

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-2023

## Оглавление

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>4</b>
<b>ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>9</b>
<b>    1.1. Генезис, свойства и классификация засоленных почв.....</b>	<b>9</b>
1.1.1. Генезис и свойства засоленных почв .....	10
1.1.2. Классификации засоленных почв.....	13
1.1.3. Формирование и свойства техногенно-засоленных почв .....	19
<b>    1.2. Образование, свойства и классификация аллювиальных почв .....</b>	<b>23</b>
<b>    1.3. Сульфидогенез и общие представления о кислых сульфатных почвах .....</b>	<b>29</b>
<b>ГЛАВА 2. УСЛОВИЯ, ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....</b>	<b>34</b>
<b>    2.1. Природно-техногенные условия территории исследований.....</b>	<b>34</b>
<b>    2.2. Объекты исследований .....</b>	<b>41</b>
<b>    2.3. Методы исследований .....</b>	<b>48</b>
<b>ГЛАВА 3. РАЗВИТИЕ СОЛОНЧАКОВОГО ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ В АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ПОЧВАХ.....</b>	<b>50</b>
<b>    3.1. Галогенез аллювиальных почв возле рассоловодемных скважин XVI в.....</b>	<b>50</b>
<b>    3.2. Ионно-солевой состав поверхностных и подземных вод, формирующихся под влиянием отходов отвально-шламового хозяйства .....</b>	<b>61</b>
<b>    3.3. Характеристика техногенно засоленных аллювиальных почв .....</b>	<b>65</b>
3.3.1. Техногенно засоленные аллювиальные почвы в долине р. Быгель.....	65

3.3.2. Техногенно засоленные аллювиальные почвы в долине р. Черная.....	73
3.3.3. Техногенно засоленные аллювиальные почвы в долине р. Ленва.....	93
3.3.3.1. Свойства солончаковых почв с нейтрально-щелочной реакцией среды.....	93
3.3.3.2. Свойства солончаковых почв с сильно кислой реакцией среды ...	105
<b>3.4. Динамика полевой влажности, показателей pH и Eh в аллювиальных солончаковых почвах.....</b>	<b>115</b>
<b>3.5. Классификация техногенно засоленных аллювиальных почв .....</b>	<b>127</b>
<b>ВЫВОДЫ .....</b>	<b>129</b>
<b>Список литературы .....</b>	<b>130</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А .....</b>	<b>144</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....</b>	<b>145</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В .....</b>	<b>146</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....</b>	<b>147</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Д .....</b>	<b>149</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....</b>	<b>151</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Ж .....</b>	<b>152</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ З .....</b>	<b>153</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ И .....</b>	<b>154</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ К .....</b>	<b>155</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Л .....</b>	<b>156</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ М .....</b>	<b>157</b>

## 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 [Imettternicht, 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 [Лискова, 2017; Szabolcs, 1996; Gabbasova, Suleimanov, 2007; Artamonova et al., 2010].

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]. Засоление почв связано с производством солей, в частности соды [Grunewald et al., 2007; Hulisz et al., 2010]. В Польше вблизи Иновроцловского содового завода и его прудов-отстойников с отходами производства засоленные почвы образовались на площади 135 га [Hulisz et al., 2018].

Основной предпосылкой устойчивой засоленности почв в условиях умеренного гумидного климата служит регулярное поступление солей. В южной тайге Западной Сибири под воздействием артезианских минерализованных вод хлоридно-натриевого состава получил развитие солончаковый процесс. За 25-летний период воздействия подземных вод почвы первой надпойменной террасы и высокой поймы трансформировались в солончаки хлоридно-натриевые со слабощелочной и щелочной реакцией. В

пределах низкой поймы сформировались аллювиальные солончаковые почвы [Якимов и др., 2014].

Калийное производство на Верхнекамском месторождении солей сопровождается накоплением отходов, суммарное их количество к настоящему времени достигло 425 млн т. Наряду с твердыми галитовыми отходами, складируемыми на поверхности в виде солеотвалов, применяемые технологии сопровождаются образованием значительных объемов глинисто-солевых шламов и избыточных рассолов, для хранения которых требуется сооружение шламохранилищ [Бобошко, Бачурин, 2004]. Ранее исследовано состояние почвенного покрова возле солеотвалов в городах Соликамск и Березники [Еремченко и др., 2013]. Фильтрационные утечки рассолов ПАО «Уралкалий», по официальным данным, достигают сотни тысяч кубометров в год. Объем их разгрузки в поверхностную гидросеть весьма значителен. Настоящая работа посвящена образованию засоленных аллювиальных почв вследствие поступления минерализованных вод в долины малых рек таежно-лесной зоны Пермского края.

Цель исследований – выявление особенностей развития солончакового процесса в аллювиальных почвах таежно-лесной зоны под влиянием минерализованных вод от отвально-шламового хозяйства ПАО «Уралкалий».

#### **Основные задачи исследования:**

1. Изучить морфологическое строение профиля и установить общее количество водорастворимых солей, степень и химизм засоления аллювиальных почв.

2. Определить основные физико-химические и химические свойства (рН, обменные катионы, карбонаты, гипс, гумус) аллювиальных почв, находящихся в зонах влияния минерализованных вод.

3. Проследить динамику кислотно-щелочных (рНвод) и окислительно-восстановительных (Eh) условий в аллювиальных солончаковых насыщенных и ненасыщенных почвах.

**Научная новизна.** В результате проведенных исследований получены новые данные о строении и основных свойствах почв, формирующихся под воздействием минерализованных вод, фильтрующихся от отвально-шламового хозяйства ПАО «Уралкалий». Установлены особенности солончаковых почв с сильнокислой реакцией почвенной среды. Впервые определено систематическое положение почв в соответствии с современными классификациями почв РФ и мира.

**Теоретическое и практическое значение работы.** Полученная информация способствует углублению знаний по проблеме современного галогенеза в аллювиальных почвах таежно-лесной зоны. Эти сведения приобретают особое значение в связи с глобальным потеплением и ростом объемов солевых отходов. Впервые установлены площади, занимаемые солончаковыми аллювиальными почвами в долинах трех малых рек Прикамья, расположенных в зоне влияния отвально-шламового хозяйства. Внесены предложения по уточнению международной классификации техногенно засоленных почв.

