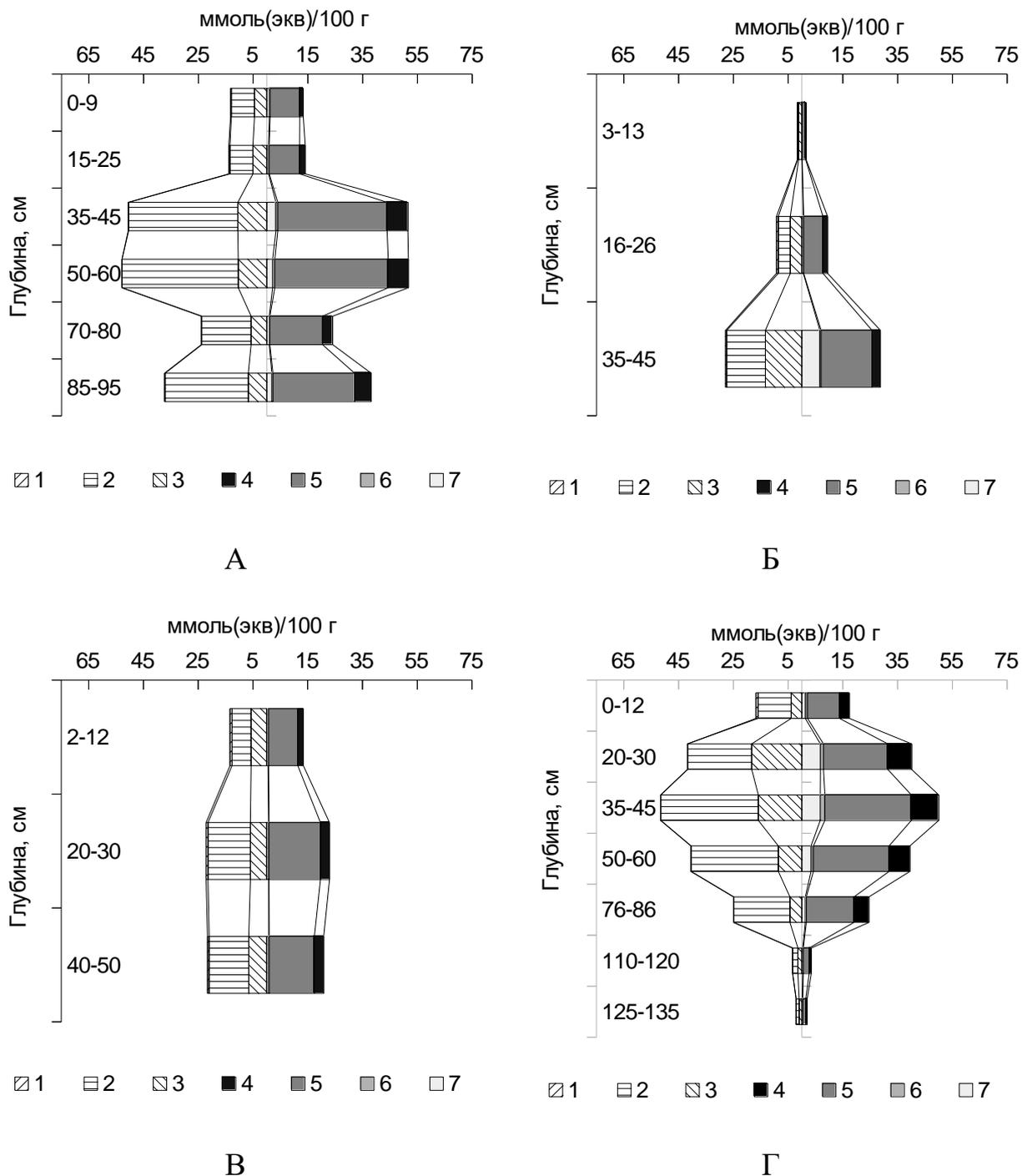


Рисунок 20 – Содержание ионов (1 – HCO_3^- ; 2 – Cl^- ; 3 – SO_4^{2-} ; 4 – K^+ ; 5 – Na^+ ; 6 – Mg^{2+} ; 7 – Ca^{2+}) в водных вытяжках из почв в долине р. Черная: А – разрез 7, Б – разрез 8, В – разрез 9, Г – разрез 10

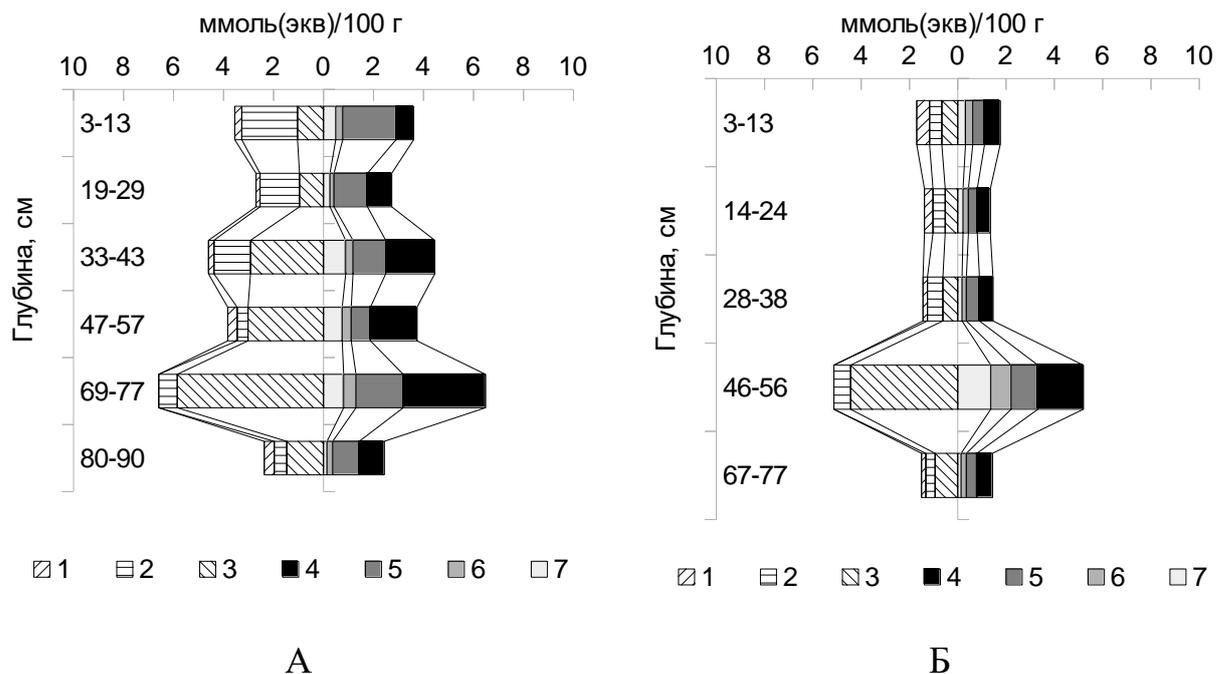


Рисунок 21 – Содержание ионов (1 – HCO_3^- ; 2 – Cl^- ; 3 – SO_4^{2-} ; 4 – K^+ ; 5 – Na^+ ; 6 – Mg^{2+} ; 7 – Ca^{2+}) в водных вытяжках из почв в долине р. Черная: А – разрез 11, Б – разрез 12

Содержание водорастворимых гидрокарбонатов в почвах находилось в пределах от 0,15 до 0,75 ммоль(экв)/100 г. Количество хлоридов варьировало от низких значений (0,35 ммоль(экв)/100 г) до очень высоких (42,47 ммоль(экв)/100 г). Количество сульфат-ионов находилось в пределах 0,52-18,31 ммоль(экв)/100 г. В соответствии с критериями выделения родов по соотношению анионов [Классификация и диагностика почв..., 2004] солончак вторичный и аллювиальные почвы имели хлоридное засоление, за исключением аллювиальных серогумусовых глеевых почв из разрезов 8 и 12, которые характеризовались сульфатно-хлоридным химизмом.

Среди катионов в водной вытяжке доминировали ионы Na^+ , их количество составляло от 0,37 до 41,38 ммоль(экв)/100 г. Примечательно, что на втором месте по содержанию был K^+ , уровень его аккумуляции превысил суммарное количество Ca^{2+} и Mg^{2+} , и только в почвообразующей породе из

разреза 8 количество Ca^{2+} все же превысило содержание ионов K^+ [Пахоруков, Еремченко, 2021].

В соответствии с составом катионов [Классификация и диагностика почв..., 2004], аллювиальные почвы имели небольшие различия в химизме засоления. У большинства аллювиальных почв и солончака вторичного был натриевый химизм; у почвы из разреза 8 в серогумусовом горизонте – тоже натриевое засоление, но в почвообразующей породе – кальциево-натриевый химизм; почва из разреза 12 имела натриево-калиевый химизм.

Методом связывания водорастворимых ионов в гипотетические соли [Мякина, Аринушкина, 1979] установлено преобладание в почвах хлоридов натрия и калия, а также сульфатов натрия.

Почвы заметно отличались по кислотно-основным свойствам. Нейтральной и слабощелочной реакцией среды характеризовались аллювиальные почвы из разрезов 8, 9, 11 и 12. Нейтрализация природной кислотности аллювиальных почв непосредственно связана с развитием натриевого засоления. Относительно контрастной была реакция среды в почве из разреза 7, она варьировала от слабокислой, нейтральной и до слабощелочной (табл. 6) [Пахоруков, Еремченко, 2021]. Сильнокислой реакцией среды подгумусовых горизонтов отличился солончак вторичный, вероятно, актуальная кислотность унаследована от природной аллювиальной почвы.

Таблица 6 – Физико-химические и химические свойства техногенно засоленных почв в долине реки Черная

№ разреза	Глубина, см	C _{орг} , %	pH _{вод}	pH _{сол}	Обменные катионы, ммоль(экв)/100 г					ЕКО, ммоль(экв)/100 г	%	
					Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	H ⁺ +Al ³⁺		CO ₂ карб.	Гипс
7	0-9	1,18	7,16	7,11	3,36	1,6	2,61	2,36	0	9,93	2,08	4,52
	15-25	0,79	7,64	7,61	2,32	0,4	3,04	3,59	0	9,35	6,70	0
	35-45	-	6,24	6,02	1,84	0,88	6,61	7,03	2,68	19,04	0	0
	50-60	-	5,91	5,63	2,24	1,04	6,96	7,18	3,54	20,96	0	4,04
	70-80	-	6,73	6,42	2,24	0,8	4,52	5,13	1,10	13,79	0	0,69
	85-95	-	6,40	6,31	2,48	0,88	5,22	6,15	1,65	16,38	0	0,99
8	3-13	0,50	7,14	6,78	1,52	0,96	2,09	0,67	0	5,24	2,08	0
	16-26	0,31	8,04	7,63	4,4	1,52	5,57	7,38	0	18,87	1,96	2,04
	35-45	-	7,23	7,25	3,2	1,2	5,39	5,03	0	14,82	3,70	6,28
9	2-12	2,69	7,92	7,77	3,04	2,16	6,26	5,28	0	16,74	3,93	6,41
	20-30	1,53	7,80	7,67	2,64	1,12	9,39	8,92	0	22,07	3,47	2,11
	40-50	-	7,57	7,58	2,32	1,28	6,61	6,77	0	16,98	4,04	2,69
10	0-12	2,96	6,96	6,82	4,48	2,72	5,22	8,35	0	20,77	5,05	1,08
	20-30	3,37	4,97	4,61	4,96	2,40	13,22	13,22	13,43	47,23	0	3,87
	35-45	-	5,04	4,78	5,44	2,40	13,69	12,30	11,74	45,57	0	2,84
	50-60	-	5,41	5,03	5,44	2,72	13,44	12,05	9,72	43,37	0	0
	76-86	-	5,48	4,95	5,76	3,04	11,60	12,30	9,63	42,33	0	0
	110-120	-	5,62	4,17	6,72	2,56	5,03	12,05	4,70	31,06	0	0,77
	125-135	-	5,15	3,87	6,24	3,84	3,10	3,95	4,14	21,27	0	1,12

Продолжение таблицы 6

№ разреза	Глубина, см	C _{орг} , %	pH _{вод}	pH _{сол}	Обменные катионы, ммоль(экв)/100 г					ЕКО, ммоль(экв)/100 г	%	
					Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	H ⁺ +Al ³⁺		CO ₂ карб.	Гипс
11	3-13	1,95	6,92	6,78	6,56	2,88	2,59	4,31	0	16,34	2,62	2,67
	19-29	1,44	7,54	7,27	5,92	2,40	2,47	4,64	0	15,43	5,24	5,16
	33-43	-	7,21	7,09	4,40	2,40	2,33	5,30	0	14,43	6,55	5,38
	47-57	-	7,19	6,86	4,96	3,36	2,59	7,88	0	18,79	4,11	0
	69-77	-	4,71	4,11	3,84	3,04	3,36	9,74	15,05	35,03	0	0
	80-90	-	5,57	4,38	4,64	2,72	3,22	9,04	9,41	29,03	0	0
12	3-13	2,70	8,24	7,48	6,40	3,04	2,34	3,17	0	14,95	5,20	0,99
	14-24	2,02	7,98	7,26	5,28	3,20	2,09	3,17	0	13,74	4,26	0
	28-38	-	7,03	6,18	2,72	1,92	1,97	1,86	0	8,47	0,71	0
	46-56	-	5,28	4,72	3,36	3,84	2,34	6,01	6,02	21,57	0	1,12
	67-77	-	7,43	5,92	2,40	2,24	2,09	4,59	0	11,32	0	0,73

Примечание: (-) – не определялось.

Емкость катионного обмена (ЕКО) в аллювиальных почвах зависела преимущественно от их гранулометрического состава. Суглинистые горизонты имели ЕКО в пределах 14-47 ммоль(экв)/100 г, а песчаные – около 5 ммоль(экв)/100 г. По доле обменного Na^+ среди поглощенных катионов исследованные почвы отнесены к видам малонатриевых и средненатриевых почв [Классификация и диагностика почв..., 2004]. Многонатриевыми были аллювиальные почвы с очень сильной и сильной степенью засоления (разрезы 7-9), а также солончак вторичный.

В отличие от слабощелочных аллювиальных почв (разрезы 8, 9, 11, 12), кислая почва из разреза 7 и, особенно, солончак вторичный характеризовались ненасыщенностью основаниями. Общая содержание обменных H^+ и Al^{3+} в солончаке вторичной по аллювиальной серогумусовой почве составляло 10-13 ммоль(экв)/100 г.

Таким образом, в составе обменных оснований в аллювиальных техногенно засоленных почвах долины р. Черная представлены Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , могут присутствовать H^+ и Al^{3+} . В почвенном поглощающем комплексе доминировали Na^+ и K^+ , на их долю приходилось до 80% ЕКО. Необходимо отметить аномальное количество K^+ в составе почвенного поглощающего комплекса (13-40% ЕКО), нередко превышающее долю Na^+ [Пахоруков, Еремченко, 2021]. Источником ионов калия, как и натрия, служат отходы производства, складированные в солеотвале, растворяющиеся в атмосферных осадках и мигрирующие с подземными и поверхностными водами. Присутствие обменного калия – характерная особенность техногенного засоления почв, т.к. в условиях природного засоления не указывают на значимое присутствие K^+ в составе обменных оснований почв [Черноусенко, Хитров, 2023].

В соответствии с ГОСТ Р 70229-2022 все аллювиальные солончаковые почвы долины р. Черная по содержанию карбонатов в верхних горизонтах (>2%) являются карбонатными. Новообразований гипса в профиле

исследованных почв не обнаружено, но аналитические методы показали гипсосодержание в количестве 1-6%, в том числе, в кислом солончаке (табл. б). Появление гипса в техногенно засоленных почвах может быть обусловлено сульфидогенезом, процесс его образования описан М.А Глазовской [2007]. Сульфиды железа окисляются при подсыхании почвы и установлении окислительного режима с образованием гидроксидов Fe (III) и серной кислоты. Если почва бескарбонатная, серная кислота может разрушить силикаты. Если в почве присутствуют карбонаты кальция, то при взаимодействии с серной кислотой они замещаются гипсом. В аллювиальных солончаковых не кислых почвах мы отмечаем накопление карбонатов, поэтому, в окислительных условиях возможен процесс их замещения гипсом.

Ионы Ca^{2+} и SO_4^{2-} обладают меньшей подвижностью по сравнению с другими ионами водорастворимых солей, что приводит к накоплению гипса и карбонатов [Перельман, 1966; Перельман, Касимов, 1999; Мохаммади, 2022; Елизаров и др., 2023]. По-видимому, из-за различия в подвижности ионов аллювиальные почвы в долине р. Черная характеризуются как хлоридным, так и сульфатно-хлоридным засолением, в них также постепенно аккумулируются карбонаты и гипс.

На основании полученных результатов исследуемые техногенно засоленные почвы долины р. Черная диагностировали по изученным показателям – до рода и вида [Классификация и диагностика почв..., 2004], а также в соответствии с мировой корреляционной базой почвенных ресурсов [WRB, 2022]:

разрез 7 – аллювиальная серогумусовая поверхностно оглеенная солончаковая очень сильнозасоленная хлоридная натриевая ненасыщенная средненатриевая гипсосодержащая суглинистая почва; Sodic Gleyic Fluvisols (Loamic, Salic);

разрез 8 – аллювиальная серогумусовая поверхностно оглеенная солончаковая сильнозасоленная сульфатно-хлоридная кальциево-натриевая

насыщенная средненатриевая карбонатная гипсодержащая суглинистая почва; Gypsic Sodic Gleyic Fluvisols (Loamic, Salic);

разрез 9 – аллювиальная серогумусовая поверхностно оглеенная солончаковая очень сильнозасоленная хлоридная натриевая насыщенная средненатриевая карбонатная гипсодержащая суглинистая почва; Gypsic Sodic Gleyic Fluvisols (Loamic, Salic);

разрез 10 – солончак вторичный хлоридный натриевый ненасыщенный средненатриевый гипсодержащий по аллювиальной серогумусовой поверхностно оглеенной суглинистой почве; Fluvic Sodic Gleyic Solonchak (Chloridic, Hypersalic, Loamic);

разрез 11 – аллювиальная серогумусовая поверхностно оглеенная солончаковая сильнозасоленная хлоридная натриевая насыщенная малонатриевая карбонатная гипсодержащая суглинистая почва; Gypsic Sodic Gleyic Fluvisols (Loamic, Salic);

разрез 12 – аллювиальная серогумусовая поверхностно оглеенная солончаковая средnezасоленная сульфатно-хлоридная натриево-калиевая насыщенная малонатриевая карбонатная гипсодержащая суглинистая почва; Sodic Gleyic Fluvisols (Loamic, Salic).

3.3.3. Техногенно засоленные аллювиальные почвы в долине р. Ленва

В районе исследований долины р. Ленва разгружаются подземные воды, фильтрующиеся от шламохранилища БКПРУ-3. Кроме того, соли поступают с водами р. Ленва, испытывающей воздействие солеотвала и шламохранилища БКПРУ-2. Под действием засоляющих факторов в речной долине формируются техногенно засоленные аллювиальные почвы с нейтрально-щелочной и резкокислой реакцией среды.

3.3.3.1. Свойства аллювиальных солончаковых насыщенных почв

В нескольких метрах от р. Ленва под изреженной солончаковой растительностью (торичник солончаковый *Spergularia salina*, лебеда

простертая *Atriplex prostrata*, бескильница расставленная *Puccinellia distans*)
заложен разрез 13 (рис. 22). Координаты разреза 13 (в системе координат
WGS-84): N 59.19.029, E 056.49.406.

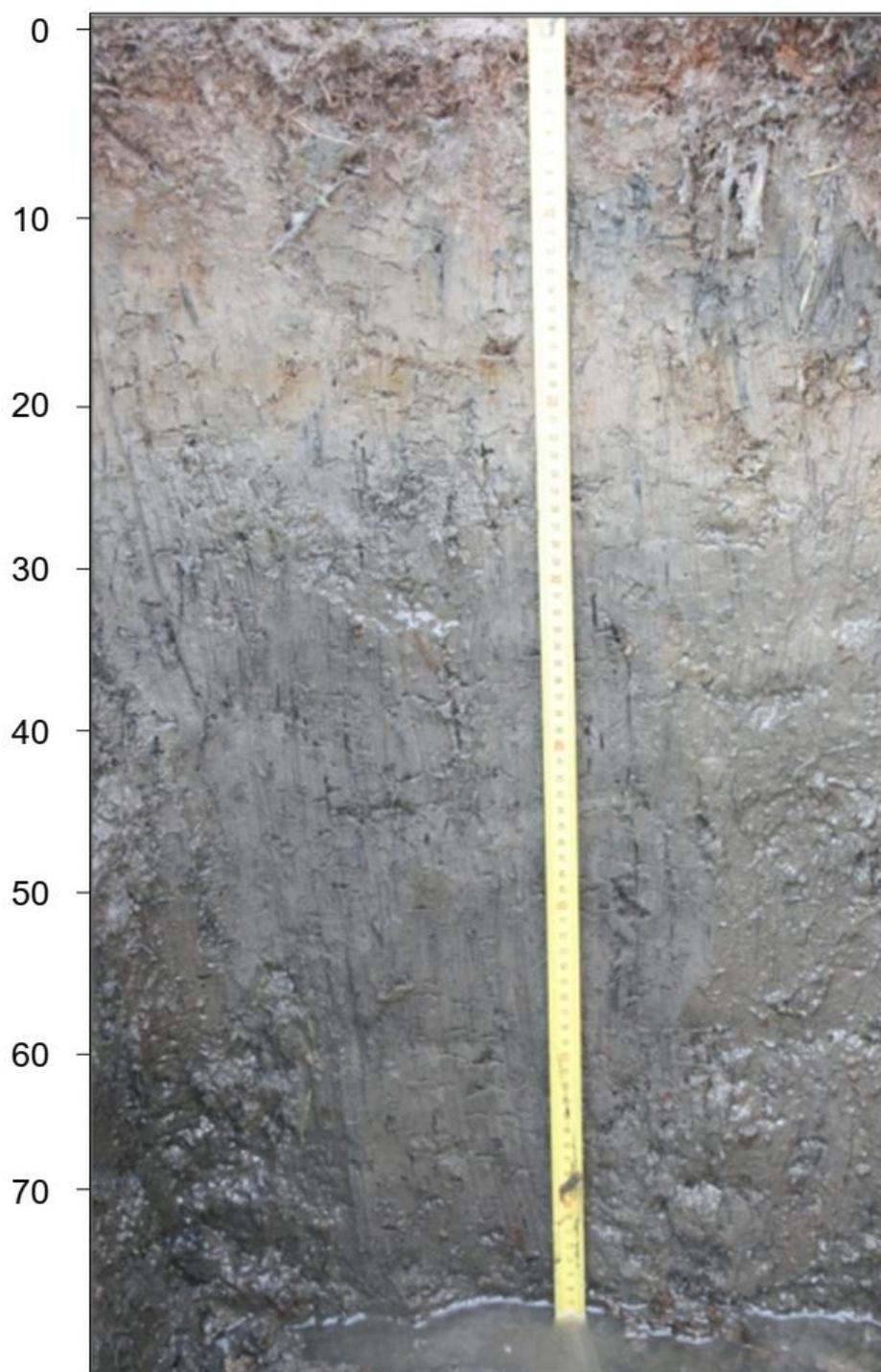


Рисунок 22 – Солончак вторичный по аллювиальной серогумусовой
поверхности оглеенной почве из долины р. Ленва (разрез 13)

Во вторичном солончаке по аллювиальной серогумусовой глееватой почве (рис. 22) диагностировали следующие горизонты:

0-5 см – оторфованная дернина, темно-бурая, обилие корней, сырая.

S/A_Yg – солевой глееватый горизонт, 0-21/21 см, включал вышеуказанную оторфованную дернину; ржаво-бурый, сырой, бесструктурный, вязкий, суглинистый, переход к нижележащему горизонту волнистый, заметный по цвету.

S/CG[~] – засоленная глеевая почвообразующая порода, 21-75/54 см, сизовато-серая, сырая, бесструктурная, вязкая, тяжелосуглинистая, содержит крупнопесчаные фракции. Уровень стояния почвенно-грунтовой воды – 75 см.

На кромке пойменного болота на отложениях супесчаного гранулометрического состава под рудерально-злаковой растительностью описана аллювиальная серогумусовая глееватая солончаковая почва (разрез 15, рис. 23). Координаты разреза 15 (в системе координат WGS-84): N 59.19.038, E 056.49.631.

A_Ys,g – серогумусовый глееватый горизонт, 0-20/20 см, верхняя часть которого представлена оторфованной дерниной мощностью 10 см; серо-бурый с рыжими крапинками, сырой, бесструктурный, супесчаный, переход волнистый, заметный по цвету;

Cs,g,ox[~] – почвообразующая глееватая порода, 20-32/12 см, ржаво-рыжая, сырая, бесструктурная, супесчаная, переход заметный по цвету;

CGs[~] – почвообразующая глеевая порода, 32-69/37 см, сизо-серого цвета, сырая, бесструктурная, липкая, вязкая; присутствует ржавый мицелий по трещинам и корням, ржавые пятна в верхней части, в нижней части встречаются угольки и вкрапления мелких кристаллов гипса, суглинистый; вода сочится с глубины 32 см.

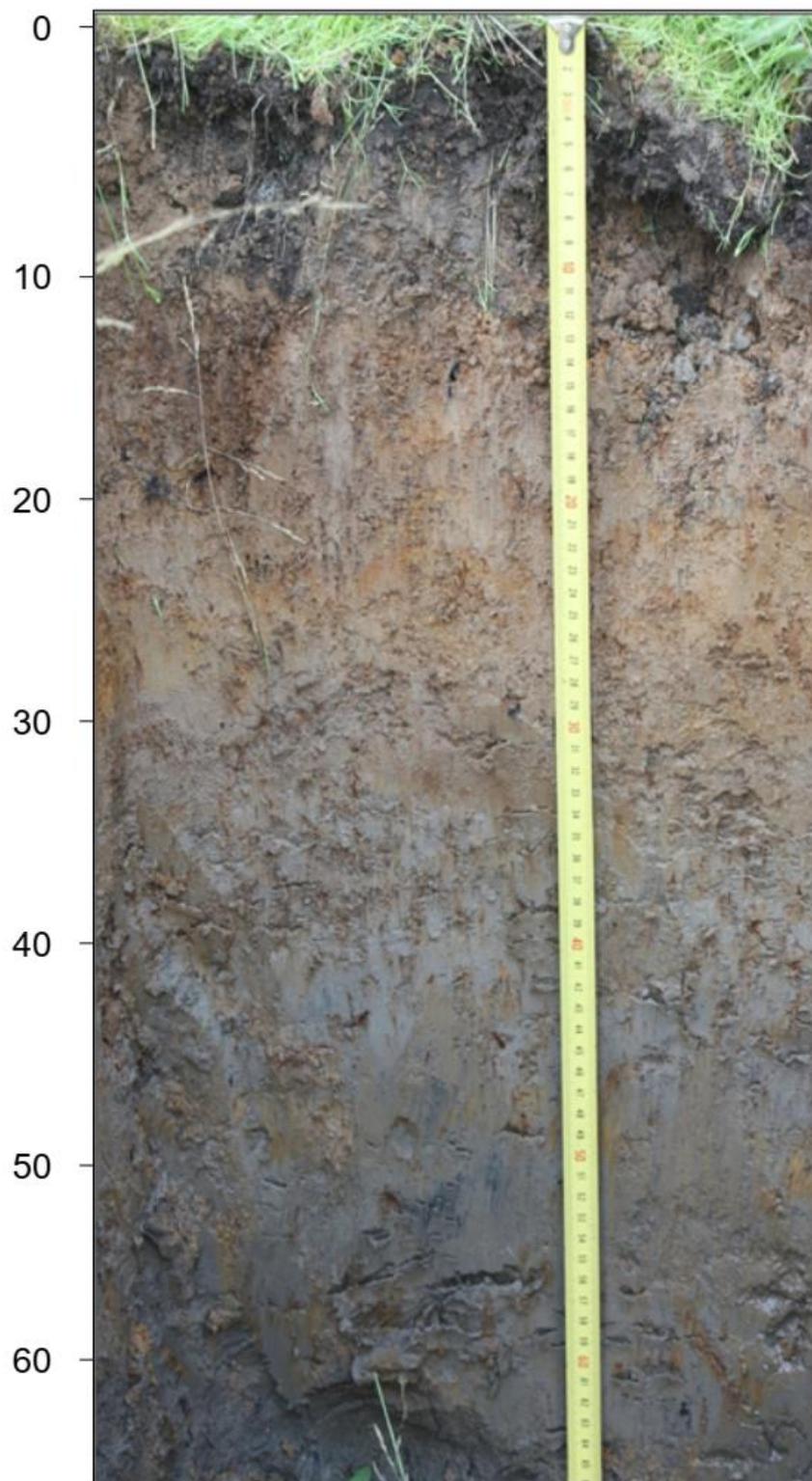


Рисунок 23 – Аллювиальная серогумусовая поверхностно оглеенная солончаковая засоленная почва из долины р. Ленва (разрез 15)

Солончак вторичный (соровый) (разрез 16) сформирован на обнажившемся днище мелкого водоема в центральной части поймы, практически лишен высшей растительности. Координаты разреза 16 (в системе координат WGS-84): N 59.19.069, E 056.49.629.

Профиль солончака сорового имел следующее морфологическое строение:

S – солончаковая корка мощностью 3 см, рыхлая, ржавого цвета;

SS – сульфидный солевой горизонт, 3-15/12 см, почти черный с ржавыми прослойками, сырой, гелеобразный, содержит светлые включения мучнистого гипса;

S/G[~] – 15-70/55 см, оглеенный сырой суглинок сизого цвета с ржавыми примазками.