Материалы исследований используются в учебном процессе на биологическом факультете в преподавании дисциплин «Почвоведение», «Экология почв», «Антропогенные почвы».

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

1. Степень и химизм засоления, реакция почвенной среды и состав обменных оснований, образование карбонатов и гипса в аллювиальных почвах малых рек Прикамья обусловлены количеством и составом солей в почвенно-грунтовых водах, формирующихся под влиянием отвально-шламового хозяйства ПАО «Уралкалий».

2. Формирование аллювиальных солончаковых почв с резкокислой реакцией среды связано с чередованием восстановительных и окислительных условий, благоприятствующих развитию процессов окисления-восстановления железа ( $\text{Fe}^{3+} \leftrightarrow \text{Fe}^{2+}$ ) и серы ( $\text{S}^{6+} \leftrightarrow \text{S}^{2-}$ ).

**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.

**Объем и структура научного доклада об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации).** Диссертация изложена на 157 страницах машинописного текста и состоит из введения, трех глав, выводов, списка литературы и приложений. Содержит в основной части 42 рисунка и 9 таблиц. Список литературы включает 127 источников, в том числе 48 источников на иностранных языках. Приложения содержат 9 таблиц и 2 рисунка.

Автор выражает огромную благодарность научному руководителю, профессору, доктору биологических наук О.З. Еремченко за неоценимую помощь и поддержку. Автор признателен доценту И.Е. Шестакову за участие в сборе полевого материала, а также за предоставление некоторых рисунков, использованных в настоящей работе.

## 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]. 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; 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.

Соленакопление 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 солового 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, микрооструктуренность 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. Солонцовский 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. Солончаковый процесс в классическом виде – это накопление в верхней части профиля почвы легкорастворимых в воде солей. Он проявляется в климатических условиях с коэффициентом увлажнения менее 1,0. Солончаковый процесс развивается при выпотном водном режиме, когда количество выпадающих осадков меньше способности почвы и растений расходовать влагу [Ямнова и др., 2005; Засоленные почвы..., 2006; Почвообразовательные процессы, 2006; Родикова, 2007].

Образование солонцов происходит в результате комплексного проявления нескольких почвообразовательных процессов: солонцовский, осолодение, элювиально-иллювиальная дифференциация профиля почвы, дерновый, выщелачивание. *Солонцовский процесс* связан с внедрением в почвенный поглощающий комплекс обменных ионов натрия. При этом происходит подщелачивание среды до pH 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; 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 непромывным 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].

### **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 [2015].

### 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).

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 почв России

Данная классификация является субстантивно-генетической, т.к. в основе ее диагностики превалируют 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 галоморфные почвы, а солонцы – к отделу щелочно-глинисто-дифференцированные почвы.

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, расположенной 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-дифференцированные почвы объединяет почвы, в профиле которых обязательно присутствует солонцовский или темносолонцовский горизонты.

Солонцы разделяют на типы по характеру поверхностного (солонцово-элювиального, тёмногумусового или светлогумусового) горизонта, его сочетаний с тёмносолонцовским 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 гидрометаморфизма, механического нарушения системы надсолонцовых горизонтов типы солонцов темных, солонцов светлых, солонцов темногумусовых и солонцов светлогумусовых делятся на 3 подтипа: типичные, гидрометаморфизированные, 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, магниево-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 – гипсосодержащие (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 солноцов – 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) – сильнонасыщенные ( $<30$ ), 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..., 2015].

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  $\leq 50$  см от поверхности, при этом почвы не должны иметь горизонта *thionic*, начиная с глубины  $\leq 50$  см от поверхности почвы и не находящиеся 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 *natic*, находящимся в толще  $\leq 100$  см от поверхности почвы. Горизонт *natic* – 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]. Также 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].

Как уже отмечалось выше, в природных условиях накопление солей в почвах возможно лишь в том случае, если испаряемость преобладает над количеством осадков, что соответствует условиям аридного климата. Специфика техногенного засоления заключается в том, что оно имеет место в почвах гумидных территорий. Накопление солей в почвах 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 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 сольнозасоленные среднесуглинистые почвы на карбонатной морене. В краевых частях разливов, где техногенная трансформация почв минимальна – формируются незасоленные дерново-подзолистые среднемощные 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 pH 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 сольнозасоленные 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 [Белкин, 2008, Голубцова, Карманова, 2015; Лискова, 2017; Хайрулина и др., 2017].

Объекты отвально-шламового хозяйства являются постоянным источником загрязнения гидросфера – 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. 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.

Экологические риски, связанные с фильтрацией рассолов и развитием солончакового почвообразования в долинах речной сети Прикамья, пока исследованы слабо.

## **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 непременным 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 прирусовой приподнятой части (или прирусового вала), центральной наиболее выровненной части и притеrrасного понижения. Не имеют выраженных пойм лишь мелкие горные реки. В прирусовой 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 прирусовой части поймы. Соответственно в приrusовые откладывается наиболее грубый галечниково-песчаный аллювий. В центральной части поймы аллювий более тонкий, пылевато-суглинистый. В притеrrасном 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 выпадают 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  $\text{Fe}^{3+}$  преобладает над  $\text{Fe}^{2+}$ . 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 оструктурность 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  $\text{Fe}^{3+}$  в верхней части профиля, а  $\text{Fe}^{2+}$  – в нижней. Они часто конкреционны: содержат железисто-марганцевые 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 старицных 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),  $\text{Fe}^{2+}$  резко преобладает над  $\text{Fe}^{3+}$ . 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 аллювиальных 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 подтипов – 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  $\geq 25$  см, начиная с глубины  $\leq 25$  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..., 2015].

### **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 сильно восстановительной 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

отсутствии карбонатов серная кислота разрушает силикаты, что приводит к оглиниванию почвы [Глазовская, 2007].