Разрез 17 заложили в относительно повышенной части поймы под лугово-злаковой растительностью. Координаты разреза 17 (в системе координат WGS-84): N 59.19.202, E 056.50.787. Ниже следует описание аллювиальной серогумусовой глееватой солончаковой почвы:

A_{Ys,g} – серогумусовый глееватый горизонт, 0-20/20 см; до глубины 10 см густо переплетен корнями трав, ниже корни единичные; серо-бурый, более темный до глубины 14 см; с глубины 18 см появились признаки оглеения в виде сизого оттенка и ржавых пятен, структура комковато-порошистая; среднесуглинистый; по корневинам отложены железистые новообразования; переход к породе волнистый, постепенный;

C_{s,g,ox} – почвообразующая глееватая порода, 20-70/50 см, бурого цвета, характерны ржавые пятна и множество железомарганцевых конкреций;

CG_{s[~]} – почвообразующая глеевая суглинистая порода, 70-100/30 см, сизая, с ржавыми примазками; с глубины 100 см становилась сырой, сизой, без рыжих пятен.

Таким образом, в одной из аллювиальных почв, находящихся под воздействием минерализованных вод, появился морфологический признак в виде новообразований мелкокристаллического гипса (разрез 15). Сизые оттенки в окраске почвенных горизонтов, множественные железистые новообразования ржавого цвета указывают на водозастойно-промывной тип водного режима и глееобразование [Таргульян и др., 1987; Зайдельман, 2004]. Солончак сорový – новый компонент в почвенном покрове, образовавшийся при высыхании соленого мелководного водоема. В верхней части профиля этого солончака присутствовал черный гелеобразный осадок, видимо, коллоидный сульфид железа, образовавшийся на дне водоема в присутствии растворенных сульфатов при участии сульфатредуцирующих бактерий [Глазовская, 2007].

В профиле аллювиальных почв аккумуляровались водорастворимые соли (рис. 24, приложение Г). В водной вытяжке из почв количество гидрокарбонатов было минимальным (0,1-0,4 ммоль(экв)/100 г почвы). Содержание хлоридов было очень высоким в солончаках и относительно пониженным – в аллювиальных почвах. Количество сульфат-ионов в почвенных разрезах находилось в пределах 1,2-3,8 ммоль(экв)/100 г. Солончак сорový отличился наиболее высоким содержанием сульфат-ионов – 120-190 ммоль(экв)/100 г, накопление сульфатных солей, по-видимому, происходило по мере высыхания водоема и накопления гипса. В соответствии с критериями выделения родов по соотношению анионов [Классификация и диагностика почв..., 2004] почвы имели хлоридное засоление, лишь солончак сорový характеризовался сульфатно-хлоридным химизмом солей [Eremchenko, Pakhorukov, Shestakov, 2020].

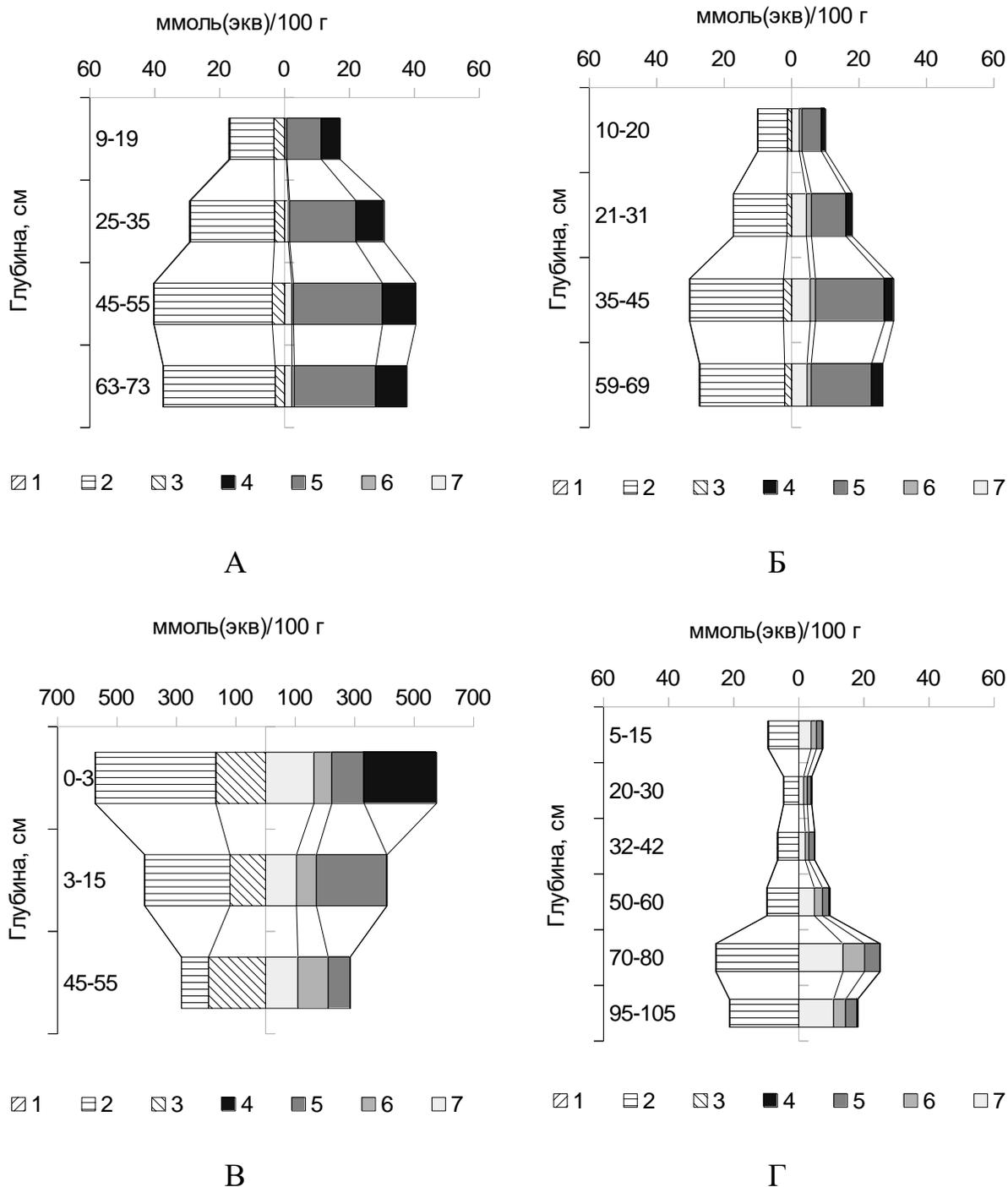


Рисунок 24 – Содержание ионов (1 – HCO_3^- ; 2 – Cl^- ; 3 – SO_4^{2-} ; 4 – K^+ ; 5 – Na^+ ; 6 – Mg^{2+} ; 7 – Ca^{2+}) в водных вытяжках из аллювиальных насыщенных почв в долине р. Ленва: А – разрез 13, Б – разрез 15, В – разрез 16, Г – разрез 17

Содержание и соотношение катионов в водной вытяжке из почв колебалось в значительных пределах; наибольшим количеством Na^+ отличились солончаки, особенно соровый. Количество Na^+ составляло от 1,3

до 240 ммоль(экв)/100 г. В солончаке соровом количество Ca^{2+} превысило 100 ммоль(экв)/100 г, отличилась почва и наибольшим содержанием Mg^{2+} [Eremchenko, Pakhorukov, Shestakov, 2020].

В соответствии с составом катионов [Классификация и диагностика почв..., 2004], солончак соровый имел кальциево-натриевый химизм в солевом горизонте и натриево-магниевый-кальциевый – в глеевом. В верхних горизонтах солончака вторичного – натриевое засоление, а в нижних – кальциево-натриевое. У аллювиальных солончаковых почв отмечен кальциево-натриевый (разрез 15), натриево-магниевый-кальциевый и магниевый-натриево-кальциевый (разрез 17) химизм. В природных условиях почвы с кальциевым и разносмешанным (равная доля Ca, Mg, Na) засолением встречаются редко, на них приходится всего около 2% площади засоленных почв [Черноусенко, Хитров, 2023]. В то же время при анализе данных водной вытяжки нельзя исключать методическую составляющую, а именно, растворение гипса при получении водной вытяжки. Кроме того, в водную вытяжку из кислой почвы кальций из ППК может быть вытеснен протонами.

Отличительной особенностью обоих солончаков было высокое содержание ионов K^+ в водной вытяжке. В поверхностной корке у солончака сорового его количество превысило содержание Na^+ . В солончаке вторичном уровень аккумуляции K^+ был в несколько раз выше суммарного количества Ca^{2+} и Mg^{2+} . В одной из аллювиальных почв (разрез 17) содержание K^+ больше, чем Mg^{2+} . В природных засоленных почвах калиевый химизм засоления отсутствует [Черноусенко, Хитров, 2023]. Как было указано выше, калий поступает в подземные воды из отходов производства солей; в почвах этот элемент может аккумулироваться благодаря избирательному биогенному поглощению [Перельман, 1966; Перельман, Касимов, 1999].

На основе данных о связывании ионов водной вытяжки в токсичные соли (в соответствии с их растворимостью) пришли к заключению, что в аллювиальных почвах присутствуют не только хлориды натрия, но и хлориды калия, магния и кальция.

Максимальный уровень содержания токсичных солей (17-27%) установлен в солевом горизонте (0-15 см) солончака сорового; количество солей оставалось очень высоким (10%) и в глеевом горизонте этой почвы (приложение Г). В верхнем горизонте солончака вторичного по аллювиальной гумусовой глееватой почве содержалось более 1% токсичных солей, в почвообразующей породе – более 2%. Таким образом, очень сильнозасоленным был весь почвенный профиль. В верхних горизонтах аллювиальных солончаковых почв (разрезы 17, 15) сумма токсичных солей находилась в пределах 0,3-0,5%, наибольшая аккумуляция токсичных солей (0,75-1,6%), как правило, прослеживалась в нижнем полуметровом водонасыщенном слое [Eremchenko, Pakhorukov, Shestakov, 2020].

Исследованные почвы поймы р. Ленва отличались по реакции почвенной среды (табл. 7). Нейтральной и преимущественно нейтральной реакцией характеризовались солончак вторичный и аллювиальные глееватые почвы (разрезы 13, 15). Слабокислая реакция среды выявлена в солончаке соровом, сильнокислая – в аллювиальной почве из разреза 17, по-видимому, это остаточная кислотность унаследована от аллювиальных почв таежно-лесной зоны.

Таблица 7 – Физико-химические и химические свойства техногенно засоленных почв в долине реки Ленва

№ разреза	Глубина, см	C _{орг} , %	pH _{вод}	pH _{сол}	Обменные катионы, ммоль(экв)/100 г					ЕКО, ммоль(экв)/100 г	%	
					Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	H ⁺ +Al ³⁺		СО ₂ карб.	Гипс
13	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
15	10-20	0,38	6,48	6,41	3,68	1,28	2,57	2,13	0	9,66	1,2	0
	21-31	0,31	5,93	5,82	2,92	1,08	2,85	2,40	0	9,32	0	0
	35-45	-	6,47	6,25	5,08	1,60	4,90	4,62	0	16,20	1,2	0
	59-69	-	6,89	6,78	5,12	1,36	4,45	5,25	0	16,18	1,3	0
16	0-3	10,2	5,90	5,84	6,4	2,7	4,4	2,4	2,5	18,4	0	19,3
	3-15	10,0	6,75	6,70	8,7	3,0	5,5	1,0	1,2	19,4	0	12,5
	45-55	-	5,85	5,80	-	-	-	-	3,7	-	0	2,7
17	5-15	9,3	4,69	5,42	-	-	-	-	13,3	-	0	0
	20-30	1,7	4,47	4,48	8,0	3,0	2,1	0,3	5,6	19,0	0	0
	32-42	-	5,02	4,78	-	-	-	-	3,8	-	0	0
	50-60	-	4,16	3,97	-	-	-	-	5,6	-	0	0
	70-80	-	4,68	4,72	-	-	-	-	7,2	-	0	0
	95-105	-	5,18	5,22	-	-	-	-	4,5	-	0	0

Примечание: (-) – не определялось.

В почвах с нейтральной реакцией среды (разрезы 13, 15) содержались карбонаты в количестве CO_2 – 1,2-1,6%, распределение их по профилю было относительно равномерным. Содержание карбонатов (с пересчетом на CaCO_3) в этих почвах превысило 2%, следовательно, по ГОСТу Р 70229-2022 они относятся к карбонатным почвам. Как было описано ранее (см. раздел 3.3.2), появление карбонатов в аллювиальных почвах таежно-лесной зоны, испытывающих техногенное засоление, связано с постепенным накоплением кальция, который среди других катионов водорастворимых солей отличается пониженной подвижностью [Перельман, 1966; Перельман, Касимов, 1999; Мохаммади, 2022; Елизаров и др., 2023].

В условиях пойменного режима содержание органического углерода в почвах речной долины невелико, особенно при супесчаном гранулометрическом составе (табл. 7). Небольшое увеличение количества органического углерода связано не только с гумусом, но и с накоплением перегнойных веществ в глеевых почвах. Значительное содержание органического углерода отмечается в солончаке соровом, вероятно, из-за концентрации органических остатков в илистых отложениях водоема.

Емкость катионного обмена (ЕКО) в аллювиальных почвах зависела преимущественно от их гранулометрического состава. Суглинистые горизонты имели ЕКО в пределах 13-19 ммоль(экв)/100 г, а супесчаные – около 9 ммоль(экв)/100 г [Еремченко, Pakhorukov, Shestakov, 2020].

Солончаки по относительному содержанию обменного натрия в поглощающем комплексе относятся к средненатриевым почвам; из двух аллювиальных солончаковых почв одна была средненатриевой, другая малонатриевой (табл. 7) [по: Классификация и диагностика почв..., 2004].

В двух техногенно засоленных почвах сохранилась ненасыщенность основаниями, в солончаке соровом относительное содержание обменных $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ составляло 6-14% от ЕКО. Кислая аллювиальная почва (разрез 17) была слабонасыщенной основаниями, т.к. общая доля $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ составляла от 30 до 57% от ЕКО.

С точки зрения природно-техногенного почвообразования определенный интерес представляют данные о составе обменных оснований. Аллювиальные почвы таежно-лесной зоны сформировались в условиях водозастойного режима под воздействием процесса оглеения. Глееобразование – биогеохимический почвообразовательный процесс, возникающий в анаэробной среде на кислых и нейтральных породах, не содержащих сульфатов, при наличии органического вещества, способного к ферментации. При участии гетеротрофной микрофлоры продуцируется значительное количество фульвокислот и органических низкомолекулярных кислот, поэтому для глеевых почв характерны кислая реакция и ненасыщенность основаниями [Зайдельман, 2017]. Дополнительное поступление оснований с техногенными водами способствовало вытеснению H^+ и Al^{3+} из почвенного поглощающего комплекса и нейтрализации кислотности, что было отмечено во вторичном солончаке и в аллювиальной глееватой супесчаной почве (разрезы 13, 15). В соровом солончаке и в аллювиальной глееватой почве (разрезы 16, 17) в настоящее время сохранились кислотность среды и ненасыщенность основаниями [Eremchenko, Pakhorukov, Shestakov, 2020].

По нашим данным состав обменных оснований в аллювиальных вторично засоленных почвах представлен Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , $H^+ + Al^{3+}$. Известно, что одновременное присутствие H^+ и Na^+ в почвенном поглощающем комплексе характерно для солодей и дерново-солодей [Базилевич, 1965; Сапрыкин, 2021.]. По классическим представлениям, солоди образуются при рассолении солонцов, обменный Na^+ постепенно вытесняется H^+ [Гедройц, 1955]. В кислых аллювиальных почвах в почвенном поглощающем комплексе под воздействием хлоридно-натриевых техногенных вод идет постепенное вытеснение H^+ одновалентными катионами, прежде всего Na^+ . Между водорастворимым Na^+ и его содержанием в почвенном поглощающем комплексе аллювиальных почв

проявляется сильная взаимосвязь ($R^2=0,75$) [Елизаров и др., 2023].

Не менее аномальным является присутствие в почвенном поглощающем комплексе аллювиальных почв значительных количеств K^+ . Калиевые соли техногенного происхождения из грунтовых вод поступают в аллювиальные почвы, увеличивая сверх всех природных пределов долю обменного калия (до 50% ЕКО во вторичном солончаке) [Eremchenko, Pakhorukov, Shestakov, 2020].

В профиле вторичного солончака и аллювиальной глеевой супесчаной почвы (разрезы 13, 15) на глубине 70-80 см отмечены новообразования мелкокристаллического гипса. В верхней части почвенного профиля присутствие гипса визуально не установлено, но аналитические методы показали гипсосодержание в количестве 1,3-2,0%. В естественных условиях аккумуляция гипса характерна для почв аридных и семиаридных регионов. Гипсообразование в почвах может быть связано с: а) поступлением и упариванием грунтовых вод, насыщенных по кальцию и сульфат-иону; б) обменными процессами, в результате которых происходит накопление гипса за счет обменных реакций между кальцием карбонатов и сульфатно-натриевыми водами (декарбонатизация); в) обменными реакциями солевых сульфатно-натриевых растворов и кальцием почвенного поглощающего комплекса [Eswaran, Gong, 1991; Yamnova et al, 2013; Хитрова, Роговнева, 2021]. Поверхностные и подземные воды на территории исследования являются ненасыщенными по кальцию и сульфат-ионам. Осаждение гипса мучнистого морфотипа происходило при высыхании мелкого водоема, поэтому в верхних слоях солончака сорового его содержание достигало 12-19%. Такое гипсообразование по пути испарительной концентрации солей – это явление сезонное и относительно кратковременное. При определенной длительности и интенсивности вторичного засоления причиной образования гипса в почвах может быть постепенное накопление в почве относительно мало подвижных Ca^{2+} и SO_4^{2-} с образованием из них гипса.

Не исключаем возможности криогенного гипсообразования в профиле техногенно засоленных почв, так как новообразования гипса обнаружены на глубине промерзания почв в условиях южной тайги. Известно, что с динамикой промерзания-оттаивания почвы связано передвижение вещества. При промерзании влагонасыщенных почв часть солей вовлечена в лед, часть отжимается в нижележащие слои воды. В результате их концентрация возрастает в растворе перед фронтом кристаллизации, образуя области криогенной концентрации. После достижения предела растворимости соли выпадают в осадок. При последующем оттаивании не все выпавшие в осадок соли переходят в раствор, образуя различные аккумуляции в профиле [Почвообразовательные процессы, 2006; Eremchenko, Pakhorukov, Shestakov, 2020].

На основании полученных результатов диагностировали исследуемые техногенно засоленные почвы поймы р. Ленва по изученным показателям – до рода и вида [Классификация и диагностика почв..., 2004], а также в соответствии с мировой корреляционной базой почвенных ресурсов [WRB, 2022]:

разрез 13 – солончак вторичный хлоридный калиево-натриевый насыщенный средненатриевый карбонатный гипсодержащий по аллювиальной гумусовой поверхностно оглеенной суглинистой почве; Fluvic Sodic Gleyic Solonchak (Chloridic, Hypersalic, Loamic, Ochric);

разрез 15 – аллювиальная серогумусовая поверхностно оглеенная солончаковая сильнозасоленная хлоридная кальциево-натриевая насыщенная средненатриевая карбонатная супесчано-легкосуглинистая почва Sodic Gleyic Fluvisol (Loamic, Ochric, Salic);

разрез 16 – солончак вторичный сульфидный (соровый) сульфатно-хлоридный натриево-кальциевый ненасыщенный средненатриевый гипсодержащий суглинистый; Fluvic Sodic Gleyic Solonchak (Chloridic, Gypsic, Hypersalic, Loamic, Ochric, Sulfidic);

разрез 17 – аллювиальная серогумусовая поверхностно оглеенная солончаковая хлоридная магниевое-натриево-кальциевая сильнозасоленная ненасыщенная малонатриевая суглинистая почва; Sodic Gleyic Fluvisol (Loamic, Ochric, Salic).

3.3.3.2. Свойства аллювиальных солончаковых ненасыщенных почв

В 2018 и 2021 гг. на контрольных участках долины р. Ленва, находящихся на расстоянии около 1 км друг от друга, изучены свойства трех аллювиальных солончаковых ненасыщенных почв с резкокислой реакцией почвенной среды в серогумусовых горизонтах. Внешний вид почв продемонстрирован на рисунках 25-27.

Разрез 14 заложен в понижении центральной части долины под лугово-болотной растительностью (рис. 25). Координаты разреза 14 (в системе координат WGS-84): N 59.19.072, E 056.49.424.

A_{Ys,g} – серогумусовый глееватый горизонт, 0-15/15 см, темно-бурый, слой 0-4 см более темного цвета, густо переплетен корнями, комковатый, тяжелосуглинистый, увлажненный, слегка вязкий, переход постепенный;

C_{s,g,ox}[~] – почвообразующая глееватая порода, 15-65/40 см, светло-сизая с яркими рыжими пятнами, сырая, бесструктурная, вязкая, суглинистая; с глубины около 40 см сочится вода;

CG_s[~] – почвообразующая глеевая порода с глубины 65 см приобретает серо-сизую окраску с редкими рыжими пятнами; на глубине около 80 см присутствуют округлые стяжения мелкокристаллического гипса.

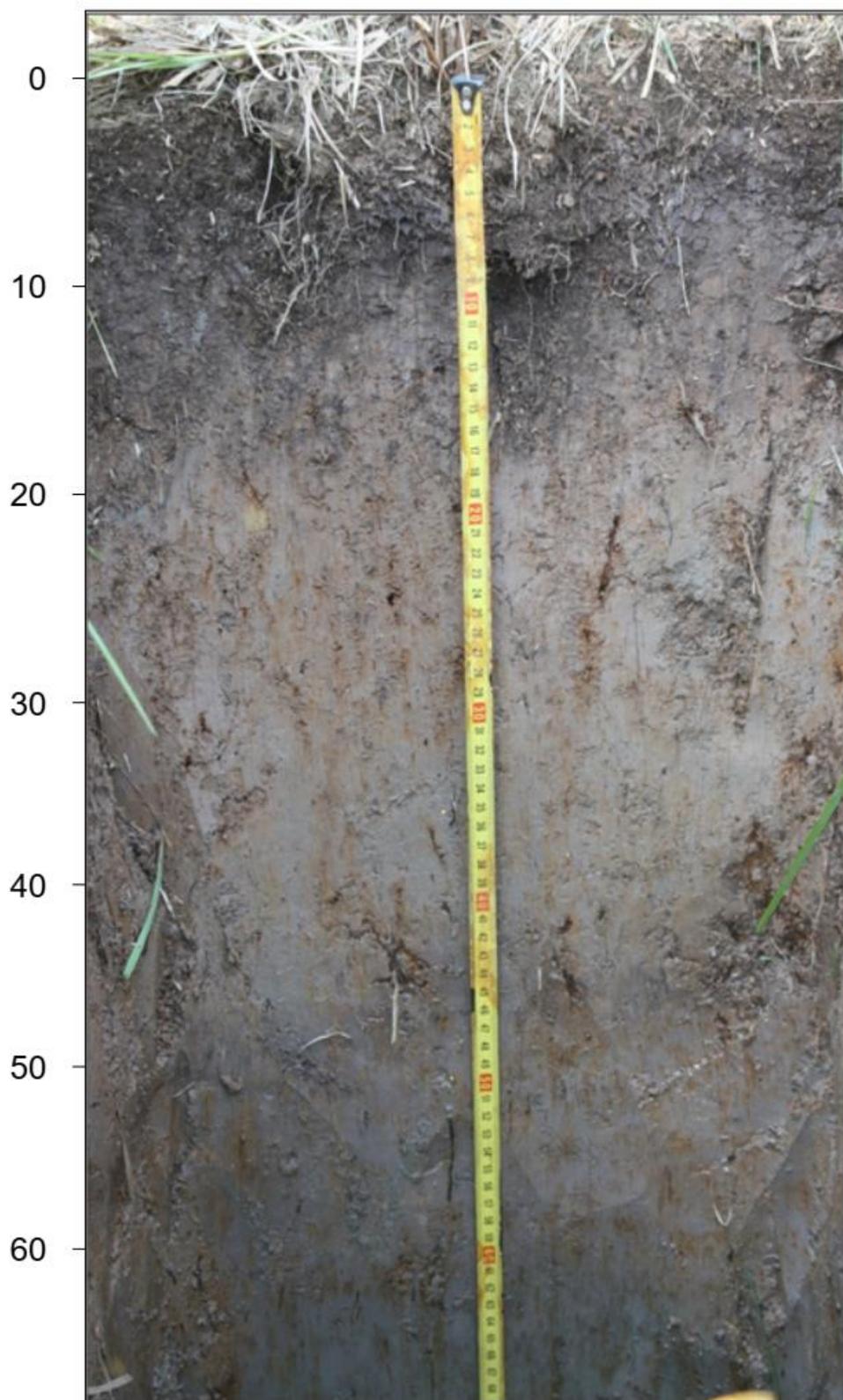


Рисунок 25 – Аллювиальная серогумусовая поверхность оглеенная солончаковая почва из долины р. Ленва (разрез 14)

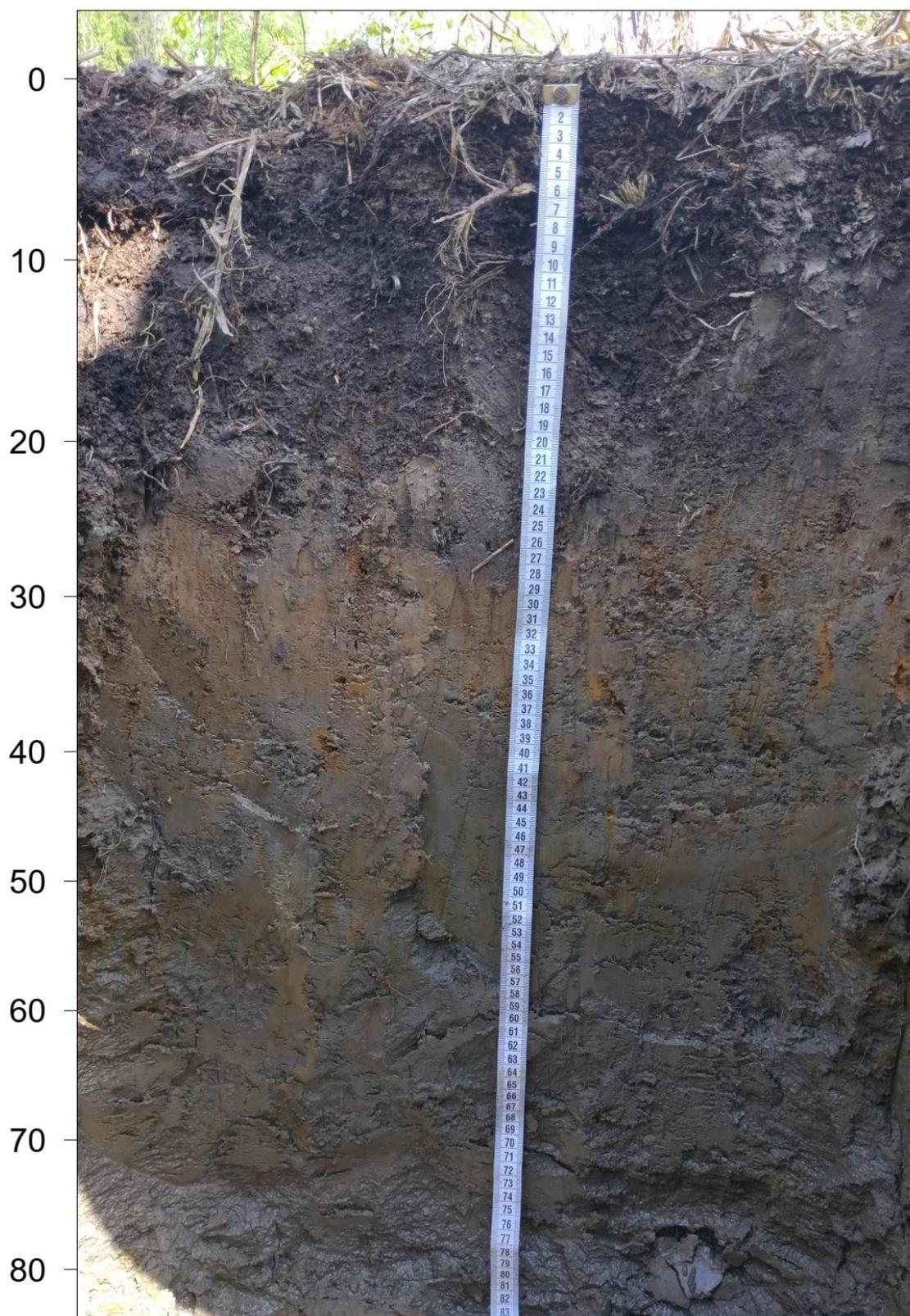


Рисунок 26 – Аллювиальная серогумусовая поверхностно оглеенная солончаковая почва из долины р. Ленва (разрез 18)

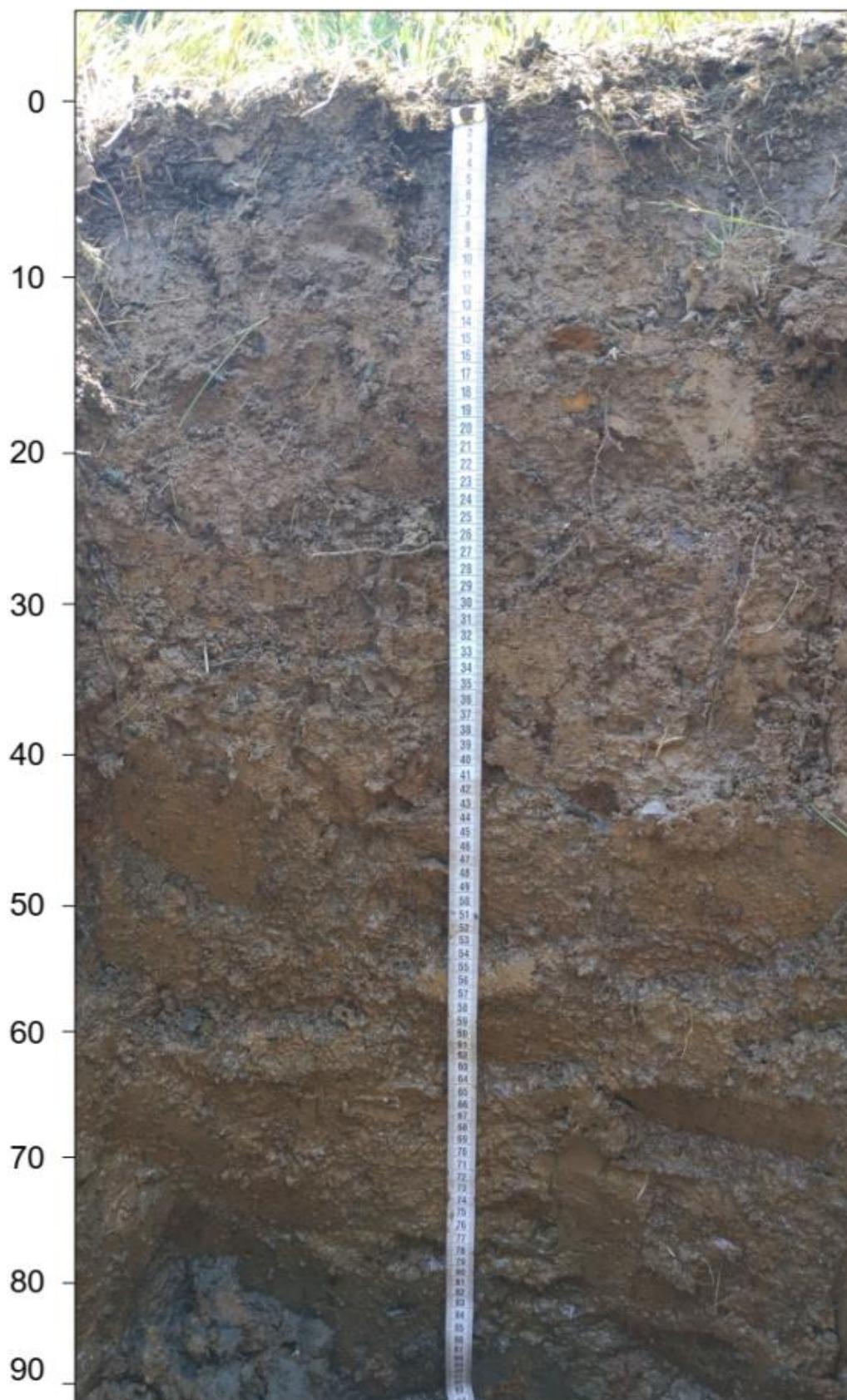


Рисунок 27 – Аллювиальная серогумусовая поверхностно оглеенная солончаковая почва из долины р. Ленва (разрез 19)

Разрез 18 заложен в 10-15 м от русла р. Ленва; живая растительность отсутствует, на поверхности сухие остатки трав, выражена кочковатость; оголенные участки почвы покрыты железистой пленкой ржаво-коричневого цвета (рис. 26). Координаты разреза 18 (в системе координат WGS-84): N 59.19.271 E 056.50.491.

Слой 0-8 см – оторфованная дернина, светло-бурая, сырая.

A_{Ys,g} – серогумусовый глееватый горизонт, 8-20/12 см, темно-бурый, непрочнокомковатый, тяжелосуглинистый, сырой, по корневинам отложены железистые новообразования ржавого цвета; переход заметный по цвету.

A_{Y/Cs,g} – переходный глееватый горизонт, 20-29/9 см, неоднородно окрашенный: бурые языки и ржавые заклины; бесструктурный, тяжелосуглинистый, более уплотненный, вязкий, по корневинам отложены железистые новообразования ржавого цвета, переход заметный по цвету.

C_{s,g,ox}[~] – почвообразующая глееватая порода, 29-37/8 см, рыже-светло-коричневая, тяжелосуглинистая, вязкая, содержит железистые трубочки ржавого цвета.

C_{s,g,ox}[~] – почвообразующая глееватая порода, 37-58/21 см, сизая с ржавыми пятнами, среднесуглинистая, сырая.

C_{Gs}[~] – почвообразующая глеевая порода, 58-82/24 см, сизая, тяжелосуглинистая, липкая, с глубины около 70 см сочится вода.

Разрез 19 аллювиальная серогумусовая глеевая солончаковая почва (рис. 27). Излучина реки, растительность представлена преимущественно ситником (*Juncus* sp.), проективное покрытие около 50%. Координаты разреза 19 (в системе координат WGS-84): N 59.19.292 E 056.50.495.

A_{Ys,g} – серогумусовый горизонт 0-24/24 см, верхняя часть которого представлена оторфованной дерниной мощностью около 5 см; бурый, влажный, бесструктурный, тяжелосуглинистый, вязкий, переплетен корнями трав, переход заметный по плотности, цвету и структуре.

AУ/Cs,g – переходный глееватый горизонт, 24-44/20 см, бурый, многопорядковая ореховатая структура, грани ореховатых отдельностей покрыты относительно толстыми железистыми пленками (при копании похрустывают), влажный, тяжелосуглинистый, плотный, по трещинам и корням присутствует ржавый мицелий, переход заметный по структуре.

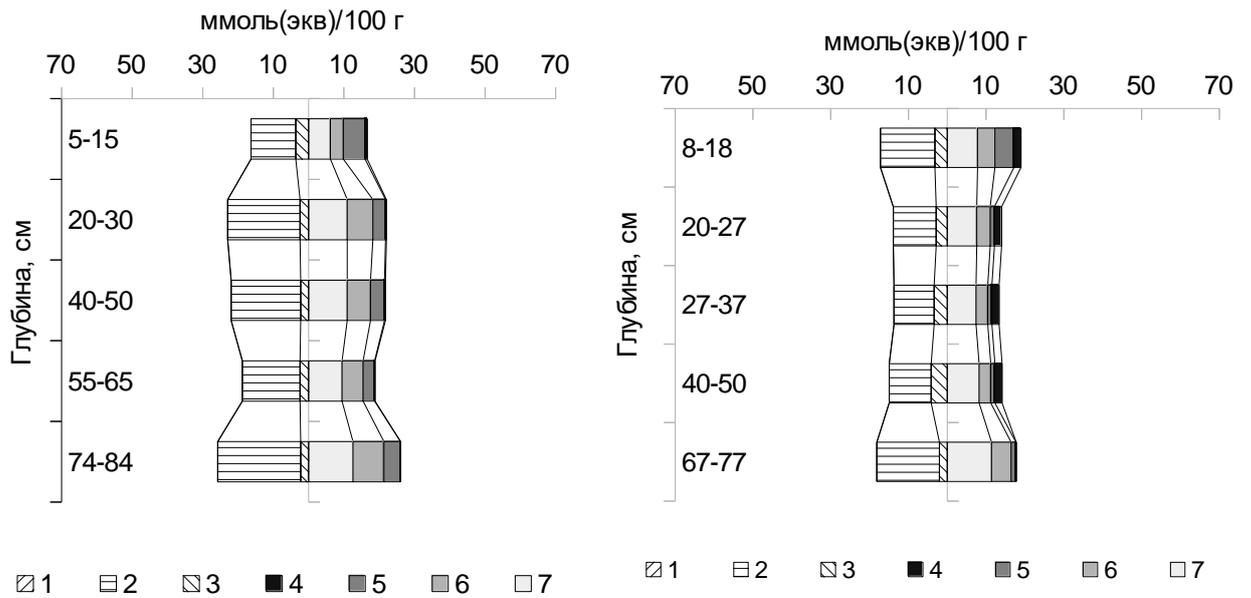
Cs,g[~] – почвообразующая глееватая порода, 44-92/48 см, бурый, сырой, бесструктурный, вязкий, липкий, с глубины 52 см сочится вода, переход по цвету.

Cs,g,ox[~] – почвообразующая глееватая порода с глубины 92 см, серо-голубая с единичными ржавыми пятнами, тяжелосуглинисто-легкоглинистая, слоистая, сырая.

Во всех трех разрезах в обилии встречались железистые новообразования в виде пленок, ржавого мицелия, ржавых пятен, что указывает на переходы Fe (II) ↔ Fe (III), что подтверждает присутствие в техногенно засоленных почвах бактерий родов *Acidocella* и *Acidophilium*, способные катализировать восстановление железа в кислой среде [Хайрулина и др., 2022].

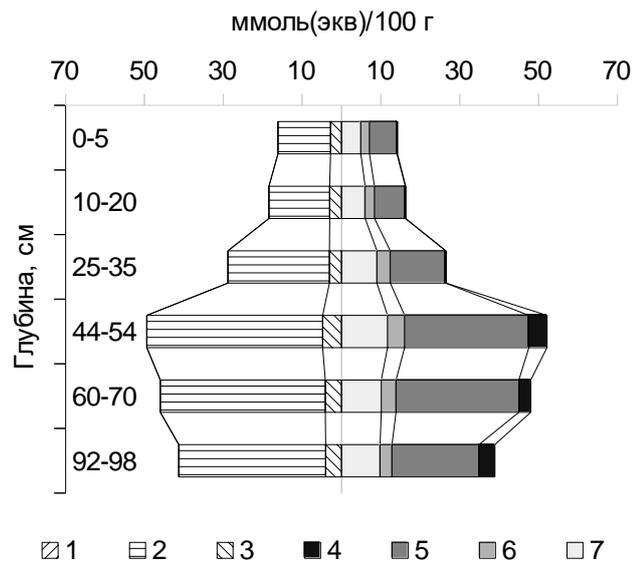
Изучение состава водной вытяжки из аллювиальных почв показало, что значительное количество водорастворимых солей присутствуют в серогумусовых горизонтах, а максимальное их содержание – в оглеенной породе из разреза 19 (рис. 28, приложение Г).

Количество хлорид-ионов в водной вытяжке из почв варьировало от высоких значений (10,3 ммоль(экв)/100 г) до очень высоких (44,6 ммоль(экв)/100 г); содержание сульфат-ионов находилось в пределах 2,0-4,8 ммоль(экв)/100 г. Водорастворимые гидрокарбонаты в почвах отсутствовали. В соответствии с критериями выделения родов по соотношению анионов в водной вытяжке [Классификация и диагностика почв..., 2004] почвы характеризовались хлоридным химизмом засоления.



А

Б



В

Рисунок 28 – Содержание ионов (1 – HCO_3^- ; 2 – Cl^- ; 3 – SO_4^{2-} ; 4 – K^+ ; 5 – Na^+ ; 6 – Mg^{2+} ; 7 – Ca^{2+}) в водных вытяжках из аллювиальных ненасыщенных почв в долине р. Ленва (А – разрез 14; Б – разрез 18, В – разрез 19)

Среди катионов водной вытяжки в почвах из разрезов 14 и 18 доминировали ионы Ca^{2+} , их количество составляло от 6,2 до 12,6 ммоль(экв)/100 г, а в почве из разреза 19 доминировали ионы Na^+ (7,0-22,1 ммоль(экв)/100 г). В соответствии с составом катионов в водной

вытяжке [Классификация и диагностика почв..., 2004], аллювиальные почвы из разрезов 14 и 18 имели кальциевый химизм засоления, а почва из разреза 19 – кальциево-натриевый. Кальциевый химизм, по-видимому, обусловлен накоплением менее подвижного Ca^{2+} на фоне водной миграции Na^+ с гидрохимическим стоком по уклону местности. В то же время приполучении водной вытяжки может раствориться гипс, или из кислой почвы кальций может быть вытеснен протонами из ППК.

Методом связывания водорастворимых ионов в гипотетические соли [Мякина, Аринушкина, 1979] было установлено преобладание хлоридов натрия и кальция в исследуемых аллювиальных почвах. Почвы содержали токсичные соли с поверхности, их количество было наименьшим (0,49%) в верхней части профиля аллювиальной почвы из разреза 14. Максимальный уровень содержания токсичных солей (2,62%) зафиксирован в почвообразующей породе (на глубине 44- м) в почве из разреза 19.

Почвы характеризовались резкокислой реакцией среды в серогумусовых и переходных горизонтах – $\text{pH}_{\text{вод}} \leq 3$ (табл. 8).

Таблица 8 – Физико-химические и химические свойства техногенно засоленных почв в долине реки Ленва

№ разреза	Глубина, см	C _{орг} , %	pH _{вод}	pH _{сол}	Обменные катионы, ммоль(экв)/100 г					ЕКО, ммоль(экв)/100 г	Гипс, %
					Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	H ⁺ +Al ³⁺		
14	5-15	2,93	2,97	2,82	4,72	1,88	1,70	0,88	18,5	27,68	0
	20-30	0,72	2,82	2,58	5,88	2,24	1,91	0,47	11,8	22,3	0
	40-50	-	3,44	3,23	7,08	2,68	2,02	0,53	10,9	23,21	0
	55-65	-	3,27	2,97	7,12	2,32	1,91	0,35	10,3	22,0	0
	74-84	-	3,33	3,18	-	-	-	-	9,7	-	2,5
18	8-18	3,06	2,81	2,62	3,84	3,52	1,51	0,87	33,25	42,99	3,61
	20-27	0,83	3,34	3,18	6,08	2,40	1,62	0,70	14,13	24,93	4,82
	27-37	-	3,67	3,45	6,72	3,04	1,74	0,70	9,56	21,76	4,82
	40-50	-	3,58	3,37	6,88	2,88	1,62	0,52	6,23	18,13	4,82
	67-77	-	3,62	3,31	7,52	2,56	1,62	0,35	5,82	17,87	5,16
19	0-5	0,42	3,34	3,14	3,68	2,72	2,70	0,35	30,34	39,79	4,13
	10-20	0,39	3,03	2,64	5,44	2,56	2,71	0,17	15,79	26,67	4,99
	25-35	-	2,94	2,61	7,04	2,88	4,05	0,35	14,96	29,28	4,99
	44-54	-	4,39	3,89	11,36	4,16	10,85	0,17	6,65	33,19	4,99
	60-70	-	4,81	4,21	11,68	3,20	11,13	0,35	4,16	30,52	5,42
	92-98	-	6,12	5,61	8,48	3,36	7,23	0,17	1,25	20,49	5,50

Примечание: (-) – не определялось.

Емкость катионного обмена колебалась в пределах 13-43 ммоль(экв)/100 г и была относительно повышена в серогумусовых горизонтах. По доле обменного Na^+ в составе поглощенных катионов почвы из разрезов 14 и 18 относятся к виду малонатриевых почв, а почва из разреза 19 – к виду средненатриевых (табл. 8) [Классификация и диагностика почв..., 2004].

В серогумусовых горизонтах солончаковых почв содержание обменных $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ составляла от 18 до 33 ммоль(экв)/100 г. В резкокислых почвенных горизонтах данные обменные катионы преобладали в составе почвенного поглощающего комплекса (до 70%), т.е. почвы относятся к виду ненасыщенных почв [Классификация и диагностика почв..., 2004]. С уменьшением почвенной кислотности в составе обменных катионов доминировали Ca^{2+} и Na^+ , в слабокислой почвообразующей породе (разрез 19) на их долю приходится около 77% ЕКО (табл. 8).

Количество гипса варьировало в пределах 2,5-5,5%, карбонаты отсутствовали. Известно, что в условиях прогрессирующего засоления гипс появляется последним из минералов-солей [Перельман, 1966; Перельман, Касимов, 1999]. В исследованных резкокислых почвах присутствие гипса можно объяснить по М.А Глазовской [2007]. Сульфиды окисляются при установлении окислительного режима с образованием гидроксидов Fe(III) и серной кислоты. Если в почве присутствуют карбонаты кальция, то при взаимодействии с серной кислотой они замещаются гипсом.

Содержание органического вещества [по шкале: Гришина, Орлов, 1978] в аллювиальных почвах было низким и очень низким.

В соответствии со строением почвенного профиля и свойствами аллювиальные кислые почвы из долины р. Ленва диагностированы по изученным показателям – до рода и вида [Классификация и диагностика почв..., 2004], а также в соответствии с мировой корреляционной базой почвенных ресурсов [WRB, 2022]:

разрез 14 – аллювиальная серогумусовая поверхностно оглеенная солончаковая сильнозасоленная хлоридная натриево-магниевая-кальциевая ненасыщенная слабонатриевая гипсодержащая суглинистая почва; Sodic Gleyic Fluvisol (Loamic, Ochric, Salic);

разрез 18 – аллювиальная серогумусовая поверхностно оглеенная солончаковая очень сильнозасоленная хлоридная магниевая-кальциевая ненасыщенная слабонатриевая гипсодержащая суглинистая почва; Gypsic Sodic Gleyic Fluvisols (Loamic, Salic, Thionic);

разрез 19 – аллювиальная серогумусовая поверхностно оглеенная солончаковая очень сильнозасоленная хлоридная кальциевая-натриевая ненасыщенная средненатриевая гипсодержащая суглинистая почва; Gypsic Sodic Gleyic Fluvisols (Loamic, Salic, Thionic).

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

Метеорологические условия в период наблюдений. Режимные наблюдения за свойствами аллювиальных солончаковых почв проводились в период с 17 июня по 7 сентября 2022 г.: 17.06, 04.07, 14.07, 25.07, 02.08 и 07.09.

В период наблюдений средняя температура воздуха составляла 17,6°C, средняя влажность воздуха – 73,1%, количество дней с осадками – 33 (приложения Е, Ж).

17 июня наблюдались средняя температура и влажность, небольшое количество осадков; 4 июля – пониженная температура, средняя влажность и небольшое количество осадков; 14 июля – повышенная температура, средняя влажность, осадки отсутствовали; 25 июля – повышенная температура, пониженная влажность, осадки отсутствовали; 2 августа – средняя температура, пониженная влажность, осадки отсутствовали; 7 сентября – низкая температура, высокая влажность, небольшое количество осадков

(приложения Е, Ж). В целом следует отметить, что летний период 2022 г. был одним из самых жарких и засушливых за последние 5 лет (см. рис. 1).

Динамика полевой влажности, показателей рН и Eh в насыщенной почве. На контрольном участке в долине р. Черная строение профиля и основные свойства генетических горизонтов почв, находящихся под воздействием минерализованных вод от солевала БКПРУ-3, были представлены в разделе 3.3.2. В профиле аллювиальных серогумусовых солончаковых почв отмечена темная (вплоть до черной) окраска глееватых и глеевых горизонтов, что, по-видимому, обусловлено образованием сульфидных минералов.

Известно, что колебания влажности в гидроморфных почвах сопровождаются существенными изменениями окислительно-восстановительного потенциала [Picek et al, 2000; Мохаммади, 2022]. В течение летне-осеннего периода 2022 г. на контрольном участке в долине р. Черная на глубине около 10-40 см полевая влажность почвы находилась в пределах 13-24% (рис. 29; приложение 3). Повышенной влажностью, как правило, отличались почвенные слои на глубине 30-40 см. Проявилась некоторая тенденция к общему повышению полевой влажности во второй половине лета и начале сентября, по сравнению с первой половиной лета [Пахоруков, Еремченко, 2023].

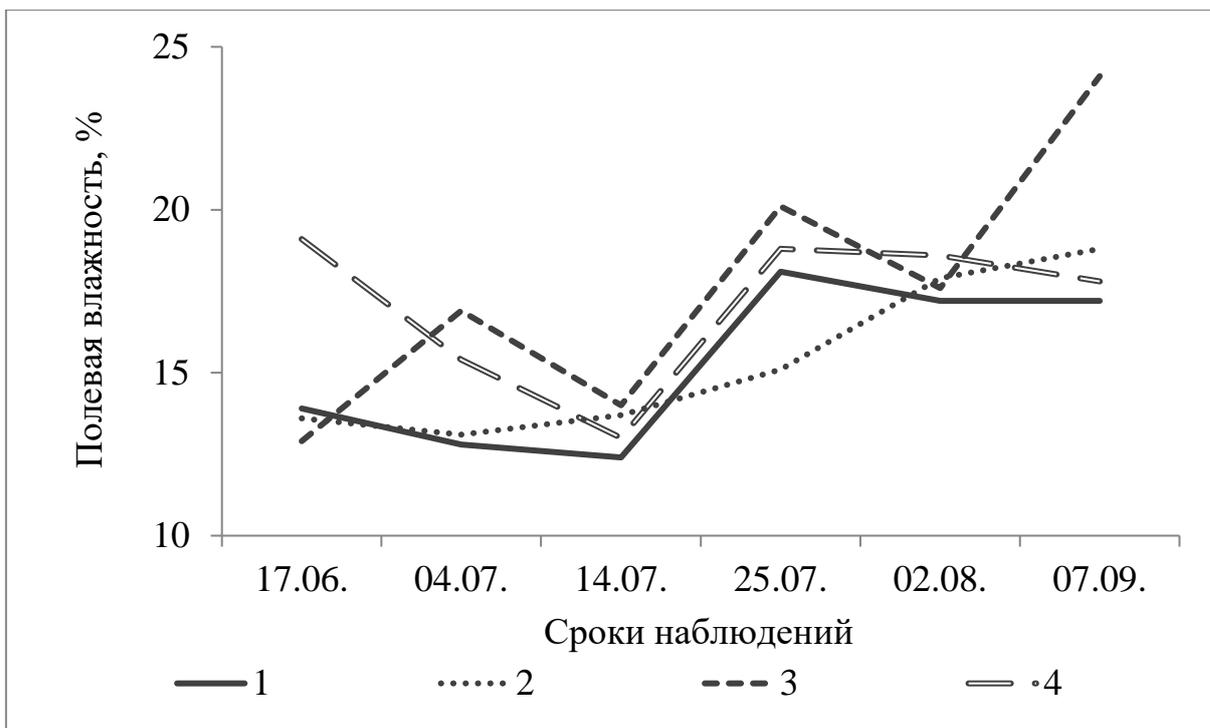


Рисунок 29 – Полевая влажность в аллювиальной солончаковой насыщенной почве из долины р. Черная на глубине: 1 – 10±2 см; 2 – 20±2 см; 3 – 30±2 см; 4 – 40±2 см

В течение всего периода наблюдений в аллювиальной почве на глубине около 10-30 см реакция почвенной среды находилась в пределах нейтральных значений – 6,5-7,5 рН (рис. 30; приложение II). На глубине около 40 см в половине сроков наблюдений отмечали слабощелочную реакцию (7,7-7,8 рН), в остальное время – нейтральную реакцию почвенной среды [Пахоруков, Еремченко, 2023].

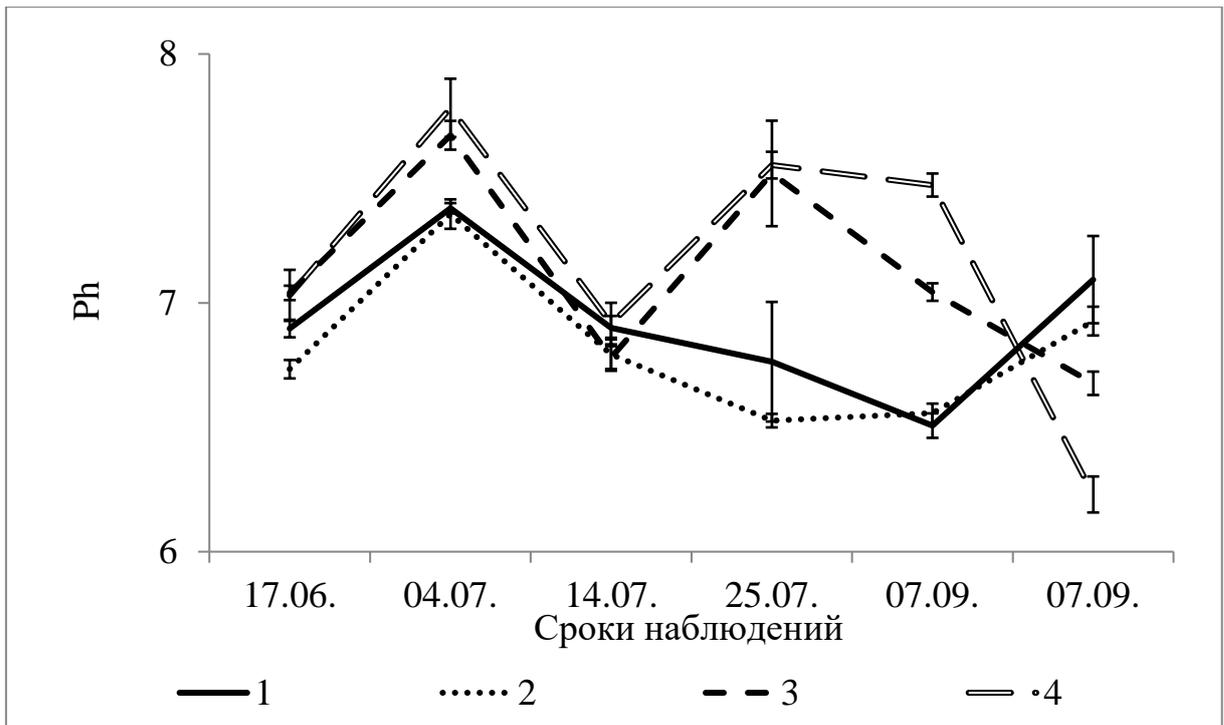


Рисунок 30 – Величина рН в аллювиальной солончаковой насыщенной почве из долины р. Черная на глубине: 1 – 10±2 см; 2 – 20±2 см; 3 – 30±2 см; 4 – 40±2 см

В середине июня и в июле на глубине около 10-20 см величина Eh, как правило, находилась в пределах небольших положительных значений – 5-185 мВ (рис. 31; приложение I); на глубине 30-40 см в этот период отмечены отрицательные значения Eh (от -70 до -200 мВ). В начале августа и начале сентября в почве были относительно повышенные значения Eh во всех слоях по сравнению с данными середины лета: на глубине около 10-20 см – 220-250 мВ; на глубине около 30-40 см – от -30 до -90 мВ [Пахоруков, Еремченко, 2023].

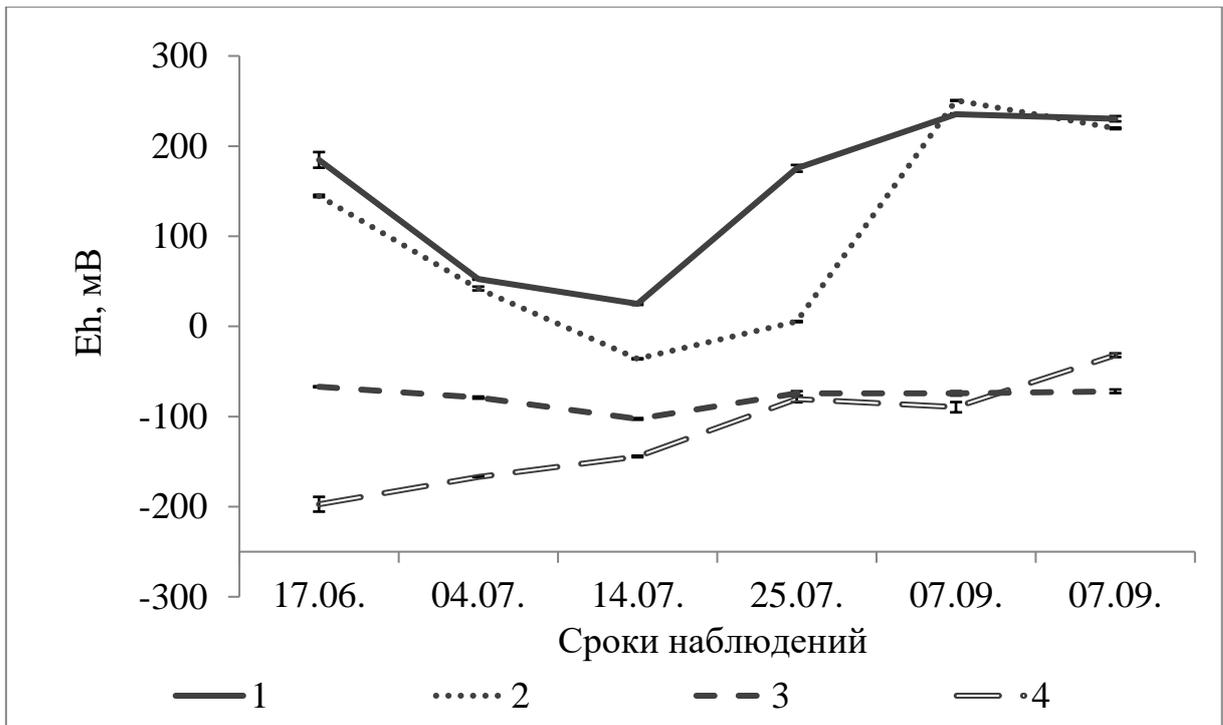


Рисунок 31 – Величина Eh в аллювиальной солончаковой насыщенной почве из долины р. Черная на глубине: 1 – 10±2 см; 2 – 20±2 см; 3 – 30±2 см; 4 – 40±2 см

Аэрированные почвы имеют Eh более +400-450 мВ [Кауричев, 1967; Смирнова, Козлов, 2023], следовательно, для верхней части профиля солончаковой почвы из долины р. Черная характерна восстановительная обстановка. При значениях менее 200 мВ наблюдается выраженный восстановительный режим, почвы переувлажнены [Смирнова, Козлов, 2023]. По W.J. Mitsch с соавторами [Mitsch et al, 2015] в почвах с нейтральной реакцией среды величина Eh около 225-250 мВ свидетельствует о развитии процессов восстановления азота и марганца. Fe(III) восстанавливается до Fe(II) при Eh от +100 до -100 мВ [Mitsch et al, 2015]. По мнению ряда исследователей, в почве для инициирования процесса восстановления сульфат-иона требуются отрицательные значения Eh [Harter et al, 1965; Takai et al, 1966; Connell et al, 1968]. По W.J. Mitsch с соавторами [Mitsch et al, 2015] в почвах с нейтральной реакцией среды SO₄ восстанавливается до S²⁻ при величине Eh от -100 до -200 мВ. Следовательно, в исследуемой

аллювиальной почве на глубине около 30-40 см Eh в пределах от +100 до -200 мВ благоприятствует развитию процессов восстановления железа и серы [Пахоруков, Еремченко, 2023].