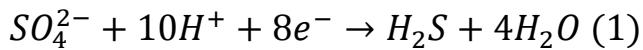
В отечественной литературе сольнозасоленные почвы с кислой реакцией среды относят к соровым (шоровым) сульфидным солончакам. Данные почвы формируются в гидроморфных условиях, как правило, на днищах периодически высыхающих соленых озер. Грунтовые воды залегают на глубине 0,5-1,0 м, сезонно выходят на 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 почв..., 1977; Классификация почв..., 2004]. Эти солончаки с сернокислым типом засоления характеризуются  $pH < 3$ .

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].

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 ( $\leq 4$ ). 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 ( $\geq 400$  мВ) и очень низких значениях pH ( $\leq 4$ ) [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 ( $SO_4^{2-}$ ), который восстанавливается до сульфида в соответствии с уравнением (1). Этот процесс получил название сульфатредукция:



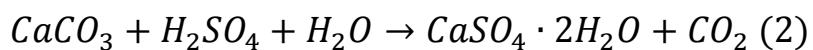
Осуществлять сульфатредукцию способны около 15 родов бактерий, включая *Desulfovibrio*, *Desulfotomaculum* и *Desulfobacter*. Необходимо отметить, что температурный оптимум для большинства сульфатредуцирующих бактерий находится в диапазоне 30–40°C, поэтому максимальная скорость снижения содержания сульфатов 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 катализмов (засуха, тектонический подъем и т.д.). При высоком pH окисление сульфида осуществляется кислородом, но при низких значениях pH 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<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, в свою очередь, разрушает минеральную матрицу почв, мобилизуя металлы, такие как железо (Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>), алюминий (Al<sup>3+</sup>) 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<sub>3</sub>, 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 [Andriesse, 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 почвоведами 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 ( $+17,9^{\circ}\text{C}$ ) (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 (рисунок 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 (рисунок 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.

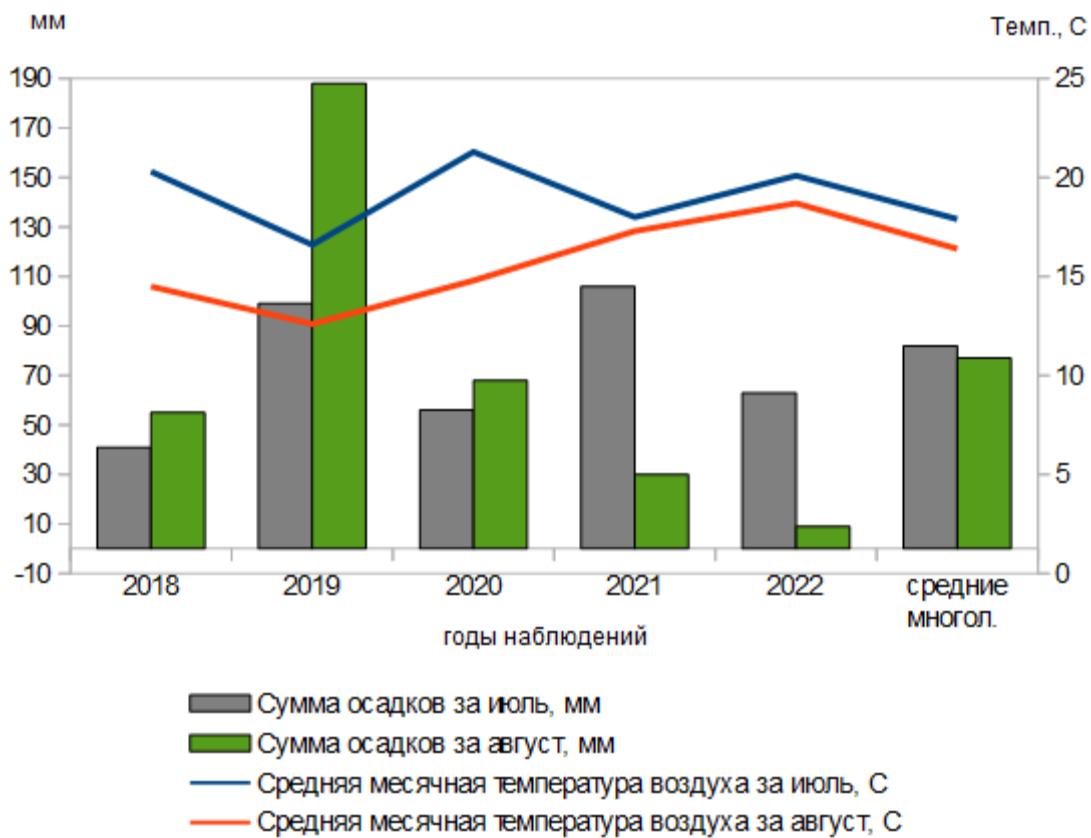


Рисунок 1 – Метеорологические показатели (количество осадков, средняя месячная температура воздуха в июле и августе) в сравнении со средними многолетними данными [по данным метеостанции г. Березники]

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 марта. 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, Предуральского 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 [Сафоницкий, 1959; Коротаев, 1962; Борисевич, 1968; Оленев, Горчаковский, 1969].

Средняя густота долинной (речной) сети в Пермском крае составляет 0,6-0,8 км/км<sup>2</sup> (суммарная протяженность речных долин на площади в 1 км<sup>2</sup>). 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 [Сафоницкий, 1959; Коротаев, 1962; Борисевич, 1968; Оленев, Горчаковский, 1969].

Верхнекамское месторождение солей приурочено к центральной части Соликамской впадины Предуральского краевого прогиба. Соляная толща месторождения, имеющая форму линзы площадью 8,1 тыс. км<sup>2</sup>, 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. км<sup>2</sup>.

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 каменнойсоли – 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%), CaSO<sub>4</sub>, MgCl<sub>2</sub>, 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<sub>4</sub>, MgCl<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O.

Карналлитовая порода состоит из карналлита (KCl\*MgCl<sub>2</sub>\*6H<sub>2</sub>O) 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 [Коротаев, 1962].

*Почвы и почвообразующие породы.* В Березниковском районе достаточно широкая полоса по левобережью Камы относится к Чердынско-Гайнско-Соликамскому району песчаных и супесчаных подзолистых и дерново-подзолистых и торфяно-болотных почв. Основная часть Березниковского района, как и территория с. Усть-Игум, входит в Кудымкарско-Чермозский район дерново-сильно- и среднеподзолистых тяжелосуглинистых почв [по Коротаев, 1962].

Территория данного района сложена красноцветными глинами с прослойками мергеля и известняков татарского яруса верхней перми, которые перекрыты покровными глинами и суглинками. Преобладающими

почвами являются подзолистые и дерново-сильногумусные и среднеподзолистые тяжело- и (редко) среднесуглинистого гранулометрического состава с пятнами дерново-слабоподзолистых и дерново-карбонатных почв. В пониженных местах – почвы торфяно-болотные. В долинах многих рек – почвы аллювиально-дерновые и дерново-луговые глееватые глинистого и тяжелосуглинистого механического состава (рисунок 2) [Коротаев, 1962; Почвенная карта..., 1979.; Филькин и др., 2014].

*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].

*Техногенные условия.* Город Березники – крупный промышленный центр, второй по величине город Пермского края. Площадь города – 525 км<sup>2</sup>, 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, титано-магниевого, 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, титано-

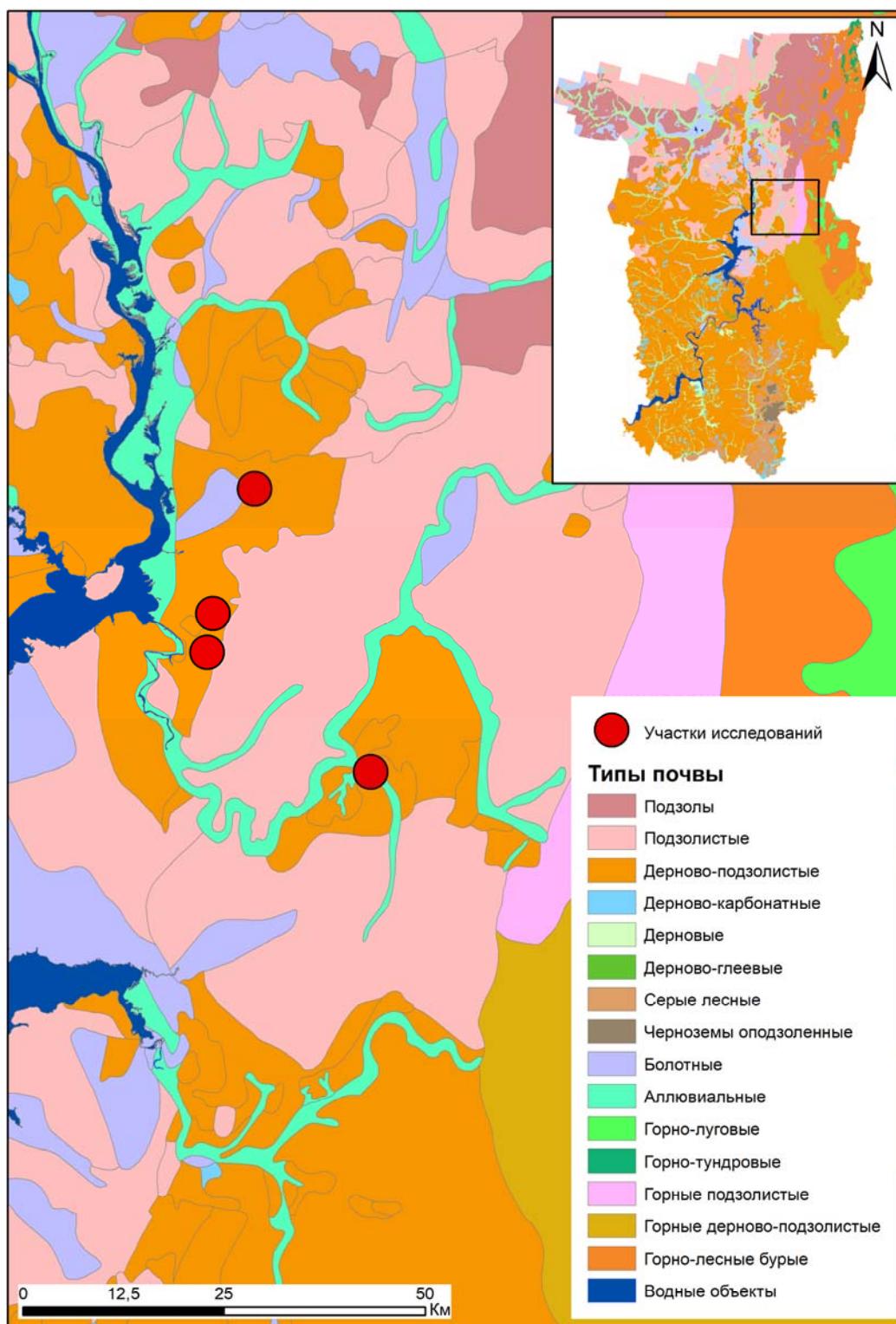


Рисунок 2 – Карта почв района исследований (фрагмент карты почвенного покрова Пермского края [Филькин и др., 2014])

магниевый 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. влился 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-Верхневычегодскую, Вятско-Камскую, Прикамскую почвенные провинции и Уральский почвенный округ (рисунок 3). Объекты исследований расположены в Вятско-Камской почвенной провинции.