В долине р. Черная имеются условия, необходимые для образования пирита: сульфат-ионы, железосодержащие минералы, органическое вещество и анаэробные условия, чередующиеся с ограниченной аэрацией [Ivarson et al, 1982; Kittrick et al, 1982; Pons et al, 1982; Fanning, 2017]. Процесс редукции Fe(III) рассматривается как биохимический; роль бактерий сводится к сбраживанию органического вещества, которое в результате образует определенные низкомолекулярные органические соединения, действующие на Fe(III) как редуцтанты [Зайдельман, 1998]. Железавосстанавливающие бактерии способны использовать энергию от восстановления Fe(III) для поддержания роста [Coates, 1999]; многие из них (представители родов *Shewanella*, *Panatoea* и *Rhodoferrax*) не являются строгими анаэробами и способны использовать для дыхания кислород [Lin et al, 2004]. В техногенно засоленных почвах Предуралья присутствуют бактерии, редуцирующие Fe(III) [Хайруллина и др., 2022].

Динамика полевой влажности, показателей pH и Eh в ненасыщенных почвах. В долине р. Ленва, находящейся под воздействием шламохранилища БКПРУ-3, сформировались почвы, обладающие резкокислой реакцией среды в верхних горизонтах. Строение профиля и основные характеристики почв были приведены в разделе 3.3.3.2. На контрольном участке около разрезов 18 и 19 были проведены режимные наблюдения.

В зависимости от климатических условий и влажности почвы окислительно-восстановительный потенциал и реакция среды демонстрируют определенную изменчивость с суточным циклом, сильными сезонными и межгодовыми колебаниями [Mansfeldt, 2003; Sabiene et al, 2010; Мохаммади, 2022]. В почве у разреза 18 в течение периода наблюдений

полевая влажность колебалась в пределах 9-32%; прослежена некоторая тенденция к увеличению влажности от начала лета к сентябрю (рис. 32; приложение К). На глубине около 10 см полевая влажность почвы в течение всего периода наблюдений была заметно выше, чем в нижележащих слоях, что, возможно, обусловлено повышенной влагоемкостью оторфованной дернины [Пахоруков, Еремченко, 2023].

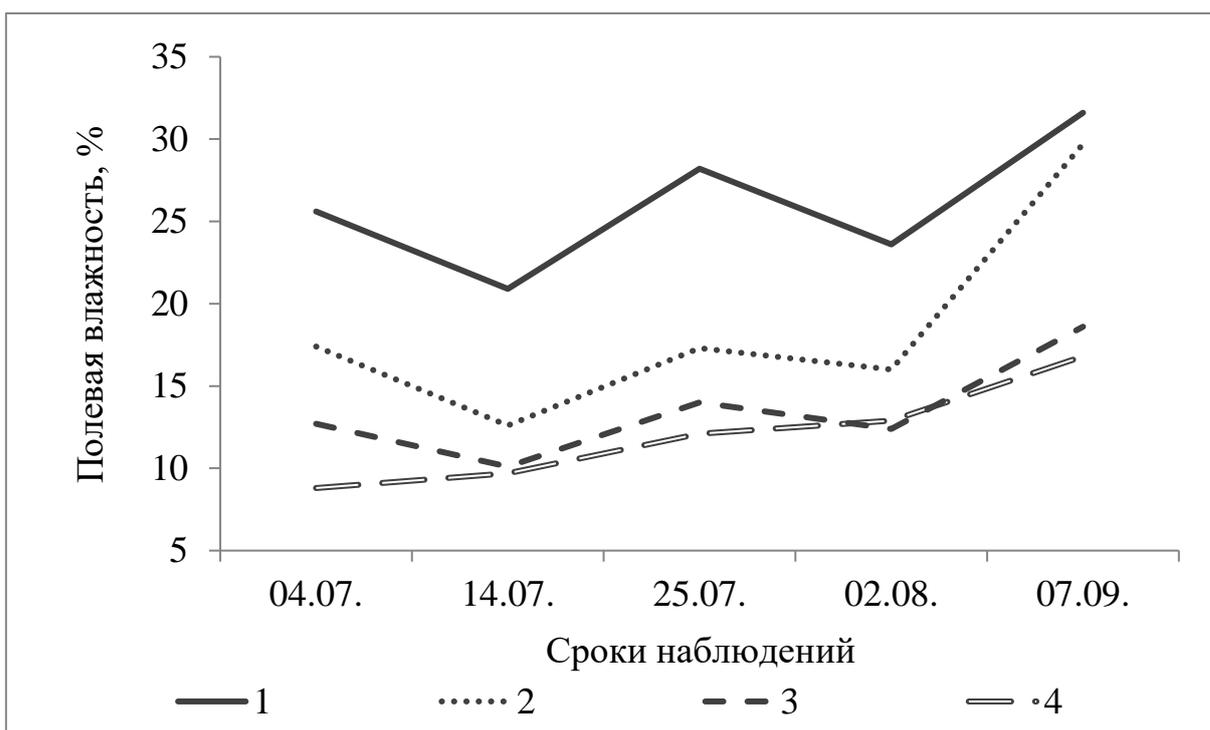


Рисунок 32 – Динамика полевой влажности в аллювиальной солончаковой ненасыщенной почве (разрез 18) в долине р. Ленва на глубине:

1 – 10±2 см; 2 – 20±2 см; 3 – 30±2 см; 4 – 40±2 см

В почве из разреза 19 отмечены колебания полевой влажности почвы в пределах 9-17% (рис. 33; приложение Л). На глубине около 10 и 40 см влажность почвы повышалась от июля к сентябрю, но на глубине около 20-30 см отмечали также заметное повышение влажности в конце июля [Пахоруков, Еремченко, 2023].

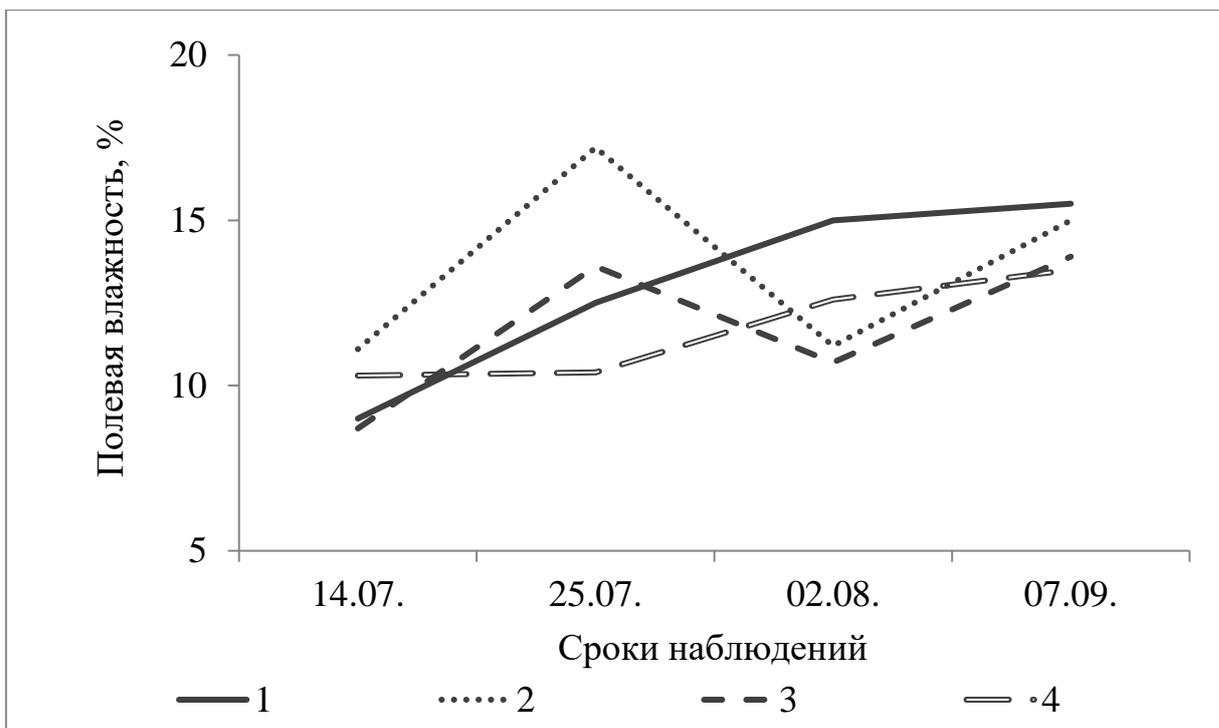


Рисунок 33 – Динамика полевой влажности в аллювиальной солончаковой ненасыщенной почве (разрез 19) в долине р. Ленва на глубине:

1 – 10±2 см; 2 – 20±2 см; 3 – 30±2 см; 4 – 40±2 см

В целом следует отметить, что за период наблюдений не выявлено одинаковых закономерностей в изменениях полевой влажности на разных контрольных площадках. Известно, что в аллювиальных почвах содержание влаги обусловлено как погодными условиями местности, так и уровнем почвенно-грунтовых и речных вод, которые могут пополняться атмосферными осадками в сопряженных ландшафтах.

Природные засоленные почвы при нейтральном составе солей, как правило, имеют слабощелочную или нейтральную реакцию среды [Воробьева, Панкова, 2008]. Обе аллювиальные солончаковые почвы долины р. Ленва в период наблюдений характеризовались резкокислой реакцией почвенной среды в поверхностных горизонтах: на глубине около 10 см $pH < 3$, на глубине около 20 см – 3-4 pH (рис. 34-35; приложение М). В почве у разреза 18 на глубине около 30-40 см кислотность почвы снижалась до 4,7-5,9 pH . Почва у разреза 19 в этом слое была более кислой – в пределах 4-

5 рН. В почве у разреза 18 в течение периода наблюдений прослежена тенденция к повышению кислотности; а в почве у разреза 19, напротив, в начале осени кислотность была наименьшей [Пахоруков, Еремченко, 2023]. Считается, что резкокислая реакция среды (менее 3-4 рН) характерна для почв, в которых идут процессы окисления сульфидов с образованием серной кислоты [Перельман, 1966; Перельман, Касимов, 1999; Dent, 1993; Husson et al, 2000; Michael, 2018].

В сухое лето 2022 г. верхняя часть профиля аллювиальных почв оказалась в окислительных условиях, присутствующие в них сульфиды были окислены с образованием серной кислоты и формированием резко кислой реакции среды.

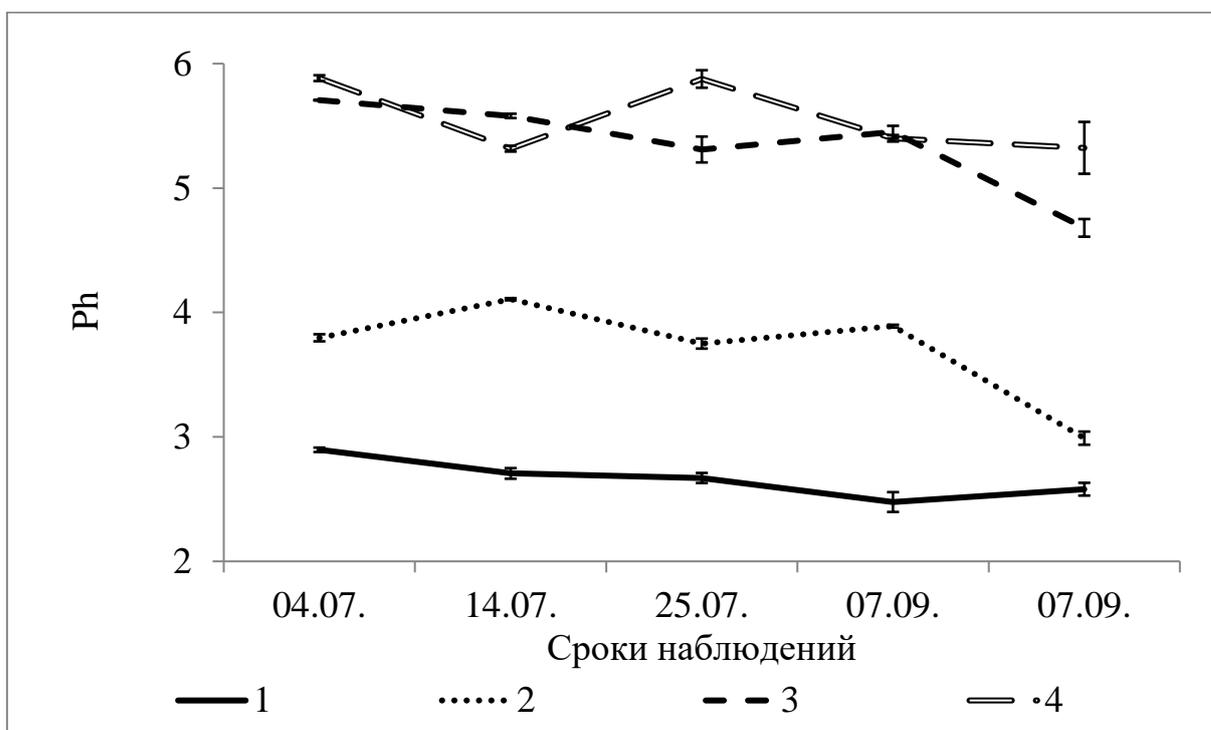


Рисунок 34 – Величина рН в аллювиальной солончаковой ненасыщенной почве (разрез 18) из долины р. Ленва на глубине: 1 – 10±2 см; 2 – 20±2 см; 3 – 30±2 см; 4 – 40±2 см

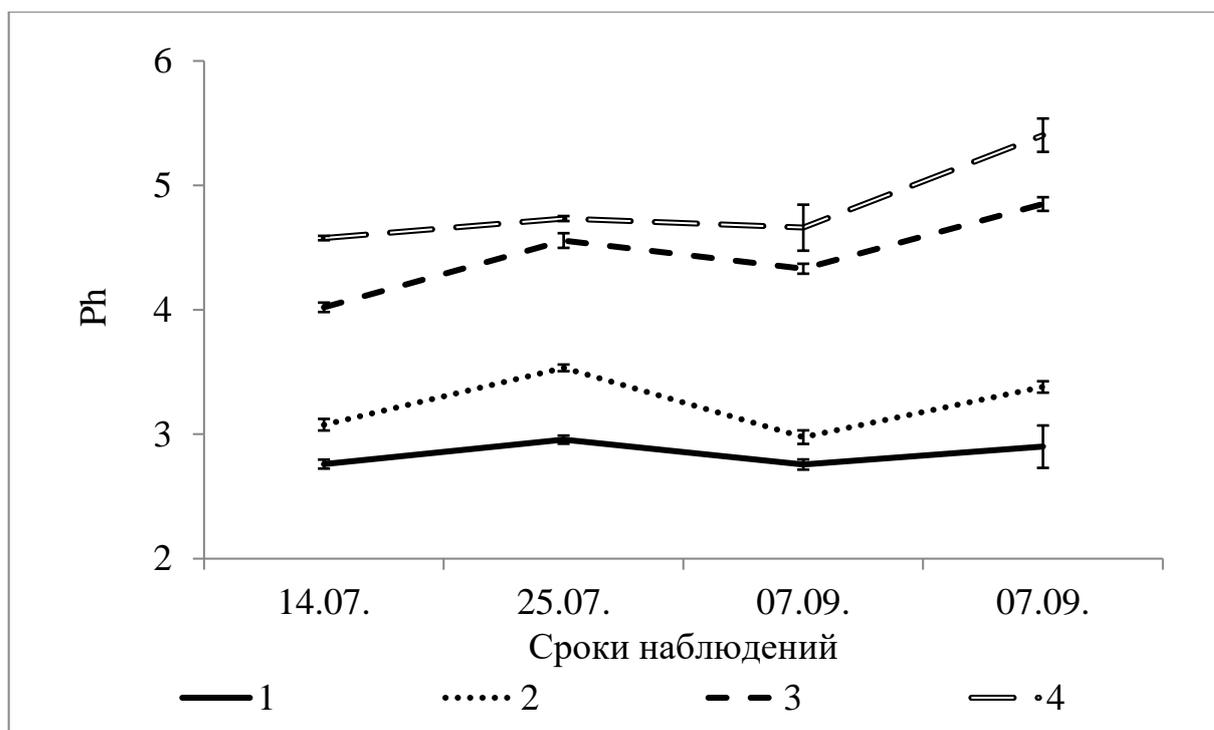


Рисунок 35 – Величина рН в аллювиальной солончаковой ненасыщенной почве (разрез 19) из долины р. Ленва на глубине: 1 – 10±2 см; 2 – 20±2 см; 3 – 30±2 см; 4 – 40±2 см

В процессе наблюдений за почвами долин малых рек в пределах территории г. Перми установлено, что в верхних горизонтах аллювиальных почв окислительно-восстановительные условия варьируют от интенсивно восстановительных (-174 мВ) до умеренно окислительных условий (532 мВ). В глеевых горизонтах этих почв Eh колебалась от -111 мВ до 396 мВ [Власов, 2021.]. Как было указано выше, летне-раннеосенний период 2022 г. отличался засушливостью. В обеих почвах из долины р. Ленва на глубине около 10 см отмечали окислительную обстановку (Eh 450-540 мВ). В почве у разреза 18 на глубине около 20 см преобладала слабо восстановительная обстановка (Eh = 170-340 мВ), а на глубине 30-40 см – восстановительная обстановка (Eh от +70 до -50 мВ). В почве у разреза 19 отрицательных значений Eh не наблюдали; преобладала переходная обстановка: на глубине около 20 см Eh находился в пределах +370-440 мВ, на глубине 30-40 см – +160-300 мВ (рис. 36-37; приложение М) [Пахоруков, Еремченко, 2023].

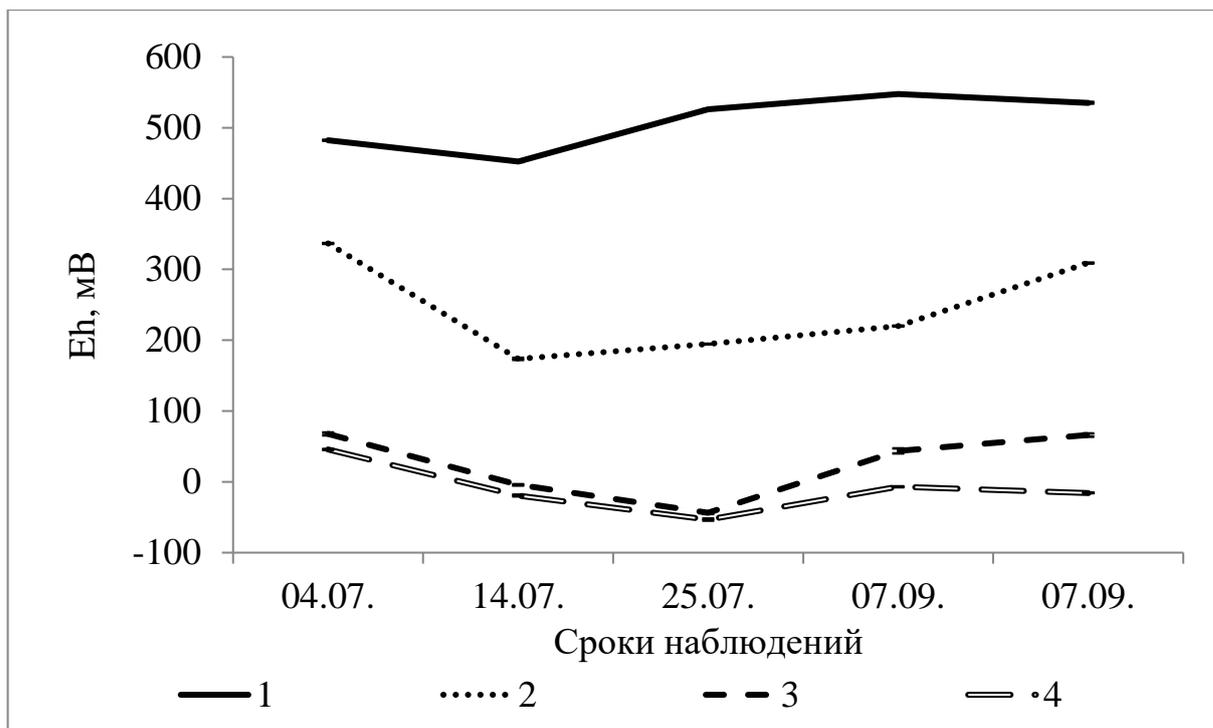


Рисунок 36 – Величина Eh в аллювиальной солончаковой ненасыщенной почве (разрез 18) из долины р. Ленва на глубине: 1 – 10±2 см; 2 – 20±2 см; 3 – 30±2 см; 4 – 40±2 см

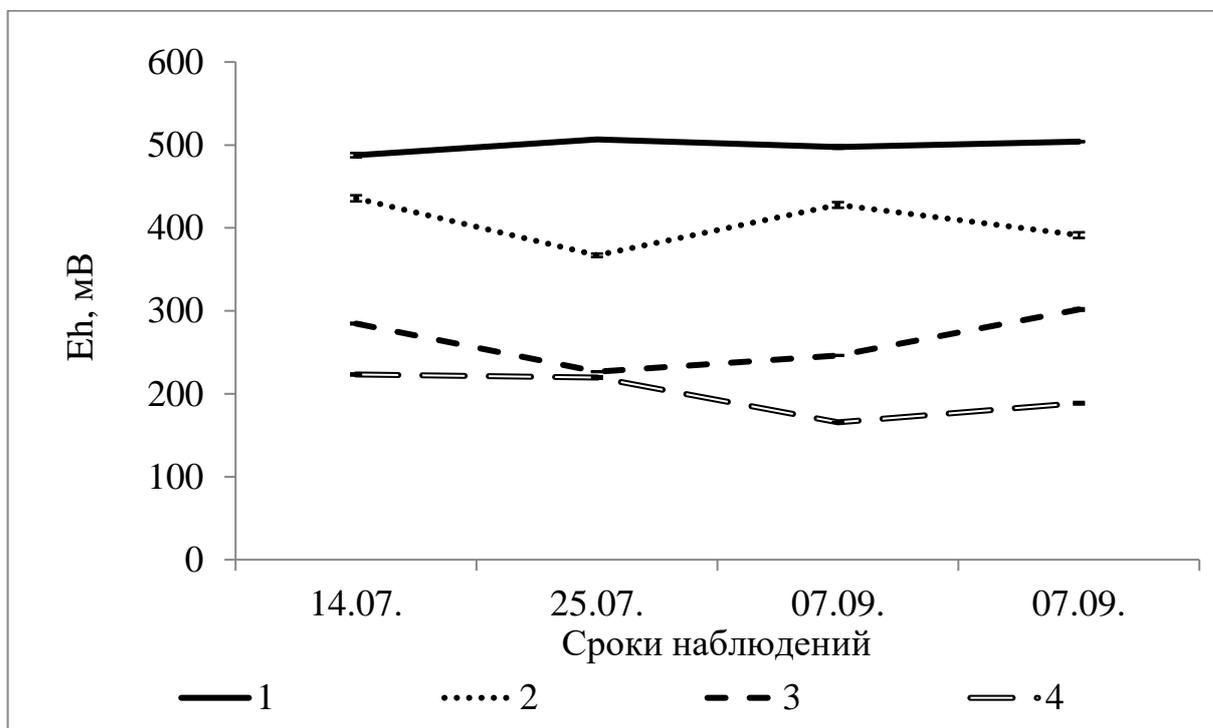


Рисунок 37 – Величина Eh в аллювиальной солончаковой ненасыщенной почве (разрез 19) из долины р. Ленва на глубине: 1 – 10±2 см; 2 – 20±2 см; 3 – 30±2 см; 4 – 40±2 см

При значениях Eh почв более 450 мВ почвы характеризуется окислительной обстановкой, при значениях менее 200 мВ наблюдается выраженный восстановительный режим, почвы переувлажнены [Смирнова, Козлов, 2023]. Восстановительная среда с Eh менее 100 мВ предполагает развитие процессов восстановления железа [Mitsch et al, 2015]. О подвижности восстановленного железа, множественных переходах Fe(III) ↔ Fe(II) в аллювиальных почвах долины р. Ленва свидетельствует обилие железистых новообразований ржаво-коричневого цвета. Превращение сульфата в сульфид зависит от реакции почвенной среды; вне диапазона от 6,5 до 8,5 рН отмечали лишь незначительное развитие сульфатредукции [Connell et al, 1968]. Возможно, поэтому в профиле аллювиальных кислых почв, в отличие от насыщенных почв из долины р. Черная, отсутствовала темная (почти черная) окраска горизонтов (см. раздел 3.3.3.2).

Значимых регрессионных зависимостей между полевой влажностью и кислотно-основными, окислительно-восстановительными условиями в аллювиальных солончаковых почвах не установлено.

Считается, что рН и Eh отрицательно коррелируют в почвах, рН имеет тенденцию увеличиваться при развитии биохимического восстановления и уменьшаться в окислительных условиях [Van Breemen, 1987; Bohrerova et al, 2004]. На связь между этими показателями в исследуемых аллювиальных солончаковых почвах долин рек Черная и Ленва указывает полученная регрессионная зависимость между показателями рН (y) и Eh (x): $y = 6,35 - 0,0068x$; коэффициент корреляции $R = -0,84$; критерий Фишера $F = 130$; уровень значимости $P = 0,000$ (рис. 38). Согласно уравнению, адекватному полученным данным, в верхних слоях (0-40 см) почв при Eh около -20 мВ величина рН=6,6, а при Eh=500 мВ рН снижается до 3,0 единиц [Пахоруков, Еремченко, 2023]. 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]. На месторождении калийных

солей в местах разгрузки засоленных подземных вод в почвах отмечали присутствие гидротроилитового горизонта [Хайрулина и др., 2018, 2022].

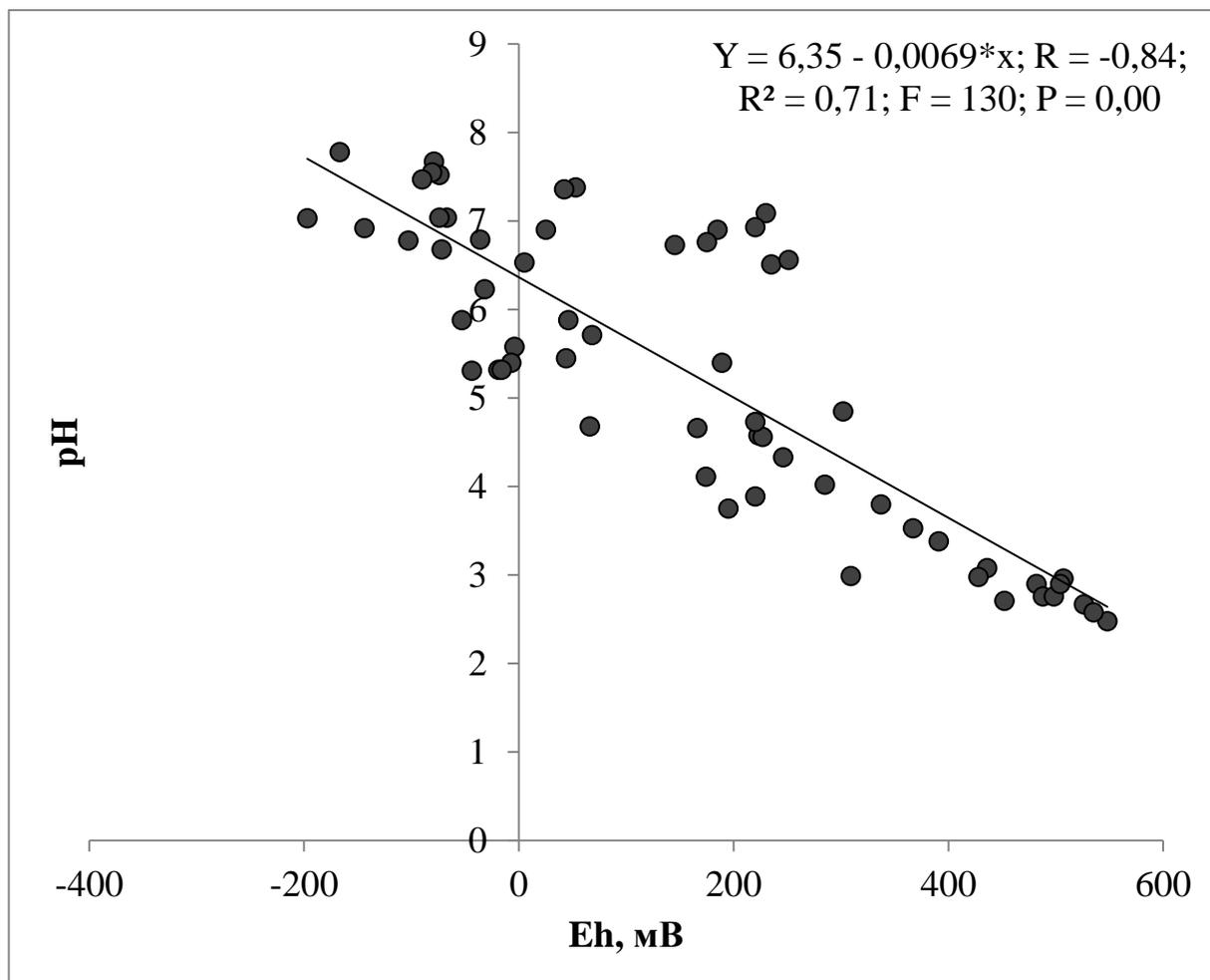


Рисунок 38 – Зависимость между реакцией почвенной среды и окислительно-восстановительными условиями в аллювиальных солончаковых почвах

Исследования пермских микробиологов в полной мере подтверждают множественные переходы $Fe^{3+} \leftrightarrow Fe^{2+}$ и $S^{6+} \leftrightarrow S^{2-}$ в техногенно засоленных почвах. В этих почвах обнаружены бактерии родов *Acidocella* и *Acidophilium*, способные катализировать восстановление железа в кислой среде. В образцах из более глубоких слоёв почв преобладали анаэробные бактерии рода *Shewanella*, способные к восстановлению железа и марганца, денитрификации, и, соответственно, к продукции сульфидов. Повсеместно в почвах присутствовали представители разных родов железо- и сероокисляющих бактерий [Хайрулина и др., 2022].

Экологические риски, связанные с появлением резкокислых аллювиальных солончаковых почв в Прикамье, еще не получили необходимой оценки. Исследования в разных регионах мира показали, что образование серной кислоты в результате окисления сульфидов сопровождается подкислением грунтовых и поверхностных вод, гибелью растительности, рыб и других водных организмов, разрушением бетонных и стальных конструкций [Sohlenius et al, 2002; Rosicky et al, 2004; Nordmyr et al, 2008; Ljung et al, 2009; Poch et al, 2009]. В результате сернокислого гидролиза минералов происходит мобилизация железа, алюминия, тяжелых металлов и металлоидов (в том числе, мышьяка). Из мобилизованных веществ могут формироваться новые минералы; по мнению D.S. Fanning с коллегами [Fanning et al, 2017] образование железистых, а также, кремнистых горизонтов и корок в результате сернокислого выветривания минералов требует дальнейшего изучения.

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

Засоленность почв требует постоянного контроля на основе мониторинга, особенно в условиях глобальной аридизации климата [Панкова, Горохова, 2020].

На Верхнекамском месторождении солей для ограничения миграции солевых потоков вокруг промышленных площадок и шламохранилищ делают обваловку из тяжелых грунтов. На территории солеотвалов переводят поверхностный сток рассолов в подземный сток путем устройства скважин до уровня водоносных горизонтов. Однако эти мероприятия не устраняют проблему загрузки минерализованных вод в долины рек и развитие техногенного галогенеза.

Площади солончаковых почв в долинах малых рек Прикамья рассчитаны при помощи программы ArcMap 10.5. Контурные засоленных почв

выделялись на космоснимках на основе визуального дешифрирования и полевых проверок.

Для визуального дешифрирования контуров аллювиальных солончаковых почв и солончаков вторичных использовались летние космоснимки в комбинации спектральных каналов «естественные цвета». В такой комбинации объекты земной поверхности выглядят похожими на то, как они воспринимаются человеческим глазом. Летние космоснимки обладают наилучшими дешифровочными свойствами, поскольку синтез естественных цветов малопригоден для отделения открытой почвы и сухой растительности, которой бывает много в весенние и осенние периоды [Симакова, 1959; Конюшкова, 2014].

На космических снимках долин трех малых рек, расположенных в зонах стока подземных минерализованных вод от солеотвалов и шламохранилищ, на основе визуального дешифрирования выявлялись участки с изменением растительного покрова. В качестве дешифровочного признака для выявления контуров техногенно засоленных почв использовался цвет изображения (синтез естественных цветов), позволяющий отличить участки почв, занятых растительностью, от участков почв, лишенных растительного покрова. В синтезе естественных цветов участки, занятые растительностью, отображаются различными оттенками зеленого, а на открытые участки почв указывают различные оттенки серого. При этом оттенки серого цвета зависят от влажности почвы, наличия или отсутствия железистых корок и содержания органического вещества [Кравцова, 2005].

В летний период 2018-2022 гг. были проведены маршрутные исследования речных долин. Установлено, что выделяющиеся на космоснимках участки поверхности с оттенками зеленого цвета действительно покрыты луговой или лугово-болотной растительностью. Участки поверхности с оттенками серого цвета либо почти лишены растительности, либо имеют низкое проективное покрытие с

доминированием 1-5 видов солеустойчивой и солелюбивой растительности – бескильницы расставленной, лебеды простертой, торичника солончакового и др. Почвенные исследования показали, что растительность деградирует на солончаковых почвах и солончаках вторичных (см. разделы 3.3.1-3.3.3).

Согласно открытым источникам, рудник БКПРУ-4 функционирует с 1986 г. Под воздействием рассолов, сформированных на территории солеотвала БКПРУ-4 и поступающих в подземные воды, в долине малой р. Быгель образовался участок с аллювиальными солончаковыми почвами. Расстояние от солеотвала БКПРУ-4 до исследованного участка составляет около 800 м, средний уклон поверхности около 4%. В результате анализа исторических космоснимков, было выяснено, что пятно с изреженным травяным покровом появилось в период с 2011 по 2013 гг. (рисунок 39); в 2020 г. его площадь составила 2027 м².



А

Б

Рисунок 39 – Внешний вид участка с аллювиальными солончаковыми почвами в долине р. Быгель на космоснимках 2011 г. (А) и 2013 г. (Б)

Долина р. Черная находится под воздействием солеотвала БКПРУ-3, формирование которого началось после запуска рудника в 1973 г. По нашим расчетам площадь долины р. Черная составляет около 30,6 га. В 2015 г. отчетливые признаки формирования аллювиальных солончаковых почв и вторичных солончаков под изреженным растительным покровом прослежены на площади 4,9 га, что составляет около 16% территории речной долины (рисунок 40). В 2021 г. площадь солончаковых почв и вторичных солончаков в речной долине составила 8,7 га или 28% от общей площади речной долины. Таким образом, в период с 2015 по 2021 г. площадь засоленных почв в долине р. Черная увеличилась в 1,8 раза; ежегодно она возрастала в среднем на 0,63 га.

Ареалы солончаковых аллювиальных почв встречаются по всей долине реки, даже вблизи впадения р. Черная в р. Волим на расстоянии 1700 м от солеотвала. Участки под изреженной растительностью на солончаковых почвах чередуются с участками, густо заросшими луговой и лугово-болотной растительностью. Как было показано выше (см. раздел 3.3.2), аллювиальные почвы на таких участках также являются солончаковыми средне- и сильнозасоленными. По нашему мнению, в настоящее время все аллювиальные почвы долины р. Черная на площади 30,6 га содержат некоторое количество техногенных солей.

По нашим расчетам площадь долины р. Ленва составляет около 179,5 га. В обследованной нами части речной долины аллювиальные солончаковые почвы и солончаки вторичные под изреженной растительностью в 2015 г. занимали около 14 га (7,8% долины). В 2021 г. общая площадь аллювиальных солончаковых почв и вторичных солончаков выросла до 22,2 га, что составляет 12,4% площади речной долины (рисунки 41-42). Из этого следует, что за период 2015-2021 гг. площадь солончаковых почв и солончаков вторичных в долине р. Ленва увеличилась в 1,6 раза. Ежегодно техногенно засоленные почвы занимали дополнительно в среднем 1,37 га.

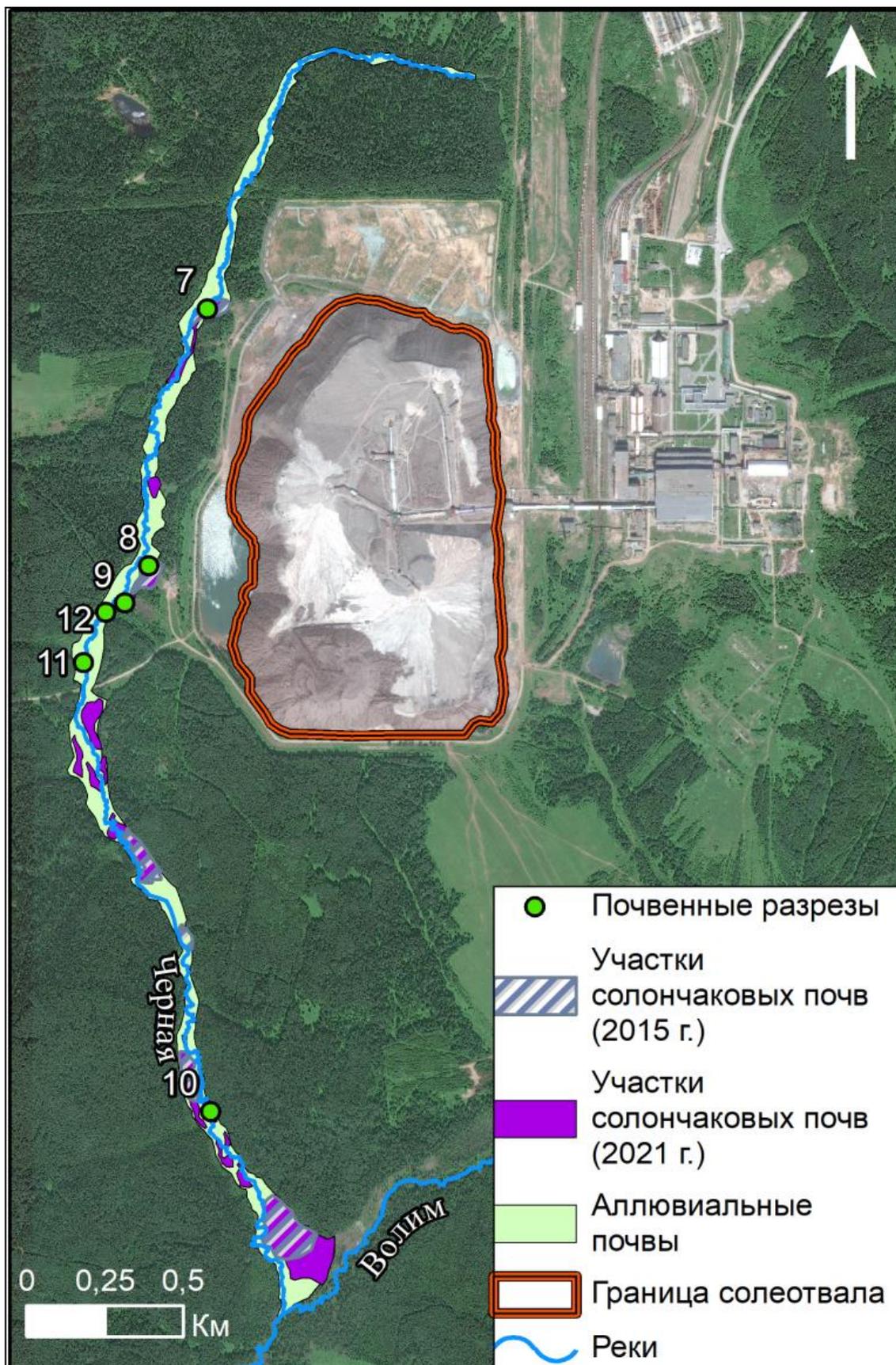


Рисунок 40 – Картограмма расположения аллювиальных солончаковых почв и солончаков вторичных в долине р. Черная в 2015 г. и 2021 г.

Таким образом, наши исследования показали, что процесс солончакового почвообразования в долинах малых рек прогрессирует при современных технологиях складирования солевых отходов хлоридно-натриевого состава. Е.А. Хайрулиной [2022] предложено для снижения водопроницаемости основания солеотвалов использовать метод тампонирования горных пород путем направленной кристаллизации сульфата кальция. В солевых отходах присутствуют сульфаты, наши исследования показали, что со временем во вторично засоленных почвах образуется гипс. По-видимому, осаждение гипса происходит в почвогрунтах возле площадок для складирования отходов, и этот процесс не предотвратил миграцию солей с природными водами.

В настоящее время под солеотвалами и шламоохранилищами занято около 1 тыс. га, с учетом развития калийного производства их площади могут достигнуть 2-3 тыс. га [Бобошко, Бачурин, 2004]. Предотвратить водную миграцию техногенных солей в условиях гумидного климата можно лишь путем устранения отходов калийного производства (например, захоронение за пределы зоны свободного водообмена с поверхностью) или их переработки (например, производство поваренной соли после извлечения остаточного количества других солей).

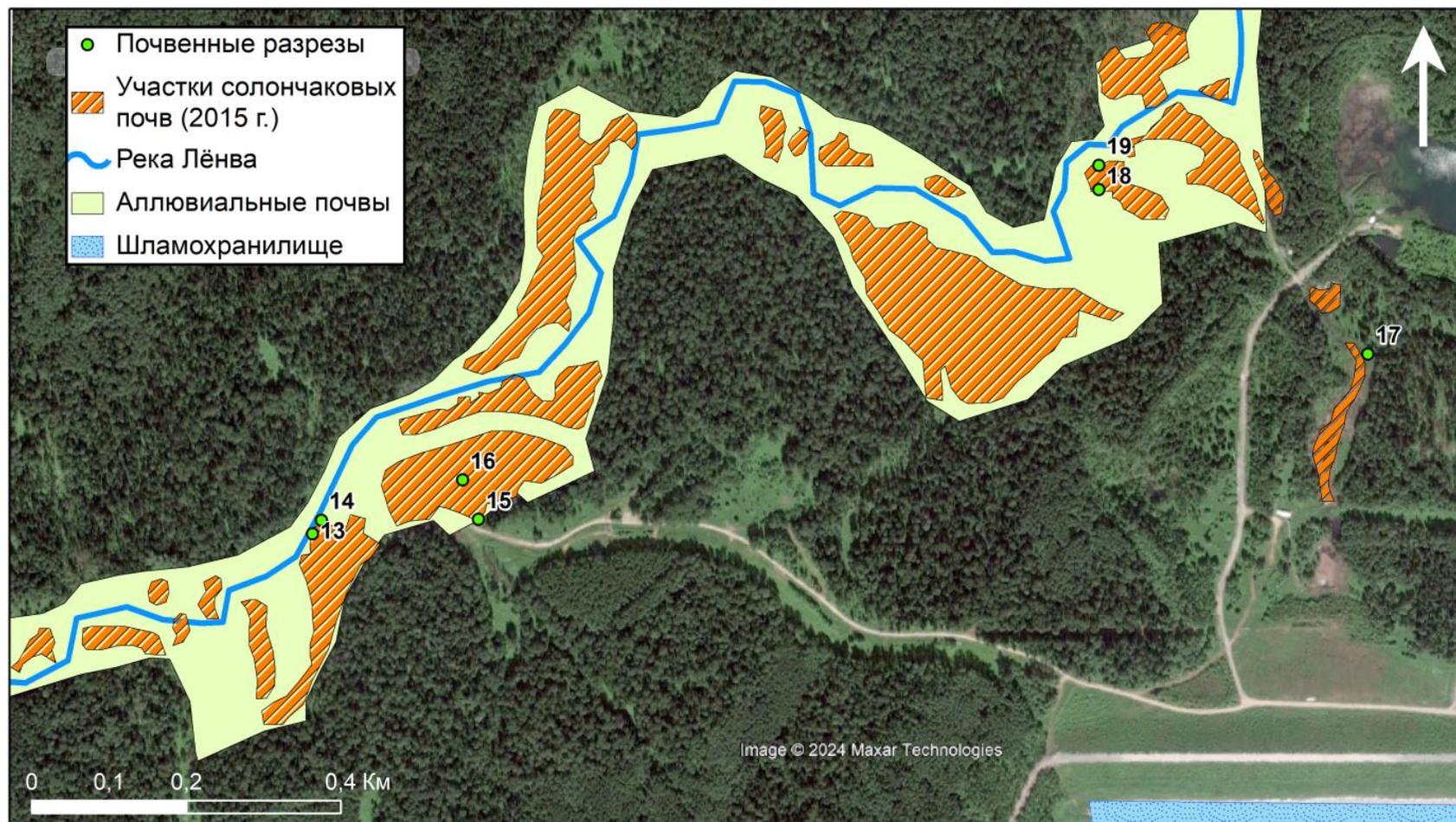


Рисунок 41 – Картосхема расположения аллювиальных солончаковых почв и солончаков вторичных в долине р. Ленва в 2015 г.

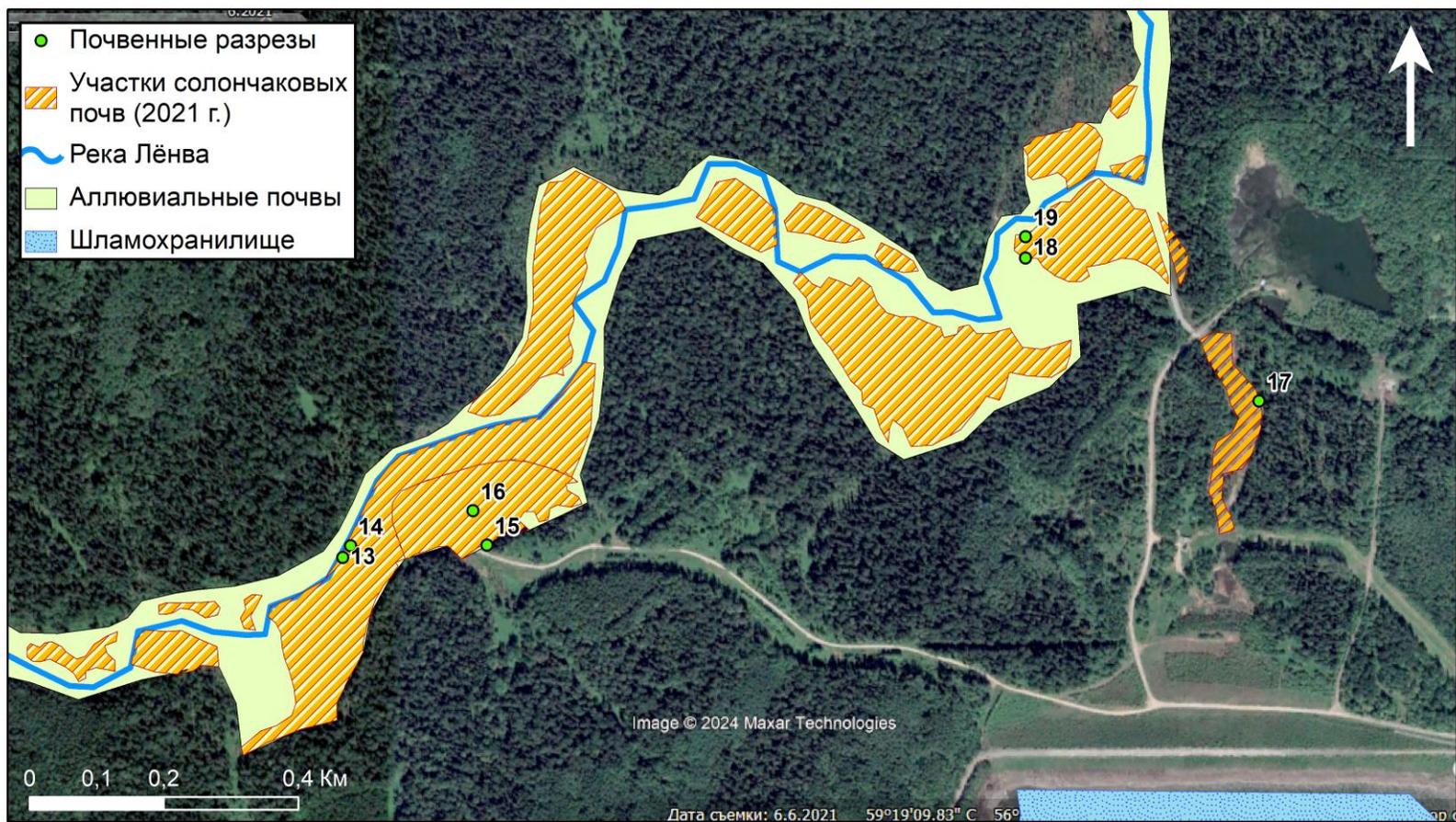


Рисунок 42 – Картосхема расположения аллювиальных солончаковых почв и солончаков вторичных в долине р. Ленва в 2021 г.

3.6 Галогенез аллювиальных почв возле рассолоподъемных скважин

XVI в.

В долине р. Усолка, близ села Усть-Игум, на месте бывшего Яйвинского острожка, из старых рассолоподъемных скважин, функционирующих, по мнению археологов, с XVI в., изливаются соленые ручьи, по берегам которых произрастает солерос солончаковый (*Salicornia perennans* Willd.). Установлено, что минерализация изливающихся вод, составляла 30-35 г/л (табл. 9), что, согласно критериям [Овчинников, 1970], позволяет отнести их к категории вод с повышенной соленостью. Согласно А.И. Перельману [1982] минерализованные воды относятся к классу нейтральных и слабощелочных.

Таблица 9 – Содержание ионов в водах, изливающихся из рассолоподъемных скважин долины р. Усолка, ммоль(экв)/л

№ скважины	рН	М*, г/л	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
1	7,8	35,3	58,6	14,6	480,0	0,3	468,8	69,2	16,7
2	7,8	30,1	56,4	14,4	420,9	0,3	410,4	65,0	19,2

Примечание: * – минерализация.

Химизм вод был хлоридно-натриевым, на долю сульфат-ионов приходилось около 13% от суммы анионов. Содержание калия было очень низким в связи с тем, что рассолоподъемные скважины находятся за пределами месторождения калийных солей (рис. 43).

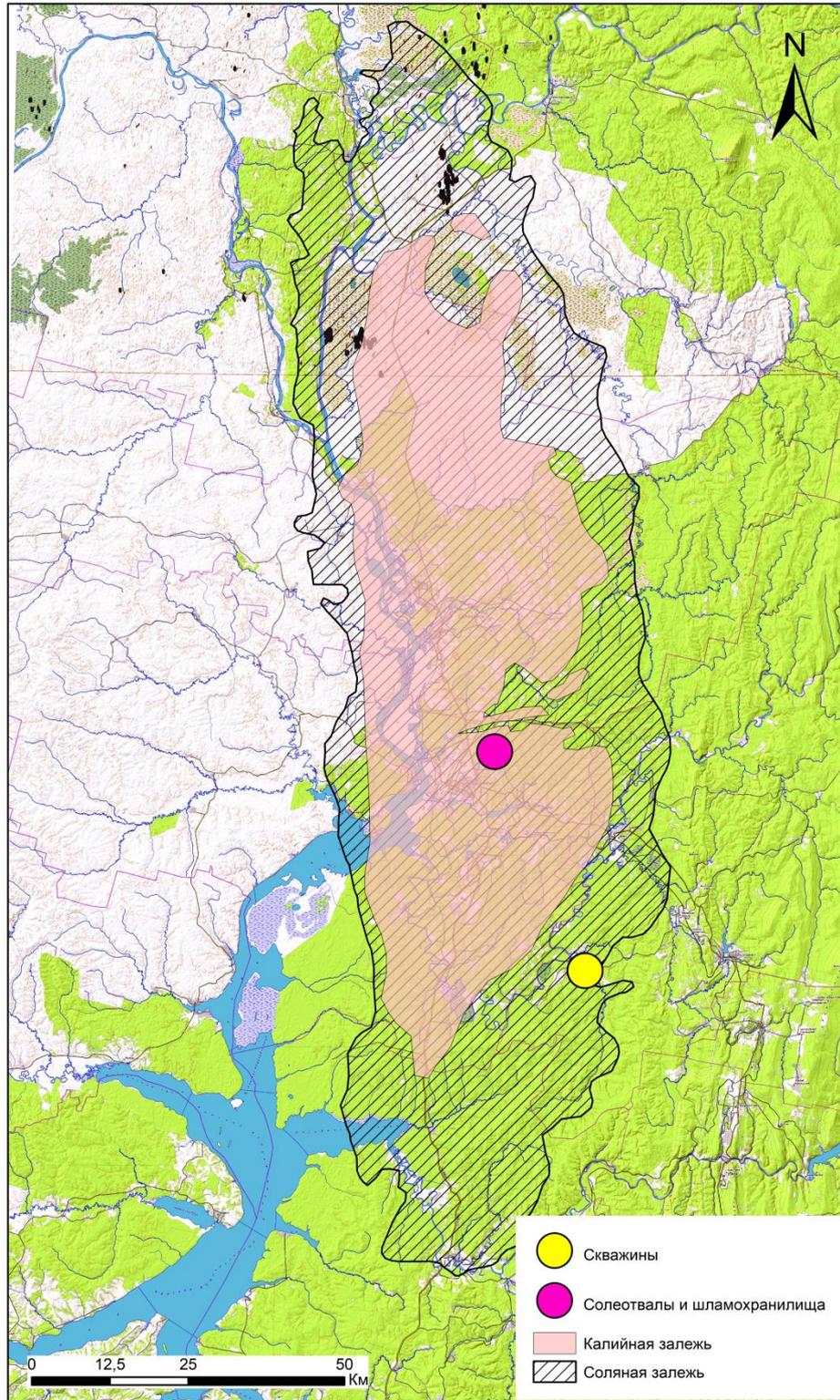


Рисунок 43 – Расположение рассолоподъемных скважин, солеотвалов и шламохранилищ в границах калийной и соляной залежей [Кудряшов, 2013 с изменениями]

Таким образом, почвы в долине р. Усолка в течение нескольких столетий испытывают воздействие минерализованных хлоридно-натриевых вод. Эти уникальные объекты антропогенного галогенеза использованы нами в качестве прогнозных моделей аномального почвообразования в долинах малых рек южной тайги [Eremchenko et al., 2022].

На расстоянии 3-5 м от русла р. Усолка, в которую изливаются воды из рассолоподъемных скважин, под лугово-болотной растительностью заложены три разреза на аллювиальных серогумусовых глееватых солончаковых почвах. Разрезы 1 и 2 расположены на расстоянии 20-25 м от рассолоподъемной скважины 1 и на расстоянии 8-12 м от скважины 2. Разрез 3 находился на расстоянии около 70 м от скважин. Почвенно-грунтовые воды в разрезах залегали на глубине 90-100 см. Морфологический облик почв представлен на рисунках 44-46.