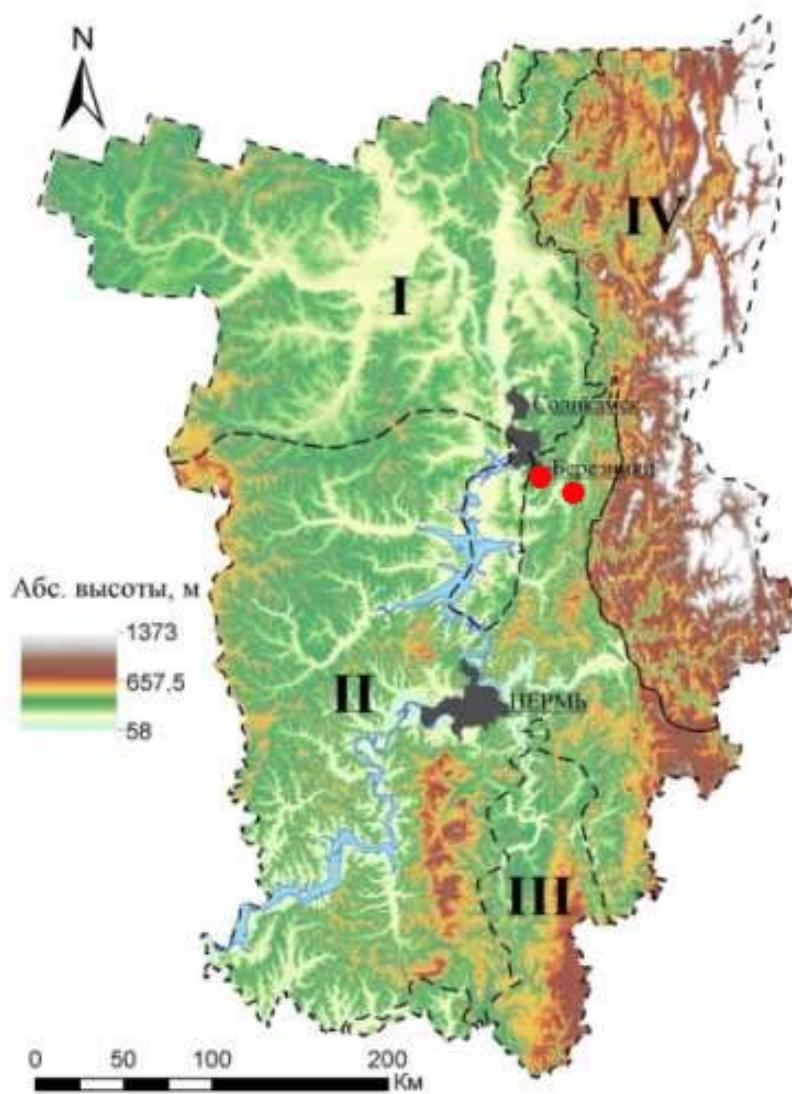


Рисунок 3 – Почвенно-экологическое районирование территории Пермского края; кружками отмечены места проведения исследований  
[автор рисунка Шестаков И.Е.].

Усл. обозн.: Почвенные провинции: I – Камско-Верхневычегодская, II – Вятско-Камская, III – Прикамская, IV – Уральский почвенный округ

Объектами исследований были аллювиальные почвы, находящиеся под влиянием минерализованных грунтовых вод, мигрирующих от шламохранилищ и солеотвалов и выклинивающихся в долинах малых рек Ленва, Черная и Быгель. Воздействие соленых вод, изливающихся из древних рассолоподъемных скважин в течение нескольких столетий, на почвы исследовали в долине р. Усолка близ села Усть-Игум.

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 (рисунок 4).

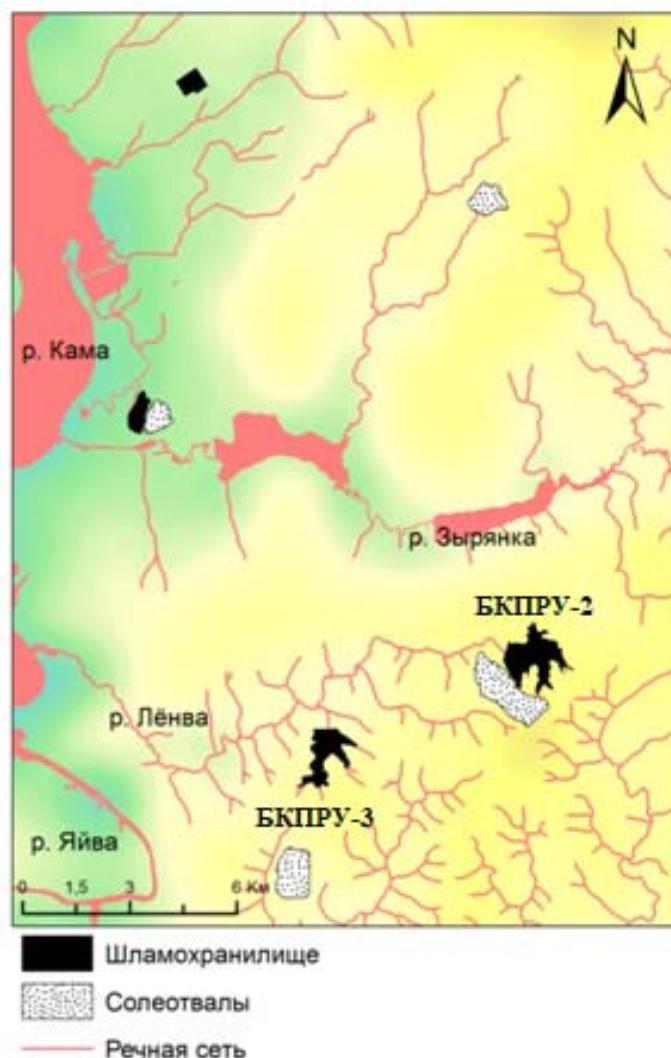


Рисунок 4 – Расположение солеотвалов и шламохранилищ ПАО «Уралкалий» (автор рисунка Шестаков И.Е.)

В 2018-2022 гг. в долинах рек Усолка, Черная, Быгель, Ленва были изучены почвы в 19 разрезах, заложенных до глубины водонасыщенных грунтов. Расположение почвенных разрезов 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 диагностику почв провели в соответствии с современной классификацией почв [Классификация почв..., 2004] и мировой корреляционной базой почвенных ресурсов [WRB, 2015]. Для исследования химического состава поверхностных и почвенно-грунтовых вод взяли 14 проб воды.

На берегах р. Усолка возле двух рассолоподъемных скважин, функционирующих, по мнению археологов, с XVI в. (рисунок 5) были заложены четыре почвенных разреза; отобраны почвенные пробы и пробы вод, изливающихся из рассолоподъемных скважин.