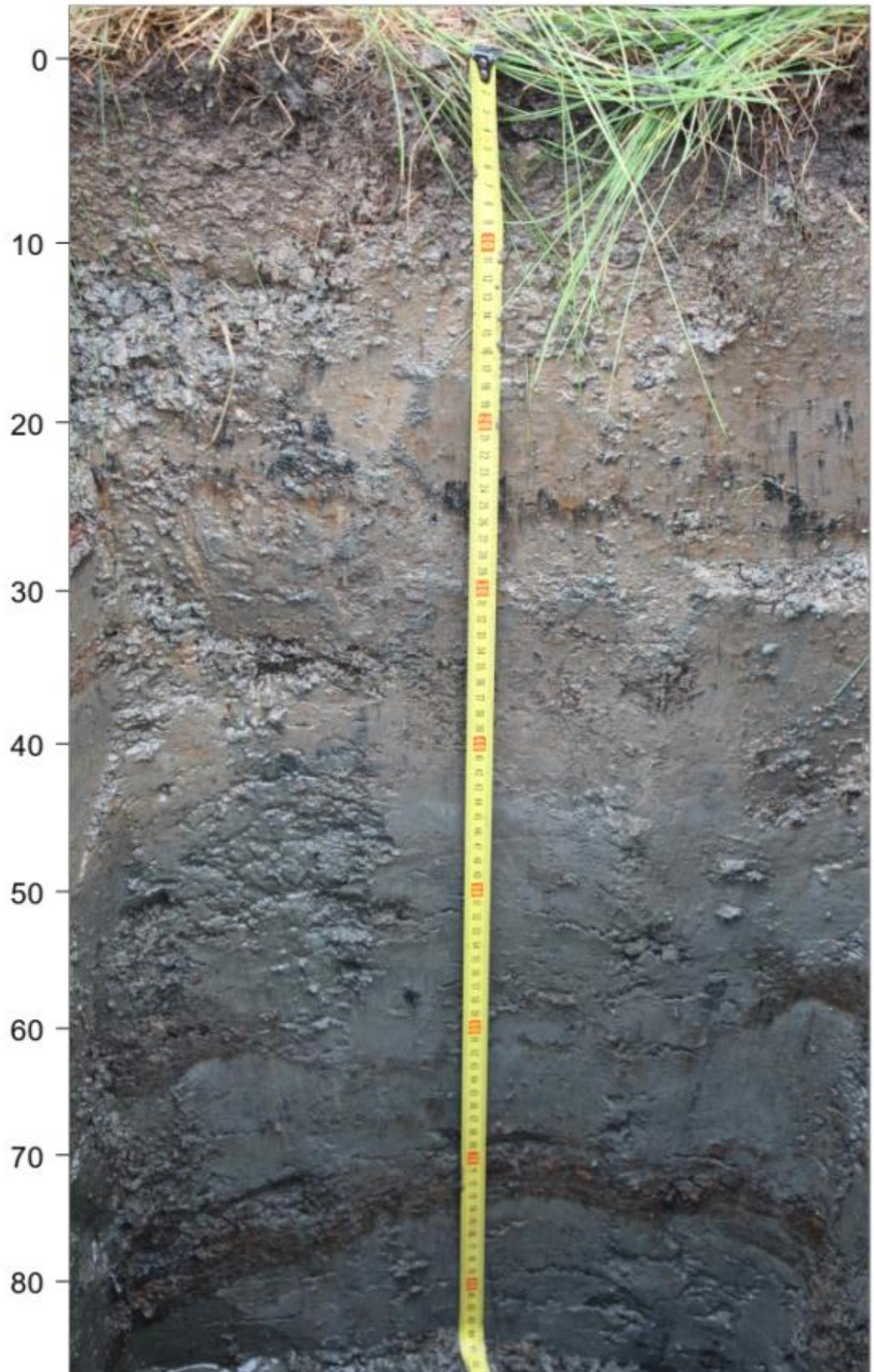


Рисунок 44 – Аллювиальная серогумусовая поверхностно глееватая солончаковая почва в долине р. Усолка (разрез 1)

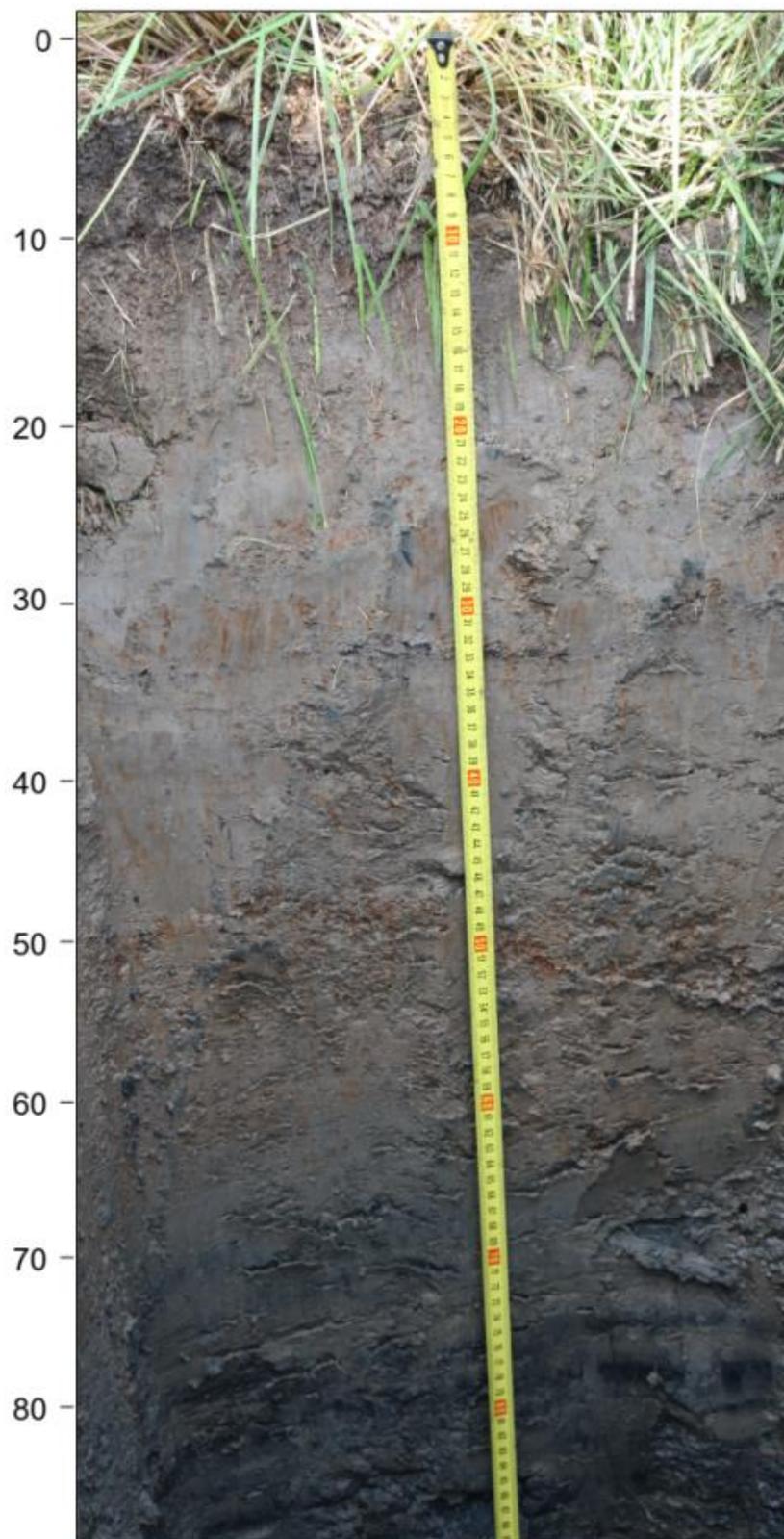


Рисунок 45 – Аллювиальная серогумусовая поверхностно глееватая солончаковая почва в долине р. Усолка (разрез 2)

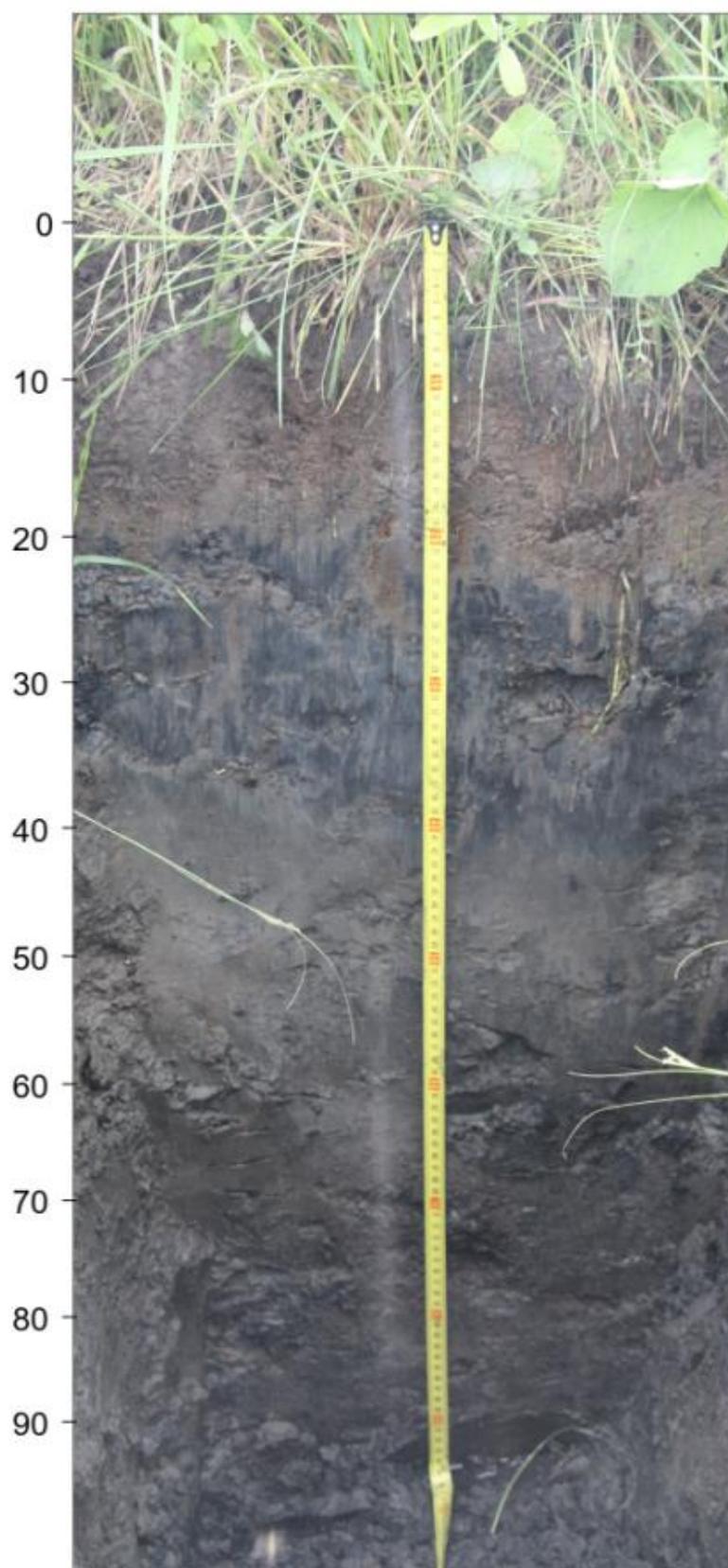


Рисунок 46 – Аллювиальная серогумусовая поверхностно глееватая солончаковая почва в долине р. Усолка (разрез 3)

Почва из разреза № 1 (рис. 44) имела следующее морфологическое строение:

A_{Ys,g} – серогумусовый глееватый горизонт, 0-15/15 см, густо переплетен корнями, бесструктурный, темно-бурый, сырой, тяжелосуглинистый, переход постепенный.

A_{Y/Cs,g} – переходный глееватый горизонт, 15-43/28 см, серовато-бурый, сырой, слоистый, тяжелосуглинистый, встречаются единичные корни растений, на глубине 24-25 см обнаруживаются включения углей и битого кирпича, с глубины 25 см присутствует обилие ржавых примазок, переход постепенный.

CG_s[~] – почвообразующая глеевая порода, 43-84/41 см, сизая, сырая, слоистая, липкая, мажется, глинистая, с запахом сероводорода, на глубине 69-74 см присутствует гниющая древесина, с глубины 85-90 см сочится вода.

Почва из разреза № 2 (рис. 45) имела следующее морфологическое строение:

A_{Ys,g} – серогумусовый глееватый горизонт, 0-20/20 см, густо переплетен корнями растений, бесструктурный, темно-бурый, влажный, тяжелосуглинистый, переход постепенный.

A_{Y/Cs,g} – переходный глееватый горизонт, 20-60/40 см, корни растений единичные, серовато-бурый, вязкий, слоистый, влажный, тяжелосуглинистый, на глубине 45-60 см имеется слой менее вязкий, более рыхлый с обилием рыжих полосок и пятен, переход постепенный.

CG_s[~] – почвообразующая глеевая глинистая порода, 60-101/41 см, сизовато-бурая с черными полосами, проявляется тенденция к горизонтальному расслоению, с глубины 90-100 см сочится вода.

Почва из разреза № 3 (рис. 46) имела следующее морфологическое строение:

A_{Ys,g} – серогумусовый глееватый горизонт, 0-22/22 см, темно-бурый, структура порошистая, густо переплетен корнями растений, суглинистый, влажный, переход постепенный

AУ/Cs,g – переходный глееватый горизонт, 22-40/18 см, буровато-серый, в верхней части с черными полосами, ржавыми и сизоватыми прожилками и пятнами, в верхней части встречались корни растений, ниже корни были единичны, суглинистый, сильно увлажнен, прослеживалась горизонтальная делимость, обнаруживались включения битого кирпича, переход постепенный.

CGs[~] – почвообразующая глеевая порода, 40-95/50 см, темно-серо-бурая, липкая, бесструктурная, суглинистая, на глубине 90-95 см отмечены округлые стяжения мелкокристаллического гипса, с глубины 85-90 см сочилась вода.

На расстоянии около двух метров от слияния двух соленых ручьев, которые берут начало из рассолоподъемных скважин, был описан солончак вторичный по аллювиальной серогумусовой поверхностно оглеенной почве (разрез № 4):

S/AУg – солончаковый глееватый горизонт, 0-43/43 см; неоднородной окраски: до глубины 12 см светло-коричнево-бурый с ржавыми примазками, глинистый; в целом бесструктурный, местами со слабо намечающейся комковатой структурой; ниже – сизовато-бурый с рыжими пятнами, пестрый, глинистый, бесструктурный; с глубины 26 см – буровато-сизого оттенка с намечающейся пластинчатостью; ниже 27 см – рыжие пятна отсутствуют; червоточин мало, встречаются угольки.

Gs – глеевый горизонт, 43-95/52 см, темно-серо-сизый, с намечающейся призматичностью; на глубине 80-90 см находилась гниющая древесина, встречались камни.

CGs – почвообразующая глеевая порода, залегает с глубины 95 см, светло-серая и голубовато-сизая; влажноватая, бесструктурная, глинистая, мажущаяся, пластичная, уплотненная, с запахом сероводорода.

Вскипание почв обнаружено только после высушивания проб, глубина вскипания: от поверхности (разрез 1 и 4), на уровне 24-34 см (разрез 3) и 45-

55 см (разрез 2). Новообразования легкорастворимых солей не обнаруживались в почвенных профилях в связи с высокой влажностью почв.

Появление карбонатов в аллювиальных почвах, по-видимому, обусловлено дополнительным поступлением кальция с минерализованными водами. Соединение Ca^{2+} с CO_2 биохимического происхождения приводит к появлению карбонатов в твердой фазе почв [Глазовская, 1981; Почвообразовательные процессы, 2006].

Присутствие запаха сероводорода (разрез 1) и черной окраски (разрезы 2 и 3) в аллювиальных почвах позволяют утверждать, что в почвенном профиле развиваются процессы восстановления сульфатов до H_2S и образования сульфидов [Перельман 1966; Глазовская, 2007; Rabenhorst et al, 2012].

В водной вытяжке из аллювиальных почв (рис. 47, приложение Д) среди анионов меньше всего гидрокарбонатов (0,8-1,7 ммоль(экв)/100 г); содержание Cl^- и SO_4^{2-} было относительно равным, при некотором превышении количества хлорид-ионов. Среди катионов, как правило, преобладал Na^+ ; за ним следовал Ca^{2+} ; содержание Ca^{2+} было максимальным (12 ммоль(экв)/100 г) в породе, содержащей новообразования гипса (разрез 3). В наименьшем количестве в водной вытяжке присутствовал K^+ (0,1-0,5 ммоль(экв)/100 г). Химизм засоления большинства почв по соотношению катионов – натриевый, по соотношению анионов – сульфатно-хлоридный [Eremchenko, Pakhorukov, Shestakov, 2020].

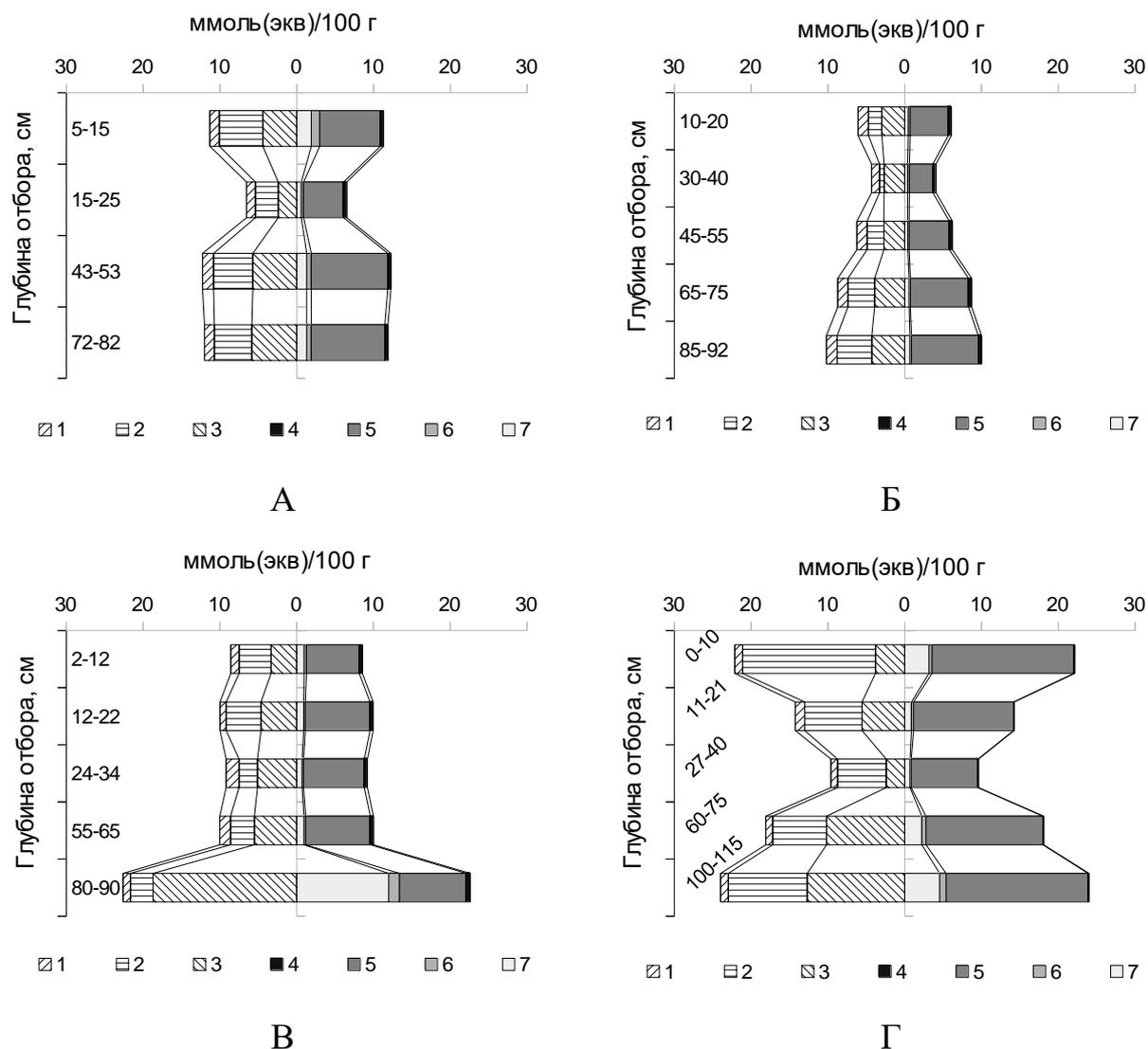


Рисунок 47 – Содержание ионов (1 – HCO_3^- ; 2 – Cl^- ; 3 – SO_4^{2-} ; 4 – K^+ ; 5 – Na^+ ; 6 – Mg^{2+} ; 7 – Ca^{2+}) в водных вытяжках из аллювиальных почв в долине р. Усолка: А – разрез 1, Б – разрез 2, В – разрез 3, Г – разрез 4

Аллювиальные почвы в долине р. Усолка содержат легкорастворимые соли в токсичных количествах (приложение Д), в том числе в серогумусовом горизонте – 0,31-0,56%. В соответствии с классификацией [Классификация и диагностика почв..., 2004], они солончаковые, по сумме токсичных солей характеризуются средней и сильной степенью засоления. Как правило, несколько повышенное количество солей отмечено в нижней водонасыщенной части профиля, особенно в разрезе 3 [Eremchenko, Pakhorukov, Shestakov, 2020].

Методом связывания водорастворимых ионов в гипотетические соли [по: Мякина, Аринушкина, 1979] в почвах долины р. Усолка было установлено преобладание хлоридов натрия, а также сульфатов кальция и натрия.

Почвы характеризуются нейтральной и слабощелочной реакцией среды (табл. 10). Содержание органического углерода низкое, в серогумусовом горизонте – 1,5-1,8%. Емкость катионного обмена составляла 17-23 ммоль(экв)/100 г почвы. В составе обменных катионов больше всего Ca^{2+} ; доля Na^+ в гумусовом горизонте колебалась в пределах 33-41%. Соответственно по его содержанию почвы являются многонатриевыми [Еремченко, Ракхорукон, Shestakov, 2020]. Все горизонты почв содержали небольшое количество карбонатов (1-2,9% CO_2). Согласно ГОСТ Р 70229-2022 при содержании $\text{CaCO}_3 > 2\%$ почвы являются карбонатными, по этому критерию солончак вторичный и солончаковые почвы являются карбонатными.

Гипс присутствовал во всех горизонтах аллювиальных почв в количестве 1-3%, только при наличии гипсовых стяжений в солончаке его содержание возросло до 11% (табл. 10). Сульфатно-хлоридный натриевый химизм и присутствие гипса в почвах долины р. Усока в определенной степени соответствуют природным закономерностям. В засоленных гипсодержащих почвах РФ химизм засоления преимущественно сульфатный с гипсом, реже хлоридно-сульфатный с гипсом, еще реже хлоридный с гипсом [Черноусенко, Хитров, 2023].

Таблица 10 – Физико-химические и химические свойства вторично засоленных почв в долине реки Усолка

№ разреза	Глубина, см	C _{орг} , %	pH _{вод}	pH _{сол}	Обменные катионы, ммоль(экв)/100 г				ЕКО, ммоль(экв)/100 г	%	
					Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺		CO ₂ карб.	Гипс
1	5-15	1,8	7,7	7,2	12,08	1,88	8,66	0,27	22,89	2,57	2,92
	15-25	0,67	8,2	7,5	9,64	1,48	8,17	0,45	19,74	2,18	2,45
	43-53	-	7,7	7,3	8,08	1,68	8,94	0,66	19,36	1,98	0,99
	72-82	-	7,5	7,5	7,64	1,68	8,94	0,41	18,67	1,19	1,76
2	10-20	1,67	7,2	6,8	9,92	1,92	8,66	0,45	20,95	1,09	1,72
	30-40	0,49	7,8	6,9	9,52	1,36	7,69	0,45	19,02	0,79	1,25
	45-55	-	8,1	7,3	10,76	1,36	7,93	0,31	20,36	0,99	2,24
	65-75	-	7,9	7,4	9,44	1,60	9,15	0,45	20,64	1,19	2,41
	85-92	-	7,8	7,5	-	-	-	-	-	1,39	2,67
3	2-12	1,51	7,2	6,7	13,52	1,60	7,69	0,41	23,22	0,99	2,97
	12-22	1,28	6,8	6,5	11,12	1,48	9,04	0,48	22,12	0,89	2,92
	24-34	-	7,4	7,1	8,56	0,92	9,04	0,66	19,18	1,39	1,81
	55-65	-	7,7	7,5	9,32	0,96	9,04	0,66	19,98	1,19	2,11
	80-90	-	7,2	7,3	-	-	-	-	-	1,19	11,09
4	0-10	1,77	7,9	7,32	12,95	2,02	7,78	0,31	23,06	2,90	1,99
	11-21	0,69	8,1	7,22	10,12	1,96	6,78	0,27	19,71	2,60	1,14
	27-40	-	8,2	7,29	8,49	1,71	6,40	0,32	17,31	2,12	2,08
	60-75	-	7,6	7,11	-	-	-	-	-	1,62	1,97
	100-115	-	7,5	7,06	-	-	-	-	-	2,70	3,47

Примечание: (-) – не определялось.

Почвы долины р. Усолка в течение нескольких столетий находились под воздействием хлоридно-натриевых вод. Известно, что сульфат-ионы менее подвижны, по сравнению с хлорид-ионами. Сульфаты задерживаются почвой, как в виде гипса, так и в виде $MgSO_4$ и Na_2SO_4 [Перельман, 1966; Перельман, Касимов, 1999; Мохаммади, 2022; Елизаров и др., 2023, Попов, Елизаров, 2023]. Поэтому в наших аллювиальных почвах на хлоридных грунтовых водах сформировались сульфатно-хлоридные почвы. Сульфат-ионы связывались с кальцием, так постепенно в почвах долины р. Усолка появился гипс.

Исследуемые солончаковые почвы долины р. Усолка диагностировали по изученным показателям – до рода и вида [Классификация и диагностика почв..., 2004], а также в соответствии с мировой корреляционной базой почвенных ресурсов [WRB, 2022]:

разрез 1 – аллювиальная серогумусовая поверхностно глееватая солончаковая сильнозасоленная сульфатно-хлоридная натриевая насыщенная многонатриевая карбонатная гипсодержащая почва; Sodic Gleyic Fluvisols (Loamic, Salic);

разрез 2 – аллювиальная серогумусовая поверхностно глееватая солончаковая сильнозасоленная хлоридная натриевая насыщенная многонатриевая карбонатная гипсодержащая почва; Sodic Gleyic Fluvisols (Loamic, Salic);

разрез 3 – аллювиальная серогумусовая поверхностно глееватая солончаковая сильнозасоленная сульфатно-хлоридная натриевая насыщенная многонатриевая карбонатная гипсодержащая почва; Gypsic Sodic Gleyic Fluvisols (Loamic, Salic);

разрез 4 – солончак вторичный сульфатно-хлоридный натриевый насыщенный средненатриевый карбонатный гипсодержащий по аллювиальной серогумусовой поверхностно глееватой почве; Sodic Fluvic Gleyic Solonchak (Loamic, Hypersalic).

В целом результаты по изучению почв долины р. Усолка продемонстрировали направленность эволюционных изменений аллювиальных почв под постоянным воздействием минерализованных вод в условиях гумидного климата. Вторично засоленные аллювиальные почвы характеризовались солончаковостью, хлоридно-сульфатным натриевым химизмом, нейтрально-слабощелочной реакцией почвенной среды. Они многонатриевые (по количеству обменного натрия), содержали карбонаты и гипс в количестве нескольких процентов. В почвообразующей породе (на глубине около 90 см отмечено новообразование гипса в виде округлых мелкокристаллических стяжений. Солончак вторичный по аллювиальной серогумусовой глеевой почве отличился максимальным содержанием хлоридов натрия в серогумусовом горизонте.

3.7. Классификация техногенно засоленных аллювиальных почв

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

Согласно WRB [2022] чрезвычайно кислый подповерхностный горизонт мощностью ≥ 15 см с $pH < 4$, в котором серная кислота образуется в результате окисления сульфидов, получил название Thionic – тионовый горизонт. В перечне диагностических горизонтов почв России горизонт Thionic отсутствует [Классификация и диагностика..., 2004; Хитров, 2021]. При появлении резкокислой реакции почвенной среды ($pH \leq 3-4$), обусловленной окислением сульфидов техногенного происхождения,

считаем целесообразным рекомендовать дополнительный квалификатор Thionictechnic к использованию в названии почв.

По WRB [2022] при содержании обменного натрия (более 15% от ЕКО) в названии почвы используют квалификатор Sodic, поскольку высокая насыщенность натрием характерна для почв содового химизма засоления. В природе гидролиз соды (Na_2CO_3 , NaHCO_3) обуславливает щелочную реакцию растворов и особые характеристики щелочных засоленных почв [Воробьева, Панкова, 2008]. В долинах малых рек Прикамья отличительной особенностью аллювиальных солончаковых почв с резко кислой реакцией среды является сочетание сильной ненасыщенности основаниями и содержание обменного натрия более 15% ЕКО, что делает не логичным использование в их названии квалификатора Sodic.

По современной классификации почв России [Классификация и диагностика..., 2004] и в соответствии с нашими предложениями по введению дополнительных квалификаторов в WRB [2022] изученные техногенно засоленные почвы долин рек Быгель, Черная, Ленва получили следующие названия.

Аллювиальная серогумусовая поверхностно оглеенная солончаковая (очень)сильнозасоленная хлоридная (или сульфатно-хлоридная) натриевая (или натриево-калиевая) насыщенная много(средне)натриевая карбонатная гипсодержащая почва – Salictechnic Chloridictechnic Gypsirictechnic Sodictechnic Gleyic Fluvisols (Loamic).

Аллювиальная серогумусовая поверхностно оглеенная солончаковая (очень)сильнозасоленная хлоридная натриевая (или кальциево-натриевая) ненасыщенная средне(мало)натриевая гипсодержащая почва – Salictechnic Chloridictechnic Gypsirictechnic Thionictechnic Gleyic Fluvisols (Loamic).

Солончак вторичный сульфатно-хлоридный натриевый насыщенный средненатриевый карбонатный гипсодержащий по аллювиальной серогумусовой поверхностно оглеенной почве – Salictechnic Chloridictechnic Gypsirictechnic Sodictechnic Fluvic Gleyic Solonchak (Loamic).

Солончак вторичный сульфидный (соровый) сульфатно-хлоридный натриево-кальциевый гипсодержащий ненасыщенный средненатриевый; Salictechnic Fluvic Gypsirictechnic Sodicttechnic Gleyic Solonchak (Loamic, Chloridicttechnic, Ochric, Sulfidic).

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 Na^+ и 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 рН) 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.

Список литературы

1. Азовцева, Н.А. Динамика физических и физико-химических свойств городских почв при использовании солевых противогололедных средств / Н.А. Азовцева, А.В. Смагин // Почвоведение. – 2018. – № 1. – С. 118-128.
2. Ананьев, Г.С. Геоморфологическое районирование СССР и прилегающих морей: Учебное пособие / Г.С. Ананьев, Т.С. Андреева, С.И. Варущенко, С.С. Воскресенский, О.К. Леонтьев, С.А. Лукьянова, И.И. Спасская, А.И. Спиридонов, Н.С. Ульянова – М. : Высшая школа, 1980. – 530 с.
3. Аринушкина, Е.В. Руководство по химическому анализу почв / Е.В. Аринушкина – Изд-во : МНУ, 1970. – 488 с.
4. Аюшина, Т.А. Засоленные почвы южной окраины северной Азии: разнообразие и особенности природопользования / Т.А. Аюшина, В.И. Убугунова, Ц.Н. Насатуева // Проблемы региональной экологии. – 2018. – № 6. – С. 129-132.
5. Базилевич, Н.И. Лесостепные солоды / Н.И. Базилевич – М. : Наука, 1965. – 97 с.
6. Белкин, В.В. Мониторинг геологической среды в процессе разработки калийных месторождений / В.В. Белкин // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2008. – № 1. – С. 49-59.
7. Бобошко, А.Ю. Экологические проблемы верхнекамского калия / А.Ю. Бобошко, Б.А. Бачурин // Горное эхо. – 2004. – №4. – С. 26-30.
8. Борисевич, Д.В. Рельеф и геологическое строение / Д.В. Борисевич – М. : Урал и Приуралье., 1968. – С. 19-70.
9. Бреслер, Э. Солончаки и солонцы / Э. Бреслер, Б.Л. Макнил, Д.Л. Картер – Л. : Гидрометеиздат, 1987. – 286 с.
10. Власов, М.Н. Эколого-геохимическое состояние городских аллювиальных почв пойм малых рек (на примере г. Перми) :

- специальность 03.02.13 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Власов Михаил Николаевич; Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова – Пермь, 2021. 23 с.
11. Водяницкий, Ю.Н. Диагностика переувлажненных минеральных почв / Ю.Н. Водяницкий – М. : ГНУ Почвенный институт им. В. В. Докучаева РАСХН, 2008. – 81 с.
12. Воробьева, Л.А. Щелочные засоленные почвы России / Л.А. Воробьева, Е.И. Панкова // Почвоведение. – 2008. – № 5. – С. 517-532.
13. Гедройц, К.К. Почвенные коллоиды и поглощательная способность почв / К.К. Гедройц Избранные сочинения. В 3-х тт. Под общ. ред. Н.П. Ремезова. Т.1. – М. : Сельхозгиз, 1955. – 560 с.
14. Глазовская, М.А. Общее почвоведение и география почв / М.А. Глазовская – М. : Высшая школа, 1981. – 400 с.
15. Глазовская, М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов / М.А. Глазовская – М. : Географический ф-т МГУ, 2007. – 350 с.
16. Голубцова, А.Н. Оценка воздействия на объекты окружающей среды при строительстве шламонакопителя Усольского калийного комбината / А.Н. Голубцова, С.В. Карманова // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2015. – № 3. – С. 20-34.
17. ГОСТ 18164-72. Вода питьевая. Метод определения содержания сухого остатка = Drinking water. Method for determining the dry residue content : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 9 сентября 1972 г. № 1855 : введен впервые : дата введения 01.01.1974. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2003. – 4 с.
18. ГОСТ 23268.5-78. Воды минеральные питьевые лечебные, лечебно-столовые и природные столовые. Методы определения ионов кальция и магния = Mineral drinking therapeutic waters, therapeutic canteens and

- natural canteens. Methods for the determination of calcium and magnesium ions : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 1 сентября 1978 г. № 2409 : введен впервые : дата введения 01.01.1980. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 1984. – 15 с.
- 19.ГОСТ 23268.6-78. Воды минеральные питьевые лечебные, лечебно-столовые и природные столовые. Методы определения ионов натрия = Mineral drinking therapeutic waters, therapeutic canteens and natural canteens. Methods for the determination of sodium ions : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 1 сентября 1978 г. № 2410 : введен впервые : дата введения 01.01.1980. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 1984. – 7 с.
- 20.ГОСТ 23268.7-78. Воды минеральные питьевые лечебные, лечебно-столовые и природные столовые. Методы определения ионов калия = Mineral drinking therapeutic waters, therapeutic canteens and natural canteens. Methods for the determination of potassium ions : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 1 сентября 1978 г. № 2411 : введен впервые : дата введения 01.01.1980. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 1984. – 5 с.
- 21.ГОСТ 26212-2021. Почвы. Определение гидролитической кислотности по методу Каппена в модификации ЦИНАО = Soils. Determination of hydrolytic acidity by the Kappen method in the modification of the TSINAO : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 31 августа 2021 г. № 891-ст : введен

впервые : дата введения 01.08.2022. – Москва : Российский институт стандартизации, 2021. – 12 с.