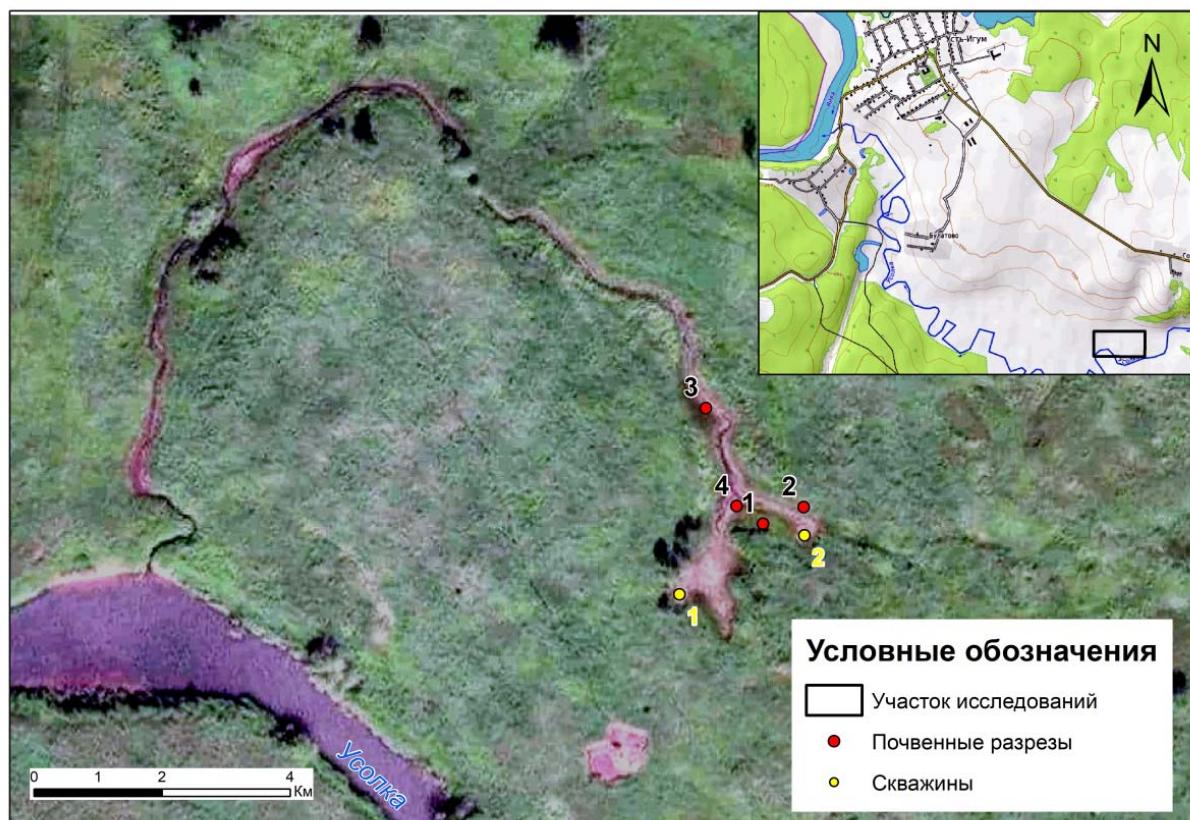


Рисунок 5 – Расположение почвенных разрезов в долине р. Усолка

В долине малой реки Быгель под воздействием подземных минерализованных вод, сформированных на территории солеотвала Березниковского калийного производственного рудоуправления №4 (БКПРУ №4), сформировался засоленный участок. Для исследований были заложены два почвенных разреза (рисунок 6); взяты две пробы почвенно-грунтовых вод.