22.ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки = Soils. Methods for determining the specific electrical conductivity, pH and dense residue of an aqueous extract : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 8 февраля 1985 г. № 283 : введен впервые : дата введения 01.01.1986. – Москва : Стандартиформ, 2011. – 6 с.

23.ГОСТ 26483-85. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее рН по методу ЦИНАО = Soils. Preparation of salt extract and determination of its pH by the TSINAO method : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 26 марта 1985 г. № 820 : введен впервые : дата введения 01.07.1986. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 1985. – 6 с.

24.ГОСТ 27821-2020 Почвы. Определение суммы поглощенных оснований по методу Каппена = Soils. Determination of the amount of absorbed bases by the Karpen method : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 6 октября 2020 г. № 749-ст : введен впервые : дата введения 01.01.2022. – Москва : Стандартиформ, 2020. – 6 с.

25.ГОСТ 31957-2012. Вода. Методы определения щелочности и массовой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов = Water. Methods for determining the alkalinity and mass concentration of carbonates and bicarbonates : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 декабря 2012 г.

- №1910-ст : введен впервые : дата введения 01.01.2014. – Москва : Стандартиформ, 2013. – 30 с.
- 26.ГОСТ 34774-2021. Вода питьевая. Вода подготовленная (исправленная) для изготовления алкогольной продукции. Определение pH потенциометрическим методом = Drinking water. Prepared (corrected) water for the manufacture of alcoholic beverages. Determination of pH by the potentiometric method : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 октября 2021 г. № 1056-ст : введен впервые : дата введения 01.01.2022. – Москва : Российский институт стандартизации, 2021. – 11 с.
- 27.ГОСТ 4245-72. Вода питьевая. Методы определения содержания хлоридов = Drinking water. Methods for determining the chloride content : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 9 октября 1972 г. № 1855 : введен впервые : дата введения 01.01.1974. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2001. – 6 с.
- 28.ГОСТ 4389-72. Вода питьевая. Методы определения содержания сульфатов = Drinking water. Methods for determining the content of sulfates : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 28 ноября 1972 г. № 2145 : введен впервые : дата введения 01.01.1974. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2003. – 9 с.
- 29.ГОСТ Р 70229-2022. Почвы. Показатели качества почв = Soils. Soil quality indicators : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 25 июля 2022 г. № 673-

ст : введен впервые : дата введения 01.01.2023. – Москва : Российский институт стандартизации, 2022. – 32 с.

30. Гришина, Л.А. Система показателей гумусного состояния почв / Л.А. Гришина, Д.С. Орлов – М : Проблемы почвоведения, 1978. – С. 42-47.
31. Добровольский, Г.В. Систематика и классификация почв (история и современное состояние) / Г.В. Добровольский, С.Я. Трофимов – М. : Изд-во МГУ, 1996. – 80 с.
32. Добровольский, Г.В. Аллювиальные почвы речных пойм и дельт и их зональные отличия / Г.В. Добровольский, П.Н. Балабко, Н.В. Стасюк, Е.П. Быкова // Аридные экосистемы. – 2011. – Т. 17. – №. 3. – С. 5-13.
33. Елизаров, Н.В. Засоление и осолонцевание почв речных долин Кулундинской равнины / Н.В. Елизаров, В.В. Попов, И.Д. Рыбкина, Б.А. Смоленцев // Почвоведение. – 2023. – №10. – С. 1216-1229.
34. Еремченко, О.З. Техногенные поверхностные образования зоны солеотвалов и адаптация к ним растений / О.З. Еремченко, О.А. Четина, М.Г. Кусакина, И.Е. Шестаков – Пермь : изд-во Пермского госуд. национ. исслед. ун-та, 2013. – 148 с.
35. Еремченко, О.З. Почвы и техногенные поверхностные образования урбанизированных территорий Пермского Прикамья / О.З. Еремченко, И.Е. Шестаков, Н.В. Москвина – Пермь : изд-во Пермского госуд. национ. исслед. ун-та, 2016. – 252 с.
36. Еремченко, О.З. Природно-техногенная организация почвенного покрова территории воздействия солеотвалов и шламохранилищ в Соликамско-Березниковском экономическом районе / О.З. Еремченко, Н.В. Митракова, И.Е. Шестаков // Вестник Пермского университета. Серия: Биология. – 2017. – №. 3. – С. 311-320.
37. Зайдельман, Ф.Р. Процесс глееобразования и его роль в формировании почв / Ф.Р. Зайдельман – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1998. – 300 с.

38. Зайдельман, Ф.Р. Морфоглеогенез, его визуальная и аналитическая диагностика / Ф.Р. Зайдельман // Почвоведение. – 2004. – №4. – С. 389-398.
39. Засоленные почвы России / Отв. редакторы Л.Л. Шишов, Е.И. Панкова – М. : ИКЦ “Академкнига”, 2006. – 854 с.
40. Иванищев, В.В. Засоление почвы и его влияние на растения / В.В. Иванищев, Т.Н. Евграшкина, О.И. Бойкова, Н.Н. Жуков // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2020. – №. 3. – С. 28-42.
41. Карта почвенно-экологического картографирования Восточно-Европейской равнины / географическая основа – 1:2 500 000, 25 км в 1 см / Под ред. Г.В. Добровольского, И.С. Урусевской – М., 1997.
42. Кауричев, И.С. Окислительно-восстановительные условия почв легкого механического состава Мещерской низменности / Кауричев И.С., Шишова В.С. // Почвоведение. – 1967. – № 75. – С. 66-78.
43. Классификация и диагностика почв СССР / В.В. Егоров и др. – М. : «Колос», 1977. – 221 с.
44. Классификация и диагностика почв России / Под ред. Г.В. Добровольского – Смоленск : Ойкумена, 2004. – 342 с.
45. Классификация и диагностика почв России – URL: <http://soils.narod.ru/index.html> (дата обращения 12.04.2023).
46. Ковда, В.А. Солончаки и солонцы / В.А. Ковда – М. : Изд-во АН СССР, 1937. – 246 с.
47. Ковда, В.А. Происхождение и режим засоленных почв / В.А. Ковда – М. : Изд-во Академии наук, 1946. – 575 с.
48. Конюшкова М.В. Цифровое картографирование почв солонцовых комплексов Северного Прикаспия / М.В. Конюшкова – М. : Товарищество научных изданий КМК, 2014. – 316 с.

49. Копылов, И.С. Геоэкология, гидрогеология и инженерная геология Пермского края / И.С. Копылов – Пермь : Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2021. – 501 с.
50. Коротаев, Н.Я. Почвы Пермской области / Н.Я. Коротаев – Пермь, 1962. – 278 с.
51. Кравцова, В.И. Космические методы исследования почв / В.И. Кравцова – М. : Аспект Пресс, 2005. – 199 с.
52. Кудряшов, А.И. Верхнекамское месторождение солей / А.И. Кудряшов – М. : ООО «РПФ» Эпсилон Плюс, 2013. – 368 с.
53. Лискова, М.Ю. Негативное воздействие, оказываемое на окружающую среду предприятиями по добыче и обогащению калийно-магниевых солей / М.Ю. Лискова // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т.16. – №1. – С.82-88.
54. Лопатовская, О.Г. Олхинские минеральные источники: химия воды и засоление почв / О.Г. Лопатовская, В.В. Тахтеев, С.Д. Лазарева, О.В. Зарубина, О.Г. Николаева // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Биология. Экология. – 2011. – № 4. – С.81-86.
55. Лопатовская, О.Г. Особенности педогалогенеза эколого-мелиоративных комплексов Западного Прибайкалья : специальность 03.02.13 : диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук / Лопатовская Ольга Геннадьевна; Иркутский государственный университет – Иркутск, 2020. – 366 с.
56. Максимович, Н.Г. Техногенные биогеохимические процессы в Пермском крае / Н.Г. Максимович, Е.А. Ворончихина и др. // Геориск. – 2010. – № 2. – С. 38-45.
57. Митракова, Н.В. Оценка биологической активности и токсичности почв и техногенных поверхностных образований в Пермском крае : специальность 03.02.08 : диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Митракова Наталья Васильевна;

Пермский государственный национальный исследовательский университет – Пермь, 2018. – 259 с.

58. Митракова, Н.В. Формирование засоленных техногенных почв в зоне влияния калийных предприятий / Н.В. Митракова, Е.А. Хайрулина // Отражение био-, гео-, антропоферных взаимодействий в почвах и почвенном покрове. Сборник материалов VII Международной научной конференции, посвященной 90-летию кафедры почвоведения и экологии почв ТГУ. Томск. – 2020. – С. 142-145.
59. Мохаммади, Ш. Агроэкологическая оценка свойств засоленных почв Ирана, района Ахмадабад Абиек : специальность 03.02.13 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Мохаммади Шима; Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева – Москва, 2022. – 19 с.
60. Молодцов, В.А. Об определении состава поглощенных оснований в засоленных почвах / В.А. Молодцов, В.П. Игнатова // Почвоведение. – 1975. – №6. – С. 123-127.
61. Молодцов, В.А. К определению карбонатов и гипса в почвах / В.А. Молодцов, Т.И. Абатурова, В.П. Игнатова // Почвоведение. – 1979. – № 6. – С. – 123-127.
62. Москвина, Н.В. Почвы и техногенные поверхностные образования многоэтажных жилых районов городов Прикамья : специальность 03.00.16 : диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Москвина Наталья Викторовна; Пермский государственный университет – Пермь, 2004. – 213 с.
63. Москвина, Н.В. Почвенный и растительный покров в долинах рек Толыч и Зырянка в условиях техногенного засоления / Н.В. Москвина, Н.А. Молганова, С.А. Овеснов // Экология и промышленность России. – 2023. – № 7. – С. 53-59.
64. Назаров, Н.Н. География Пермского края : Природная (физическая) география / Н.Н. Назаров – Пермь, 2006. – 139 с.

65. Никифорова, Е.М. Многолетняя динамика антропогенной солонцеватости почв ВАО Москвы при использовании противогололедных реагентов / Е.М. Никифорова, Н.С. Касимов, Н.Е. Кошелева // Почвоведение. – 2017. – № 1. – С. 93-104.
66. Овеснов, С.А. Местная флора. Флора Пермского края и ее анализ / С.А. Овеснов – Пермь : Изд-во Перм. гос. ун-та, 2009. – 171 с.
67. Овчинников, А.М. Гидрогеохимия / А.М. Овчинников – М. : Недра, 1970. – 200 с.
68. Оленев, А.М. Природа / А.М. Оленев, П.Л. Горчаковский // М. : Российская Федерация : Урал, 1969. – С. 19-70.
69. Панкова, Е.И. Природное и антропогенное засоление почв бассейна Аральского моря (география, генезис, эволюция) / Е.И. Панкова, И.П. Айдаров, И.А. Ямнова, А.Ф. Новикова, Н.С. Благоволин – М. : Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1996. – 186 с.
70. Панкова, Е.И. Засоленные почвы в отечественных, американской и международной почвенных классификациях / Е.И. Панкова, М.И. Герасимова, Т.В. Королюк // Почвоведение. – 2018. – №11. – С.1309-1321.
71. Панкова, Е.И. Анализ сведений о площади засоленных почв России на конец XX и начало XXI веков / Е.И. Панкова, И.Н. Горохова // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2020. – №103. – С. 5-33.
72. Парамонова, А.Е. Засоленные почвы поймы среднего течения реки Иркут: морфогенетические и агрохимические свойства / А.Е. Парамонова, В.И. Убугунова, Г.И. Черноусенко, В.Л. Убугунов, Б.Ц. Балданов, Э.Г. Цыремпилов // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. – 2017. – №2. – С. 30-38.

73. 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.
74. 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. – Р. 1–10.
75. 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. – С. 1-17.
76. Перельман, А.И. Геохимия ландшафта / А.И. Перельман – М. : Изд-во Высшая школа, 1966. – 392 с.
77. Перельман, А.И. Геохимия природных вод / А.И. Перельман – М. : Наука, 1982. – 154 с.
78. Перельман, А.И. Геохимия ландшафта / А.И. Перельман, Н.С. Касимов – М. : МГУ, 1999. – 610 с.
79. Пермская область: отрасли, регионы, города: учебно-методический материал. – Пермь, 1997. – 93 с.
80. Полевой определитель почв. – М. : Почвенный институт имени В.В. Докучаева, 2008. – 182 с.
81. Попов, В.В. Геохимические особенности засоления почв северной части кулундинской равнины / В.В. Попов, Н.В. Елизаров // Почвы и окружающая среда [Электронный ресурс] : Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 55-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН (2–6 октября 2023 г., г. Новосибирск). Новосибирск : ИПА СО РАН. – 2023. – С. 158-161.

82. Почвенная карта Пермского края / географическая основа – 1:2 500 000, 25 км в 1 см – Пермь, 1979.
83. Почвенный покров и земельные ресурсы Российской Федерации – М. : Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2001. – 400 с.
84. Почвоведение: Типы почв, их география и использование / Под ред. В.А. Ковды, Б.Г. Розанова – М. : Высш. шк., 1988. – 368 с.
85. Почвообразовательные процессы / Под ред. М.С. Симаковой, В.Д. Тонконогова – М. : Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2006. – 510 с.
86. Прокофьева, Т.В. Введение почв и почвоподобных образований городских территорий в классификацию почв России / Т.В. Прокофьева, М.И. Герасимова, О.С. Безуглова, К.А. Бахматова, А.А. Гольева, С.Н. Горбов, Е.А. Жарикова, Н.Н. Матинян, Е.Н. Наквасина, Н.Е. Сивцева // Почвоведение. – 2014. – № 10. – С 1155-1164.
87. Расписание погоды [Электронный ресурс] – URL: <https://rp5.ru> (дата обращения 20.04.2023).
88. Родикова, А.В. О происхождении и свойствах солончаков Хакасии / А.В. Родикова // Вестник Томского государственного университета. – 2007. – №. 305. – С. 208-210.
89. Ронжина, Т.В. Техногенная трансформация дерново-подзолистых почв в районах добычи углеводородного сырья при разливе сточных вод / Т.В. Ронжина // Естественные и технические науки. – 2009. – № 6. – С. 452-454.
90. Ронжина, Т.В. Геохимическая трансформация дерново-подзолистых почв Калининградской области при разливах минерализованных вод : специальность 25.00.36 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук / Ронжина Татьяна Владимировна ; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. – Москва, 2011. – 23 с.

91. Ронжина, Т.В. Изменение кислотно-основного состояния почв в результате реализации механизмов геохимической буферности при импактном воздействии минерализованных вод на дерново-подзолистые почвы / Т.В. Ронжина, П.П. Кречетов // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 10. – С. 1293-1296.
92. Сапрыкин, О.И. Разнообразие почв микрозападин юго-восточной части Западной Сибири : специальность 03.02.13 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Сапрыкин Олег Игоревич; Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения Российской академии наук – Новосибирск, 2021. – 19 с.
93. Сафроницкий, П.А. Геологическое строение / П.А. Сафроницкий // *Пермская область*. Пермь, 1959. – С. 19-29.
94. Сванидзе, И.Г. Воздействие техногенного галогенеза на водосборные ландшафты речных долин и водные системы (на примере юга Тюменской области) / И.Г. Сванидзе, Т.И. Моисеенко, А.С. Якимов, А.В. Соромотин // *Водные ресурсы*. – 2014. – Т. 41. – № 1. – С. 94-103.
95. Сеньков, А.А. Генезис солевого профиля солонцовых почв юга ишимской равнины / А.А. Сеньков, В.В. Попов // *Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет)*. – 2017. – №1. – С. 107-115.
96. Симакова, М.С. Методика картирования почв Прикаспийской низменности по материалам аэрофотосъемки / М.С. Симакова // *Почвенно-географические исследования и использование аэрофотосъемки в картировании почв*. – М. : Изд-во АН СССР, 1959. – С. 283-357
97. Симонова, Ю.В. Засоленные почвы Ростовской низины (Ярославская область): морфология, генезис и динамика засоления в годовом гидрологическом цикле / Ю.В. Симонова, А.В. Русаков, А.Г. Рюмин // *Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева*. – 2018. – №93. – С. 40-74.

98. Симонова, Ю.П. Засоленные почвы Ростовской низины (Ярославское Поволжье): современное состояние, гидрологические аспекты и эволюционные тренды на фоне климатических изменений / Ю.П. Симонова, А.В. Русаков, Н.А. Лемешко // Труды Карельского научного центра РАН. – 2022. – № 8. – С. 31–49.
99. Симонова, Ю.В. Засоленные почвы гумидных ландшафтов (котловина оз. Неро, бассейн верхней Волги) : морфогенетические особенности, динамика, эволюционные тренды : специальность 03.02.13 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Симонова Юлия Владимировна; Почвенный институт им. В. В. Докучаева – Москва, 2023. – 24 с.
100. Смирнова, М.А. Почвенные свойства как индикаторы / М.А. Смирнова, Д.Н. Козлов // Почвоведение. – 2023. – № 3. – С. 353-369.
101. Солнцева, Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов / Н.П. Солнцева – М. : изд-во МГУ, 1998. – 367 с.
102. Солнцева, Н.П. Техногенный галогенез в районах добычи углеводородного сырья и эволюция солевых ореолов / Н.П. Солнцева, А.П. Садов // География, общество, окружающая среда. Т.IV : Природно-антропогенные процессы и экологический риск / Под ред. С.М. Малхазовой и Р.С. Чалова – М. : ИД Городец, 2004. – С. 427-447.
103. Соромотин, А.В. Солевое загрязнение таежных биоценозов при нефтедобыче / А.В. Соромотин, С.Н. Гашева, М.Н. Казанцева // Проблемы географии и экологии Западной Сибири. – Тюмень: ТГУ, 1996. – 121-130 с.
104. Состояние окружающей среды и здоровья населения г. Перми в 2001 г. : Справочно-информационные материалы. – Пермь, 2002. – 320 с.
105. Столбовой, В.С. О почвенном фонде России / В.С. Столбовой, Б.В. Шеремет // Почвоведение. – 1997. – № 12. – С. 1429–1439.

106. Таргульян, В.О. Оглеение и морфотипы глея / В.О. Таргульян, М.И. Герасимова, Л.К. Целищева, С.А. Шоба // Почвоведение. – 1987. – № 7. – С. 16-24.
107. Тонконогов, В.Д. Классификация почв России 1997-2004-2008 / В.Д. Тонконогов, М.И. Герасимова, И.И. Лебедева // Грунтознание. – 2008. – №.9. – С. 142-146.
108. Трухина, Л.Ф. Почвы пойм малых рек и пути повышения их плодородия и производительности (на примере Ивановской области) : специальность 06.01.03 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / Трухина Лидия Федоровна ; Почвенный институт имени В.В. Докучаева. – Москва, 1988. – 23 с.
109. Филькин, Т.Г. База геоданных «Почвы. Пермский край» / Т.Г. Филькин, О.З. Еремченко, С.Е. Максимова, И.Е. Шестаков – ПГНИУ, Пермь. – 2014.
110. Фоминых, Д.Е. Техногенное засоление и возможности рекультивации почв на территориях нефтяных месторождений Западной Сибири / Д.Е. Фоминых, Г.Г. Щербак // Инженерные изыскания. – 2012. – № 9. – С. 66-71.
111. Хадеева, Е.Р. Галогенез почв Забайкалья и Предбайкалья : специальность 03.02.13 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Хадеева Екатерина Романовна; Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН – Иркутск, 2021. – 20 с.
112. Хайрулина, Е.А. Природные и антропогенные источники водорастворимых солей на территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / Е.А. Хайрулина, Л.В. Новоселова, Н.В. Порошина // Географический вестник. – 2017. – №1. – С. 93-101.
113. Хайрулина, Е.А. Воздействие фильтрационных вод шламохранилища с солесодержащими отходами на поверхностные и

- подземные воды / Е.А. Хайрулина // Географический вестник. – 2018. – №. 2. – С. 145-155.
114. Хайруллина, Е.А. Формирование природно-техногенных ландшафтов при разработке месторождения калийных солей / Е.А. Хайруллина, Л.В. Новоселова, И.Е. Шестаков, А.А. Богуш // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, центральной Азии и Сибири. – М. : изд-во ФГБНУ «ВНИИ агрохимии», 2018. – Т. II. – С. 220-223.
115. Хайрулина, Е.А. Ландшафтообразование в условиях техногенного галогенеза : специальность 1.6.21 : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора географических наук / Хайрулина Елена Александровна; Национальный исследовательский Томский государственный университет – Томск, 2022. – 43 с.
116. Хайрулина, Е.А. Микробиологическое разнообразие почв в условиях техногенного галогенеза / Е.А. Хайрулина, А.Ю. Максимов, Н.В. Митракова, П.Ю. Мальцева // Трансграничное сотрудничество в области экологической безопасности и охраны окружающей среды [Электронный ресурс]: VI Международная научно-практическая конференция (Гомель, 2–3 июня 2022 года) : сборник материалов. Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины. – 2022. – С. 204-208.
117. Хайрулина, Е.А. Роль биогеохимических процессов в формировании сульфидных ландшафтов при техногенном галогенезе / Е.А. Хайрулина // Теоретические и прикладные проблемы ландшафтной географии. VII Мильковские чтения. Материалы XIV Международной ландшафтной конференции. Т.1. Воронеж. – 2023. – С. 323-324.
118. Хайрулина, Е.А. Особенности микроэлементного состава вод в районах разгрузки хлоридно-натриевых подземных вод / Е.А. Хайрулина, И.И. Чайковский // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Труды IX Всероссийской научно-

- практической конференции с международным участием. Том 1. Пермь. – 2023. – С. 306-309.
119. Хитров, Н.Б. Причины и механизмы засоления почв виноградников юга Тамани / Н.Б. Хитров, Е.А. Черников, В.П. Попова, Т.Г. Фоменко // Почвоведение. – 2016. – №. 11. – С. 1305-1318.
120. Хитров, Н.Б. Морфологическое строение почв в ближайшей зоне влияния Кучигерских гидротерм (Баргузинская котловина) / Н.Б. Хитров, В.Л. Убугунов, В.И. Убугунова, Ю.А. Рупышев, Т.А. Аюшина, А.Д. Жамбалова, Э.Г. Цыремпилов, А.Е. Парамонова, Ц.Н. Насатуева // Почвоведение. – 2019. – № 12. – С. 1430-1453.
121. Хитров, Н.Б. Диагностические горизонты в классификации почв России: Версия 2021 г. / Н.Б. Хитров // Почвоведение. – 2021. – № 8. – С. 899-910.
122. Хитров, Н.Б. Пятилетнее изменение засоленности почв и грунтов рисовых систем Прикаркинской низменности после прекращения орошения / Н.Б. Хитров, Л.В. Роговнева // Почвоведение. – 2021. – № 1. – С. 120–135
123. Хомич, В.С. Сульфидные новообразования в почвогрунтах как результат взаимодействия природных и техногенных факторов / В.С. Хомич // Доклады Академии БССР. – 1985. – Т. XXIX. – №3. – С. 267-270.
124. Хулиш, П. Техногенные слои в органогенных почвах как результат воздействия отходов содовой промышленности / П. Хулиш, С. Пиндрал, М. Кобиерски, П. Чаржински // Почвоведение. – 2018. – № 10. – С. 1192-1201.
125. Черноусенко, Г.И. Оценка площадей засоленных и солонцовых почв на территории Уральского федерального округа России / Г.И. Черноусенко, Н.В. Калинина, Н.Б. Хитров, Е.И. Панкова, Д.И. Рухович, И.А. Ямнова, А.Ф. Новикова // Почвоведение. – 2011. – № 4. – С.403-416.

126. Черноусенко, Г.И. Засоленные почвы Баргузинской котловины / Г.И. Черноусенко, Е.И. Панкова, Н.В. Калинина, В.И. Убугунова, Д.И. Рухович, В.Л. Убугунов, Э.Г. Цыремпилов // Почвоведение. – 2017. – №6. – С. 652-671.
127. Черноусенко, Г.И. Магний в засоленных гипсосодержащих почвах России / Г.И. Черноусенко, Н.Б. Хитров // Почвоведение. – 2023. – № 7. – С. 815-830.
128. Шейнкман, Л.Э. Оценка качества подземных и поверхностных вод Верхнекамского промышленного района / Л.Э. Шейнкман, М.С. Ивлиева // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2023. – №. 2. – С. 84-91.
129. Шкляев, А.С. Климат Пермской области / А.С. Шкляев, В.А. Балков – Пермь : Пермское книжное изд-во, 1963. – 191 с.
130. Шраг, В.И. Пойменные почвы, их мелиорация и сельскохозяйственное использование / В.И. Шраг – М. : Россельхозиздат, 1969. – 271 с.
131. Шумилов, Е.Н. Усть-Игум / Е.Н. Шумилов // Материалы по Пермской области к Уральской исторической энциклопедии. – Пермь, 1994. – Вып. 1. – С. 146.
132. Эволюция почв и почвенного покрова. Теория и разнообразие природной эволюции и антропогенных трансформаций почв / Отв. ред. В.Н. Кудеярова, И.В. Иванов – М. : ГЕОС, 2015. – 925 с.
133. Якимов, А.С. Изменение свойств почв речных долин южной тайги Западной Сибири под действием минерализованных артезианских вод / А.С. Якимов, И.Г. Сванидзе, М.Н. Казанцева, А.В. Соромотин // Почвоведение. – 2014. – № 3. – С. 364-374.
134. Ямнова, И.А. Засоление почв дельты р. Волга и района западных ильменей / И.А. Ямнова, Г.И. Черноусенко, Н.И. Сотнева // Бюллетень Почвенного института им. ВВ Докучаева. – 2005. – №. 57. – С. 30-42.

135. Ястребов, Е.В. Рельеф / Е.В. Ястребов // Пермская область. Пермь, 1959. – С. 30-41.
136. Andriessse, W. Acid sulfate soils, distribution and extent / W. Andriessse, M.E.F. van Mensvoort // Encyclopedia of soil science. Marcel Dekker. – 2002. – P. 6-6.
137. Artamonova, V.S. Technogenic salinization of soils and their microbiological characterization / V.S. Artamonova, L.Yu. Dits, T.N. Elizarova, I.V. Lyutykh // Sibirskii Ekologicheskii Zhurnal. – 2010. – V.17. – №3. – P. 461-470.
138. Åström, M. Impact of acid sulfate soils on stream water geochemistry in western Finland / M. Åström, A. Björklund // Journal of Geochemical Exploration. – 1995. – V.55. – № 1-3. – P. 163-170.
139. Azovtseva, N.A. Dynamics of Physical and Physicochemical Properties of Urban Soils under the Effect of Ice-Melting Salts / N.A. Azovtseva, A.V. Smagin // Eurasian Soil Science. – 2018. – V.51. – № 1. – P. 120–129.
140. Bohrerova, Z. The relationship between redox potential and nitrification under different sequences of crop rotations / Z. Bohrerova, R. Stralkova, J. Podesvova, G. Bohrer, E. Pokorny // Soil and Tillage Research. – 2004. – V.77. – № 1. – P. 25-33.
141. Coates, J.D. Geothrix fermentans gen. nov., sp. nov., a novel Fe(III)-reducing bacterium from a hydrocarbon-contaminated aquifer / J.D. Coates, D.J. Ellis, C.V. Gaw, D.R. Lovley // Int. J. Syst. Evol. Microbiol. – 1999. – V.49. – № 4. – P. 1615-1622.
142. Connell, W.E. Sulfate Reduction in Soil: Effects of Redox Potential and pH / W.E. Connell, W.H. Patrick Jr // Science. – 1968. – V.159. – №3810. – P. 86-87.
143. Dent, D.L. Bottom-up and top-down development of acid sulphate soils / D.L. Dent // Catena. – 1993. – V.20. – №4. – P. 419-425.

144. Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils : USDA Agriculture handbook. – 1954. – № 60. – 160 p.
145. Eswaran, H. Properties, genesis, classification, and distribution of soils with gypsum / H. Eswaran, Z.T. Gong // Occurrence, Characteristics, and Genesis of Carbonate, Gypsum, and Silica Accumulations in Soils. – Published by Soil Science Society of America. – 1991. – P. 89-119.
146. Eremchenko, O.Z. Development of the Solonchak Process in Soils of Small 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, No. 4. – P. 512–522.
147. Fanning, D.S. Historical developments in the understanding of acid sulfate soils / D.S. Fanning, M.C. Rabenhorst, R.W. Fitzpatrick // Geoderma. – 2017. – V.308. – P. 191-206.
148. Franzen, D. Managing saline soils in North Dakota, NDSU Ext / D. Franzen, C. Fanning, T. Gregoire // North Dakota State University Extension, Fargo, ND. – 2003. – 11 p.
149. Fitzpatrick, R.W. Acid sulfate soils / R.W. Fitzpatrick, P. Shand, R.H. Merry // Natural history of the Riverland and Murraylands. – 2009. – V.178. – P.65-111.
150. Gabbasova, I.M. Transformation of gray forest soils upon technogenic salinization and alkalization and subsequent rehabilitation in oil-producing regions of the southern Urals / I.M. Gabbasova, R.R. Suleimanov // Eurasian Soil Science. – 2007. – V.40. – № 9. – P. 1000-1007.
151. Grunewald, G. Alteration of secondary minerals along a time series in young alkaline soils derived from carbonatic wastes of soda production / G. Grunewald, K. Kaiser, R. Jahn // Catena. – 2007. – V.71. – № 3. – P. 487-496.
152. Harter, R.D. The Effect of Moisture Level and Incubation Time on the Chemical Equilibria of a Toledo Clay Loam Soil / R.D. Harter, E.O. McLean // Agronomy Journal. – 1965. – V.57. – № 6. – P. 583-588.

153. Hulisz, P. Application of the WRB classification to salt-affected soils in Poland and Germany / P. Hulisz, P. Charzyński, L. Giani // Polish Journal of Soil Science. – 2010. – V.43. – № 1. – P. 81-92.
154. Hulisz, P. Technogenic Layers in Organic Soils as a Result of the Impact of the Soda Industry / P. Hulisz, S. Pindral, M. Kobierski, P. Charzyński // Eurasian Soil Science. 2018. – V.51. – № 10. – P. 1133-1141.
155. Husson, O. Spatial variability of acid sulphate soils in the Plain of Reeds, Mekong delta, Vietnam / O. Husson, P.H. Verburg, M.T. Phung, M.E.F. van Mensvoort // Geoderma. – 2000. – V.97. – №12. – P. 1-19.
156. Ivarson, K.C. Microbiological transformations of iron and sulfur and their applications to acid sulfate soils and tidal marshes / K.C. Ivarson, G.J. Ross, N.M. Miles // Acid sulfate weathering. – 1982. – V.10. – P. 57-75.
157. Imetternicht, G. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints / G. Imetternicht, J. Azinck // Remote Sensing of Environment. – 2003. – V.85. – № 1. – P. 1-20.
158. Kittrick, J.A. Acid Sulfate Weathering / J.A. Kittrick, D.S. Fanning, L.R. Hossner – Soil Sci. Soc. Am. Special Pub, 1982. – P. 234.
159. Lin, W.C. Geobacter sulfurreducens can grow with oxygen as a terminal electron acceptor / W.C. Lin, M.V. Coppi, D.R. Lovley // Appl. Environ. Microbiol. – 2004. – V.70. – № 4. – P. 2525-2528.
160. Ljung, K. Acid sulfate soils and human health a millennium ecosystem assessment / K. Ljung, F. Maley, A. Cook, P. Weinstein // Environment international. – 2009. – V.35. – № 8. – P. 1234-1242.
161. Lovley, D.R. Role of humic-bound iron as an electron transfer agent in dissimilatory Fe (III) reduction / D.R. Lovley, E.L. Blunt-Harris // Appl. Environ. Microbiol. – 1999. – V.65. – P. 4252-4254.
162. Mansfeldt, T. In situ long-term redox potential measurements in a dyked marsh soil / T. Mansfeldt // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. – 2003. – V.166. – № 2. – P. 210-219.

163. Michael, P.S. The Roles of Surface Soil Carbon and Nitrogen in Regulating the Surface Soil pH and Redox Potential of Sulfidic Soil Materials of Acid Sulfate Soils / P.S. Michael // *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science*. – 2018. – V.41. – №4. – P. 1627-1641.
164. Mitsch, W.J. *Wetlands* / W.J. Mitsch, J.G. Gosselink – New Jersey : John Wiley & Sons, 2015. – 752 pp.
165. Nikiforova, E.M. Long-term dynamics of anthropogenic solonchicity in soils of the Eastern okrug of Moscow under the impact of deicing salts / E.M. Nikiforova, N.S. Kasimov, N.E. Kosheleva // *Eurasian Soil Science*. – 2017. – V.50. – № 1. – P. 84-94.
166. Nordmyr, L. Metal pollution of estuarine sediments caused by leaching of acid sulphate soils / L. Nordmyr, M. Åström, P. Peltola // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. – 2008. – V.76. – №1. – P. 141-152.
167. Özcan, H. Solonchaks and Solonchak-Like Soils. / H. Özcan, M.A. Çullu, H. Günal, H. Ekinci, M. Budak, A. Sungur, T. Everest // *The Soils of Turkey*. – 2018. – P.267-283.
168. Phillips, J.D. Soil Complexity and Pedogenesis / J.D. Phillips // *Soil Science*. – 2017. – V.182. – №4. – P. 117-127.
169. Picek, T. Microbial responses to fluctuation of soil aeration status and redox conditions / T. Picek, M. Simek, H. Santruckova // *Biology and Fertility of Soils*. – 2000. – V.31. – P. 315-322.
170. Poch, R.M. Micromorphological evidence for mineral weathering pathways in a coastal acid sulfate soil sequence with Mediterranean-type climate, South Australia / R.M. Poch, B.P. Thomas, R.W. Fitzpatrick, R.H. Merry // *Soil Research*. – 2009. – V.47. – № 4. – P. 403-422.
171. Pons, L.J. Physiography of coastal sediments and development of potential soil acidity / L.J. Pons, N. Van Breemen, P.M. Driessen // *Acid sulfate weathering*. – 1982. – V.10. – P. 1-18.

172. Rabenhorst, M.C. Acid Sulfate Soils: Formation / M.C. Rabenhorst, D.S. Fanning, S.N. Burch // Encyclopedia of Environmental Management, Four Volume Set. – 2012. – P. 31-34.
173. Ramakrishna, D. Environmental impact of chemical deicers – a review / D. Ramakrishna, T. Viraraghavan // Water, Air and Soil Pollution. – 2005. – V.166. – P. 49-63.
174. Richter D.B. Jr. Humanity's transformation of earth's soil: Pedology's new frontier / D.B. Richter Jr. // Soil Science. – 2007. – V.172. – №12. – P. 957-967.
175. Roden, E.E. Microbial reduction of crystalline Fe (III) oxides: influence of oxide surface area and potential for cell growth / E.E. Roden, J.M. Zachara // Environ. Sci. Technol. – 1996. – V.30. – P.1618-1628.
176. Rosicky, M. Factors contributing to the acid sulfate soil scalding process in the coastal floodplains of New South Wales, Australia / M. Rosicky, L. Sullivan, P. Slavich, M. Hughes // Soil Research. – 2004. – V.42. – №6. – P. 587-594.
177. Sabiene, N. The influence of land use on soil organic carbon and nitrogen content and redox potential / N. Sabiene, G. Kusliene, E. Zaleckas // Žemdirbystė (Agriculture). – 2010. – V.97. – №3. – P. 15-24.
178. Sohlenius, G. Sura sulfatjordar läcker metaller-orsaker och möjliga åtgärder / G. Sohlenius, I. Öhborn // Fakta Jordbruk. – 2002. – V.7. – P. 4-4.
179. Szabolcs, I. Salt-affected soils / I. Szabolcs – Florida : CRC Press, 1989. – 274 p.
180. Szabolcs, I. An overview on soil salinity and alkalinity in Europe / I. Szabolcs // Soil Salinization and Alkalization in Europe. ESSC spec. publ. Thessaloniki, Greece. – 1996. – P. 1-12.
181. Takai, Y. The mechanism of reduction in waterlogged paddy soil / Y. Takai, T. Kamura // Folia microbiologica. – 1966. – V.11. – P. 304-313.

182. Van Breemen, N. Effects of redox processes on soil acidity / N. Van Breemen // Netherlands Journal of Agricultural Science. – 1987. – V.35. – №3. – P. 271-279.
183. Yamnova, I.A. Gypsic pedofeatures and elementary pedogenetic processes of their formation / I.A. Yamnova, E.I. Pankova // Eurasian Soil Science. – 2013. – V.46. – №12. – P. 1117-1129.
184. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. – International Union of Soil Sciences (IUSS). – Vienna, 2022. – 236 p.

Приложение А

Данные наблюдений метеостанции г. Березники Пермского края (1966-2018 гг.)

Министерство природных ресурсов и экологии
Российской Федерации
Федеральная служба по гидрометеорологии и
мониторингу окружающей среды

ФГБУ «Уральское УГМС»

**Пермский ЦГМС – филиал
ФГБУ «Уральское УГМС»**

Пермский Центр по гидрометеорологии
и мониторингу окружающей среды -
филиал Федерального государственного
бюджетного учреждения «Уральское
управление по гидрометеорологии и
мониторингу окружающей среды»

Директору ЕНИ ПГНИУ
В.А.Наумову

ecogeopsu@mail.ru

Ново-Гайвинская ул., д. 70, Пермь, 614030
тел. (342) 274-39-70, факс: (342) 274-29-72
для телеграфа Погода
ИНН 6685025156 КПП 668501001
E-mail: gimet@meteo.perm.ru
Сайт: www.meteo.perm.ru

30.01.2019 № 185
На № 59-18/37 от 16.01.2019г.

Метеорологическая информация
На 3х листах

На Ваш запрос предоставляем информацию по данным наблюдений метеостанции Березники Пермского края (1966-2018):

1. Средняя температура воздуха самого холодного месяца: **-17,3 °C**
2. Средняя температура воздуха самого жаркого месяца: **+18,3 °C**
3. Среднемесячная и среднегодовая температура воздуха, °C

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
-14,9	-13,0	-5,0	2,6	9,7	15,4	17,9	14,7	8,9	1,4	-6,3	-12,0	1,7

4. Среднемесячная и среднегодовая относительная влажность воздуха, %

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
82	80	73	65	59	66	71	77	80	83	85	83	75

5. Среднемесячное и среднегодовое количество осадков, мм

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
38	28	31	38	56	80	82	77	72	66	51	41	660

6. Среднегодовая повторяемость ветра по направлениям и штилю (1985-2018)

С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	Штиль
11	5	7	15	25	15	11	11	10

7. Среднемесячная и среднегодовая скорость ветра, м/с

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
3,4	3,3	3,6	3,4	3,2	2,8	2,3	2,4	2,9	3,5	3,6	3,5	3,2

8. Скорость ветра, вероятность превышения которой в течение года составляет 5 %, равна 7 м/с
9. Повторяемость слабых скоростей ветра: 25% всех случаев измерения дискретностью раз в 3 часа (8-срочные наблюдения)
10. Среднегодовое число дней с туманом: 13
11. Значение коэффициента стратификации А, соответствующее неблагоприятным метеорологическим условиям, при которых концентрация вредных веществ в атмосферном воздухе максимальна, принимается равным 160. (ОНД-86)
12. Наибольшая высота снежного покрова по данным снегосъемок в лесу: 157см

Приложение Б

Содержание ионов в водной вытяжке из аллювиальных солончаковых почв (ммоль(экв)/100 г) в долине реки Быгель

№ разреза	Глубина, см	Плотный остаток, %	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Сумма солей, %	Сумма токсичных солей, %
5	0-10	0,48	0,16	0,26	3,24	2,46	1,87	4,28	0,19	0,43	0,42
	20-30	0,92	0,28	0,16	7,32	5,19	2,55	10,01	0,09	0,86	0,83
	40-50	2,26	0,46	0,34	21,07	12,43	3,40	30,36	0,09	2,23	2,19
	57-67	5,34	0,96	0,6	51,00	38,65	6,81	74,75	0	5,30	5,23
	81-91	2,45	0,48	0,24	24,74	11,43	4,26	32,66	0,09	2,40	2,36
	102-112	2,82	0,74	0,36	30,91	12,93	3,11	40,94	0,09	2,84	2,77
6	0-10	0,3	0,17	0,24	1,30	0,94	1,87	0,74	0	0,19	0,18
	20-30	0,2	0,18	0,14	1,22	0,76	1,18	1,07	0	0,16	0,14
	41-51	0,94	0,38	0,26	7,38	6,66	1,87	11,04	0	0,84	0,82
	59-69	1,68	0,34	0,28	14,89	8,70	3,69	20,47	0	1,60	1,57
	83-93	2,12	0,44	0,32	20,28	10,15	6,54	22,54	0,26	2,00	1,91

Приложение В

Содержание ионов в водной вытяжке из аллювиальных солончаковых почв (ммоль(экв)/100 г) в долине реки Черная

№ разреза	Глубина отбора, см	Плотный остаток, %	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Сумма солей, %	Сумма токсичных солей, %
7	0-9	0,90	0,95	0,27	10,81	1,31	4,50	8,46	0,33	0,86	0,79
	15-25	0,92	0,65	0,23	11,09	2,05	5,07	8,42	0,41	0,91	0,86
	35-45	3,30	3,34	0,66	39,95	7,56	10,60	39,86	0,18	3,25	3,02
	50-60	3,34	2,12	0,83	41,38	7,37	10,43	42,47	-	3,32	3,18
	70-80	1,58	0,87	0,25	19,23	3,71	5,74	18,02	0,16	1,53	1,47
	85-95	2,46	1,84	0,40	29,83	6,03	6,77	30,40	0,17	2,40	2,28
8	3-13	0,14	0,08	0,06	1,28	0,15	1,13	0,35	0,15	0,11	0,10
	16-26	0,66	0,55	0,15	7,05	1,69	4,21	4,37	0,69	0,63	0,59
	35-45	1,88	6,59	0,48	18,55	3,06	13,34	14,06	0,44	1,86	1,40
9	2-12	0,96	0,52	0,22	10,64	2,05	5,67	6,99	0,72	0,89	0,85
	20-30	1,50	0,71	0,20	18,74	3,32	5,93	15,50	0,68	1,47	1,41
	40-50	1,46	0,74	0,23	16,47	3,39	6,51	14,48	0,60	1,40	1,34
10	0-12	1,20	1,30	0,82	11,66	3,62	3,83	12,19	0,75	1,11	1,0
	20-30	2,82	6,81	1,12	23,49	8,70	18,31	23,41	0	2,74	2,27
	35-45	3,46	6,76	1,67	31,60	10,00	15,88	35,65	0	3,30	2,84
	50-60	2,70	3,40	0,88	27,61	7,61	8,56	31,91	0	2,55	2,32
	76-86	1,62	1,31	0,37	17,39	5,43	4,32	20,59	0	1,58	1,49
	110-120	0,24	0,36	0,20	2,17	0,76	1,41	1,91	0	0,22	0,2
	125-135	0,14	0,16	0,22	1,07	0,54	0,93	1,11	0	0,14	0,12

Продолжение приложения В

№ разреза	Глубина отбора, см	Плотный остаток, %	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Сумма солей, %	Сумма токсичных солей, %
11	3-13	0,24	0,49	0,28	2,13	0,71	1,04	2,23	0,28	0,24	0,20
	19-29	0,20	0,26	0,16	1,34	0,97	0,96	1,58	0,16	0,19	0,17
	33-43	0,34	0,89	0,29	1,31	1,96	2,92	1,46	0,22	0,33	0,27
	47-57	0,30	0,75	0,36	0,77	1,86	3,02	0,43	0,38	0,29	0,24
	69-77	0,56	0,81	0,49	1,89	3,29	5,85	0,74	0	0,50	0,45
	80-90	0,20	0,14	0,23	1,06	1,00	1,47	0,50	0,40	0,18	0,17
12	3-13	0,14	0,32	0,30	0,49	0,65	0,66	0,51	0,53	0,13	0,10
	14-24	0,12	0,22	0,22	0,37	0,54	0,52	0,51	0,35	0,10	0,08
	28-38	0,12	0,18	0,18	0,54	0,56	0,62	0,64	0,18	0,10	0,09
	46-56	0,46	1,37	0,84	1,11	1,88	4,44	0,69	0	0,37	0,28
	67-77	0,14	0,14	0,22	0,43	0,65	0,94	0,38	0,18	0,11	0,10

Приложение Г

Содержание ионов в водной вытяжке из аллювиальных солончаковых почв (ммоль(экв)/100 г) в долине реки Ленва

№ разреза	Глубина отбора, см	Плотный остаток, %	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Сумма солей, %	Сумма токсичных солей, %
13	9-19	1,27	0,55	0,20	10,61	5,77	3,26	13,55	0,36	1,20	1,10
	25-35	1,99	1,19	0,39	20,43	8,67	3,09	25,94	0,24	1,90	1,79
	45-55	2,71	2,25	0,54	27,39	10,26	3,77	36,39	0,16	2,60	2,39
	63-73	2,44	2,26	0,77	25,13	9,49	2,91	34,44	0,10	2,40	2,19
14	5-15	0,94	6,19	3,66	3,17	0,60	3,60	12,73	0	0,90	0,49
	20-30	1,29	10,96	7,26	3,57	0,26	2,40	20,52	0	1,20	0,90
	40-50	1,28	10,95	6,60	3,96	0,29	2,23	19,71	0	1,20	0,89
	55-65	1,14	9,50	5,95	3,26	0,13	2,40	16,39	0	1,04	0,75
	74-84	1,44	12,60	8,75	4,70	0,03	2,23	23,51	0	1,40	1,06
15	10-20	0,65	2,28	0,81	5,76	1,21	1,20	8,79	0,12	0,60	0,50
	21-31	1,09	4,41	1,51	10,22	1,90	1,37	15,91	0	1,05	0,89
	35-45	1,96	5,55	1,55	20,52	2,65	2,40	27,79	0,09	1,90	1,62
	59-69	1,77	4,60	1,24	17,87	3,37	2,06	25,18	0,16	1,70	1,50
16	0-3	40,14	163	60	109	244	169	406	0,18	39,00	27,23
	3-15	24,88	104	67	237	1,2	122	286	0,44	24,80	17,23
	45-55	17,86	109	102	74	0,1	194	91	0,3	17,80	10,18

Продолжение приложения Г

№ разреза	Глубина отбора, см	Плотный остаток, %	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Сумма солей, %	Сумма токсичных солей, %
17	5-15	0,54	3,80	1,66	1,74	0,23	0	9,32	0,19	0,50	0,34
	20-30	0,36	1,48	1,15	1,30	0,13	0	4,63	0,10	0,30	0,17
	32-42	0,51	2,00	1,10	1,74	0,15	0	6,44	0,18	0,40	0,23
	50-60	0,70	4,80	2,50	2,15	0,17	0	10,74	0,90	0,60	0,38
	70-80	1,49	13,60	6,60	4,67	0,21	0	25,43	0,13	1,40	0,90
	95-105	1,15	10,70	3,70	3,59	0,19	0	21,24	0,14	1,10	0,75
18	8-10	1,17	7,8	4,46	4,89	1,83	3,17	14,03	0	1,04	0,79
	16-26	0,92	7,6	3,46	1,09	1,83	2,85	11,04	0	0,82	0,62
	27-37	0,85	7,4	3,02	1,09	1,83	3,36	10,35	0	0,81	0,58
	40-50	0,89	8,2	2,98	1,09	1,83	4,13	10,81	0	0,88	0,60
	67-77	1,30	11,4	5,03	1,24	0,09	2,01	16,1	0	0,99	0,85
19	0-5	1,13	4,9	2,2	6,96	0,15	2,76	13,34	0	0,90	0,71
	10-20	1,21	6,0	2,38	7,83	0,09	3,00	15,41	0	1,02	0,82
	25-35	1,89	9,0	3,38	14,04	0,09	3,03	25,76	0	1,61	1,40
	44-54	3,29	11,7	4,3	31,57	4,57	4,78	44,62	0	3,00	2,62
	60-70	3,13	10,1	3,76	31,15	3,02	4,10	41,86	0	2,76	2,44
	92-98	2,89	9,8	3,01	22,07	4,02	4,01	37,26	0	2,41	2,14

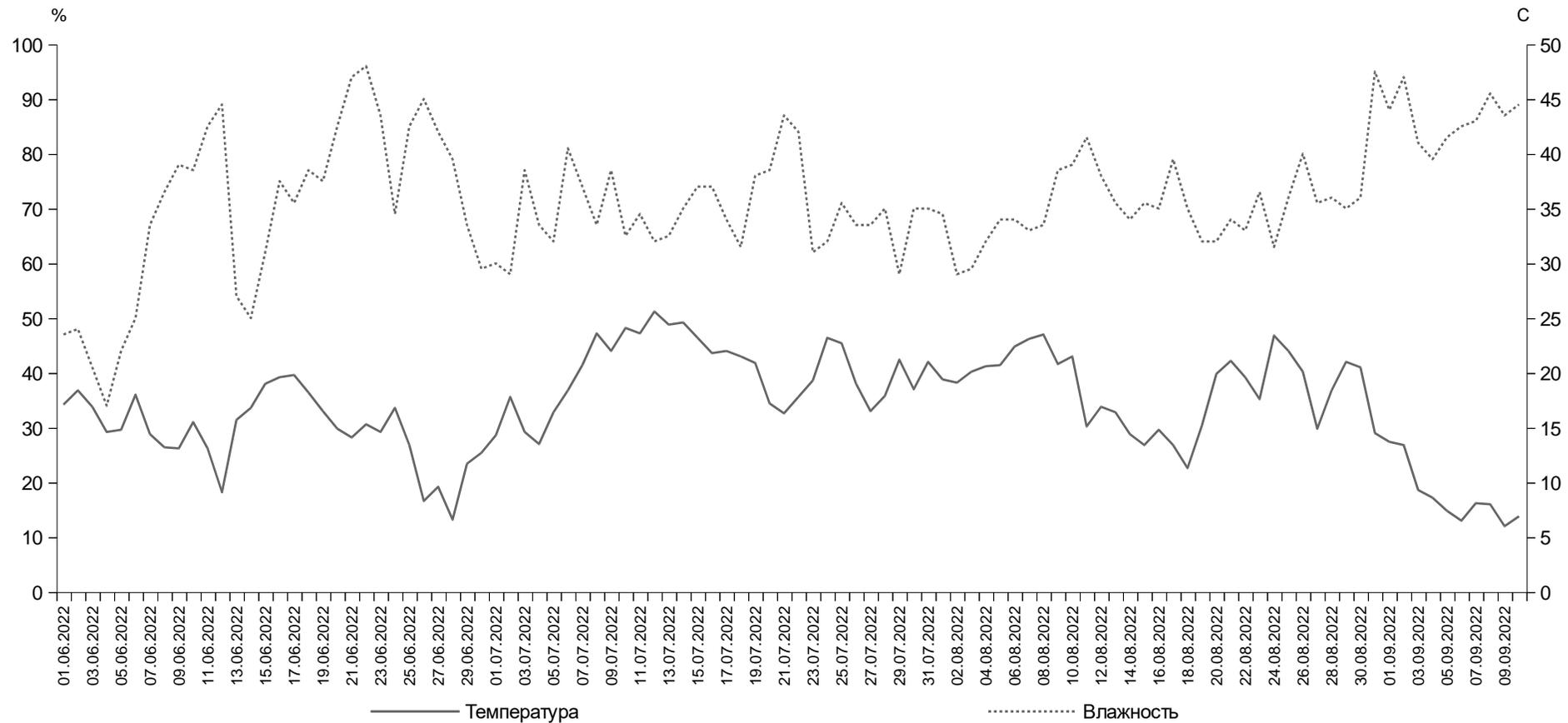
Приложение Д

Содержание ионов в водной вытяжке из аллювиальных солончаковых почв (ммоль(экв)/100 г) в долине реки Усолка

№ разреза	Глубина, см	Плотный остаток, %	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Сумма солей, %	Сумма токсичных солей, %
1	5-15	0,70	1,90	1,10	7,91	0,41	4,74	5,66	1,24	0,69	0,59
	15-25	0,58	0,60	0,30	5,22	0,41	1,09	4,52	1,16	0,44	0,41
	43-53	0,82	1,30	0,60	9,96	0,41	4,83	6,42	1,44	0,75	0,69
	72-82	0,68	1,30	0,60	9,57	0,41	4,69	5,78	1,28	0,71	0,65
2	10-20	0,53	0,47	0,25	4,96	0,41	1,44	3,57	1,36	0,36	0,34
	30-40	0,52	0,38	0,25	3,44	0,41	0,80	2,70	1,04	0,25	0,23
	45-55	0,47	0,40	0,20	5,22	0,41	1,20	4,03	1,32	0,38	0,36
	65-75	0,62	0,58	0,17	7,57	0,41	1,51	6,08	1,32	0,57	0,54
	85-92	0,62	0,69	0,20	8,70	0,41	2,51	6,31	1,40	0,62	0,59
3	2-12	0,62	0,98	0,31	6,87	0,41	1,46	5,89	1,08	0,53	0,48
	12-22	0,70	0,92	0,22	8,43	0,41	3,17	6,04	0,80	0,63	0,58
	24-34	0,59	0,71	0,20	7,91	0,41	3,12	4,67	1,68	0,56	0,52
	55-65	0,68	0,96	0,22	8,43	0,41	3,87	4,98	1,40	0,62	0,57
	80-90	1,82	12,00	1,40	8,70	0,51	16,34	5,59	0,96	1,38	0,68
4	0-10	1,44	3,17	0,39	18,48	0,10	3,81	17,29	1,03	1,36	1,28
	11-21	0,98	0,88	0,28	13,04	0,05	5,56	7,46	1,23	0,93	0,84
	27-40	0,73	0,70	0,15	8,70	0,06	2,41	6,33	0,87	0,61	0,58
	60-75	1,44	2,24	0,54	15,22	0,10	10,18	7,01	0,91	1,20	0,99
	100-115	1,66	4,56	0,84	18,48	0,12	12,69	10,28	1,02	1,57	1,23

Приложение Б

Температура (°C) и относительная влажность воздуха (%) в период наблюдений по данным метеостанции г. Березники



Приложение 3

Полевая влажность в аллювиальной солончаковой почве (разрез 14) из долины р. Черная

Период наблюдений	Глубина, см	Полевая влажность, %
17.06.22	10±2	13,9
	20±2	13,6
	30±2	12,9
	40±2	19,1
04.07.22	10±2	12,8
	20±2	13,1
	30±2	16,9
	40±2	15,4
14.07.22	10±2	12,4
	20±2	13,7
	30±2	14,0
	40±2	13,0
25.07.22	10±2	18,1
	20±2	15,1
	30±2	20,1
	40±2	18,8
02.08.22	10±2	17,2
	20±2	17,9
	30±2	17,6
	40±2	18,6
07.09.22	10±2	17,2
	20±2	18,8
	30±2	24,1
	40±2	17,8

Приложение И

Величина рН и Eh в аллювиальной солончаковой почве из долины р. Черная
(разрез 14)

Период наблюдений	Глубина, см	рН	Eh
17.06.22	10±2	6,90	185
	20±2	6,73	145
	30±2	7,04	-67
	40±2	7,03	-197
04.07.22	10±2	7,38	53
	20±2	7,36	42
	30±2	7,67	-79
	40±2	7,78	-167
14.07.22	10±2	6,90	25
	20±2	6,79	-36
	30±2	6,78	-103
	40±2	6,92	-144
25.07.22	10±2	6,76	175
	20±2	6,53	5
	30±2	7,52	-74
	40±2	7,55	-81
02.08.22	10±2	6,51	235
	20±2	6,56	251
	30±2	7,04	-74
	40±2	7,47	-90
07.09.22	10±2	7,09	230
	20±2	6,93	220
	30±2	6,68	-72
	40±2	6,23	-32

Приложение К

Полевая влажность в аллювиальной солончаковой почве (разрез 18) из долины р. Ленва

Период наблюдений	Глубина, см	Полевая влажность, %
04.07.22	10±2	25,6
	20±2	17,4
	30±2	12,7
	40±2	8,8
14.07.22	10±2	20,9
	20±2	12,6
	30±2	10,1
	40±2	9,7
25.07.22	10±2	28,2
	20±2	17,3
	30±2	14,0
	40±2	12,1
02.08.22	10±2	23,6
	20±2	16,0
	30±2	12,4
	40±2	12,9
07.09.22	10±2	31,6
	20±2	29,7
	30±2	18,6
	40±2	16,8

Приложение Л

Полевая влажность в аллювиальной солончаковой почве (разрез 19) из долины р. Ленва

Период наблюдений	Глубина, см	Полевая влажность, %
14.07.22	10±2	9,0
	20±2	11,1
	30±2	8,7
	40±2	10,3
25.07.22	10±2	12,5
	20±2	17,2
	30±2	13,6
	40±2	10,4
02.08.22	10±2	15,0
	20±2	11,2
	30±2	10,7
	40±2	12,6
07.09.22	10±2	15,5
	20±2	15,0
	30±2	13,9
	40±2	13,5

Приложение М

Величина рН и Eh в аллювиальных солончаковых почвах из долины р. Ленва

Период наблюдений	Глубина, см	Разрез 18		Разрез 19	
		рН	Eh	рН	Eh
04.07.22	10±2	2,90	482	нет данных	нет данных
	20±2	3,80	337	нет данных	нет данных
	30±2	5,71	68	нет данных	нет данных
	40±2	5,88	46	нет данных	нет данных
14.07.22	10±2	2,71	452	2,76	488
	20±2	4,11	174	3,08	436
	30±2	5,58	-4	4,02	285
	40±2	5,32	-19	4,58	223
25.07.22	10±2	2,67	526	2,96	507
	20±2	3,75	195	3,53	367
	30±2	5,31	-44	4,56	227
	40±2	5,88	-53	4,73	220
02.08.22	10±2	2,48	548	2,76	498
	20±2	3,89	220	2,98	428
	30±2	5,45	44	4,33	246
	40±2	5,40	-7	4,66	166
07.09.22	10±2	2,58	535	2,90	504
	20±2	2,99	309	3,38	391
	30±2	4,68	66	4,85	302
	40±2	5,32	-16	5,40	189