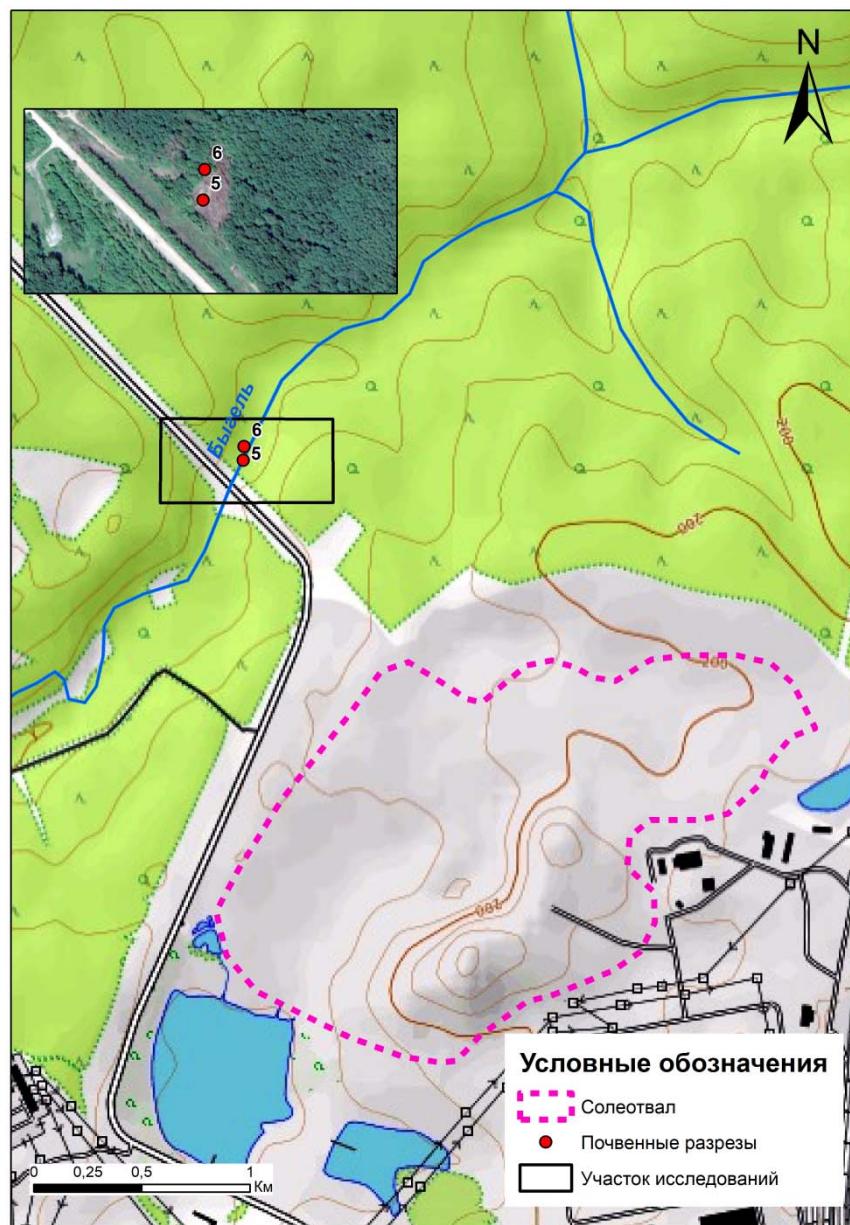


Рисунок 6 – Расположение почвенных разрезов в долине р. Быгель

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 (рисунок 7), а также взяты пробы воды из р. Черная, ручья с соленой водой и три пробы почвенно-грунтовых вод.

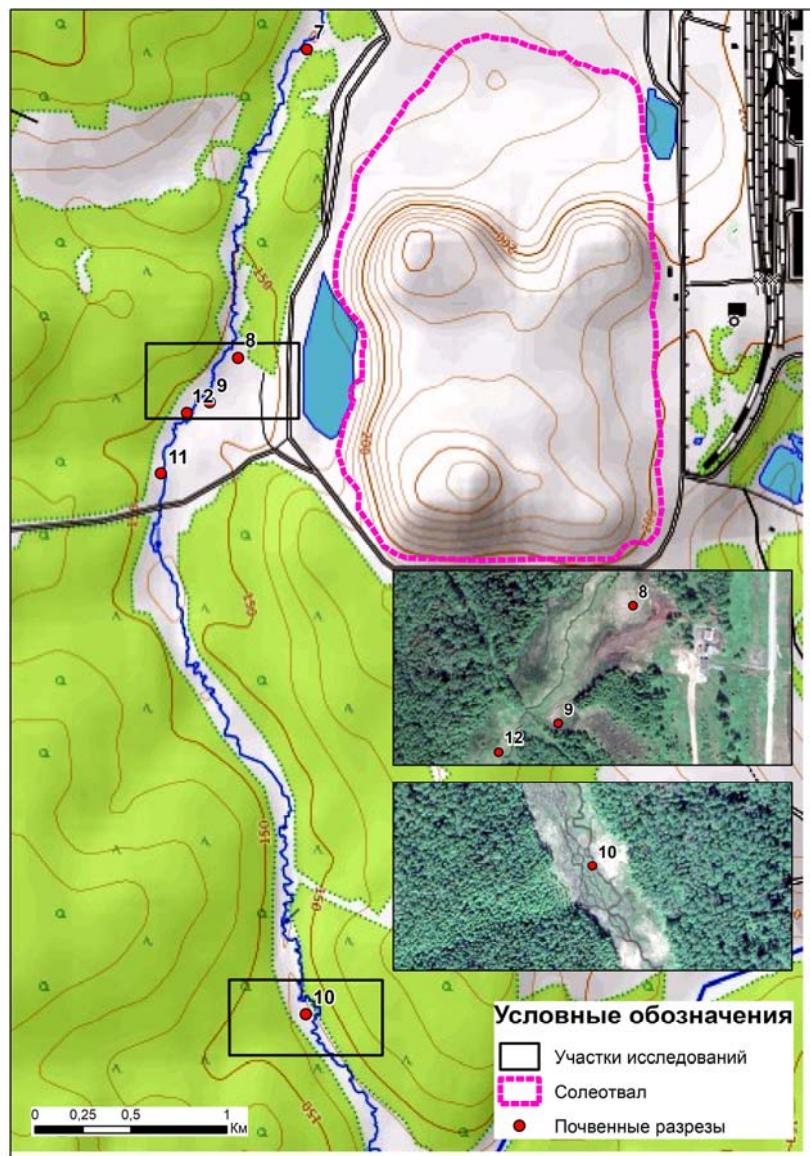


Рисунок 7 – Расположение почвенных разрезов в долине р. Черная

На территории исследований в долине 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. В соответствии с растительностью и рельефом в долине реки выделены семь контрольных участков, в пределах которых закладывали почвенные разрезы до глубины водонасыщенных грунтов (рисунок 8). Отобраны пробы воды из шламохранилища БКПРУ-3, из р. Ленва, из мелководного водоема в заболоченной части поймы, а также две пробы почвенно-грунтовых вод.



Рисунок 8 – Расположение почвенных разрезов в долине р. Ленва

### 2.3. Методы исследований

В образцах почв определяли:

- содержание углерода органических соединений (гумуса) – титриметрическим методом, вариант Тюрина;
- $\text{pH}_{\text{вод}}$ ,  $\text{pH}_{\text{сол}}$  – потенциометрическим методом;
- гидролитическая кислотность – по методу Каппена;
- состав обменных катионов – методом Пфеффера в модификации Молодцова и Игнатовой;
- 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]:  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$  – пламенно-фотометрическим методом,  $\text{Cl}^-$  – аргентометрическим методом по Мору,  $\text{SO}_4^{2-}$  – гравиметрическим (весовым) методом;  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  – комплексонометрическим методом, сумма солей (%) и сумма токсичных солей (%) – расчетным методом.

По результатам лабораторных исследований уточнили диагностику почвенных горизонтов, классификационное положение аллювиальных почв в соответствии с современной классификацией почв РФ [Классификация и диагностика почв..., 2004] и мировой реферативной базой почвенных ресурсов [WRB, 2015].

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

В 2022 г. на контрольных участках в долинах р. Черная и Ленва провели наблюдения за динамикой показателей  $\text{pH}$  и  $\text{Eh}$  в почвах – потенциометрическим методом с помощью портативного  $\text{pH}$  метра HI-9125

(Hanna Instruments, Германия), оборудованного электродами редокс HI 3230, pH HI 1230, и термокомпенсатором, на глубинах  $10\pm2$ ,  $20\pm2$ ,  $30\pm2$ ,  $40\pm2$  см – в трехкратной повторности. 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 pH были обработаны методом регрессионного анализа; адекватность полученных уравнений оценили при уровне значимости нулевой гипотезы  $P < 0,05$ .

## ГЛАВА 3. РАЗВИТИЕ СОЛОНЧАКОВОГО ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ В АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ПОЧВАХ

### 3.1. 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 (таблица 1), 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 1 – Содержание ионов в водах, изливающихся из рассолоподъемных скважин поймы р. Усолка, ммоль(экв)/л

№ скважины	pH	M*, г/л	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
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, значительным было содержание сульфат-ионов, на долю которых приходилось около 13% от суммы анионов, содержание калия было очень низким в связи с тем, что рассолоподъемные скважины находятся за пределами месторождения калийных солей (рисунок 9).

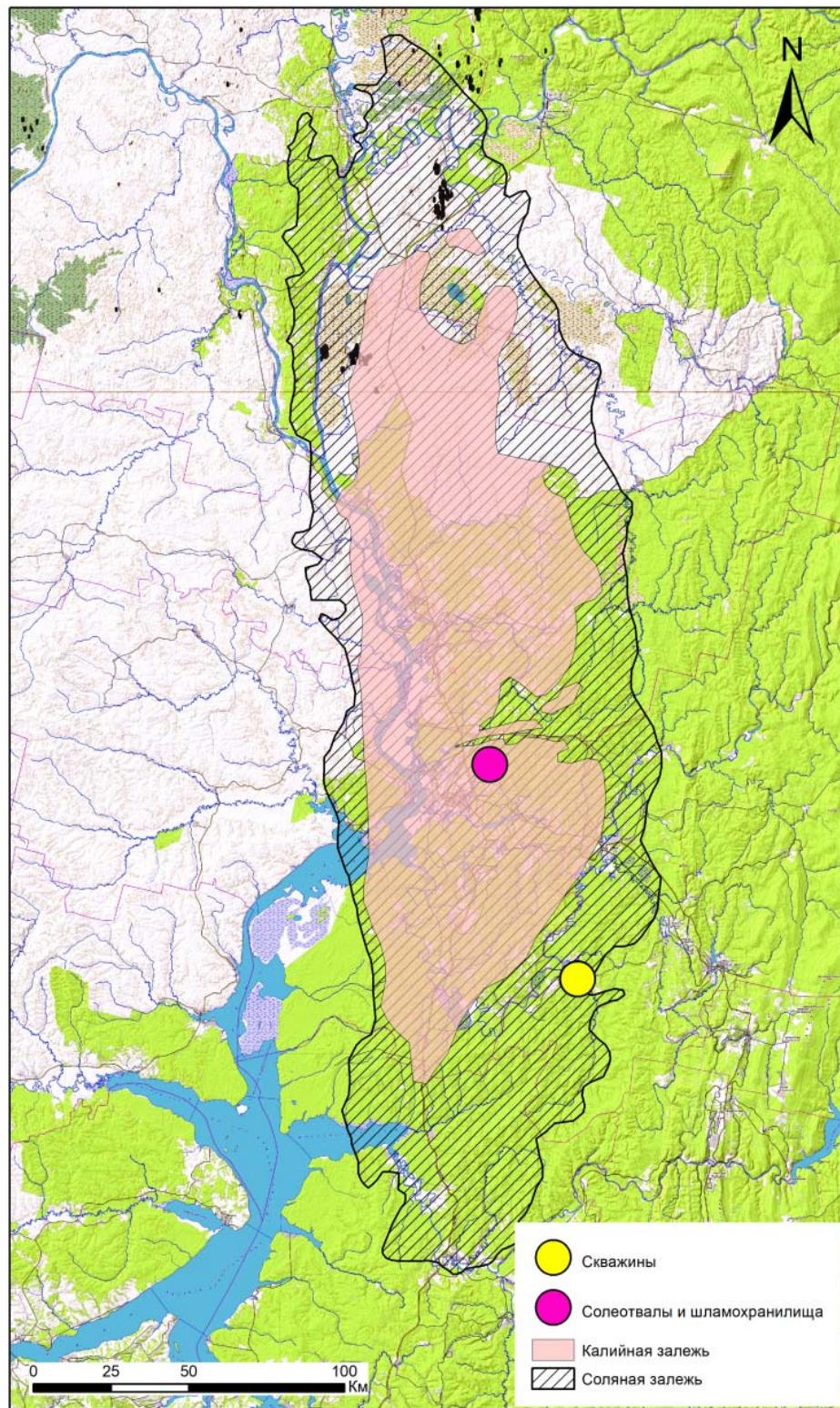


Рисунок 9 – Расположение рассолоподъемных скважин, солеотвалов и шламохранилищ в границах калийной и соляной залежей [Кудряшов, 2013]

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.

На расстоянии 3-5 м от русла реки Усолка, в которую изливаются воды из рассолоподъемных скважин, под лугово-болотной растительностью заложены три разреза на аллювиальных гумусовых глееватых солончаковых почвах. Разрезы 1 и 2 расположены на расстоянии 20-25 м от рассолоподъемной скважины 1 и на 8-12 м от скважины 2. Разрез 3 находился на расстоянии около 70 м от скважин. Грунтовые воды в разрезах залегали на глубине 90-100 см. Внешний вид почв представлен на рисунках 10-12.

Почва из разреза № 1 (рисунок 10) имела следующее морфологическое строение:

AYs,g – серогумусовый горизонт, 0-15/15 см, густо переплетен корнями, бесструктурный, темно-бурый, сырой, тяжелосуглинистый, переход постепенный.

AY/Cs,g – серогумусовый переходный к породе, 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.

C/Gs<sup>~~</sup> – засоленная глеевая почвообразующая 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.

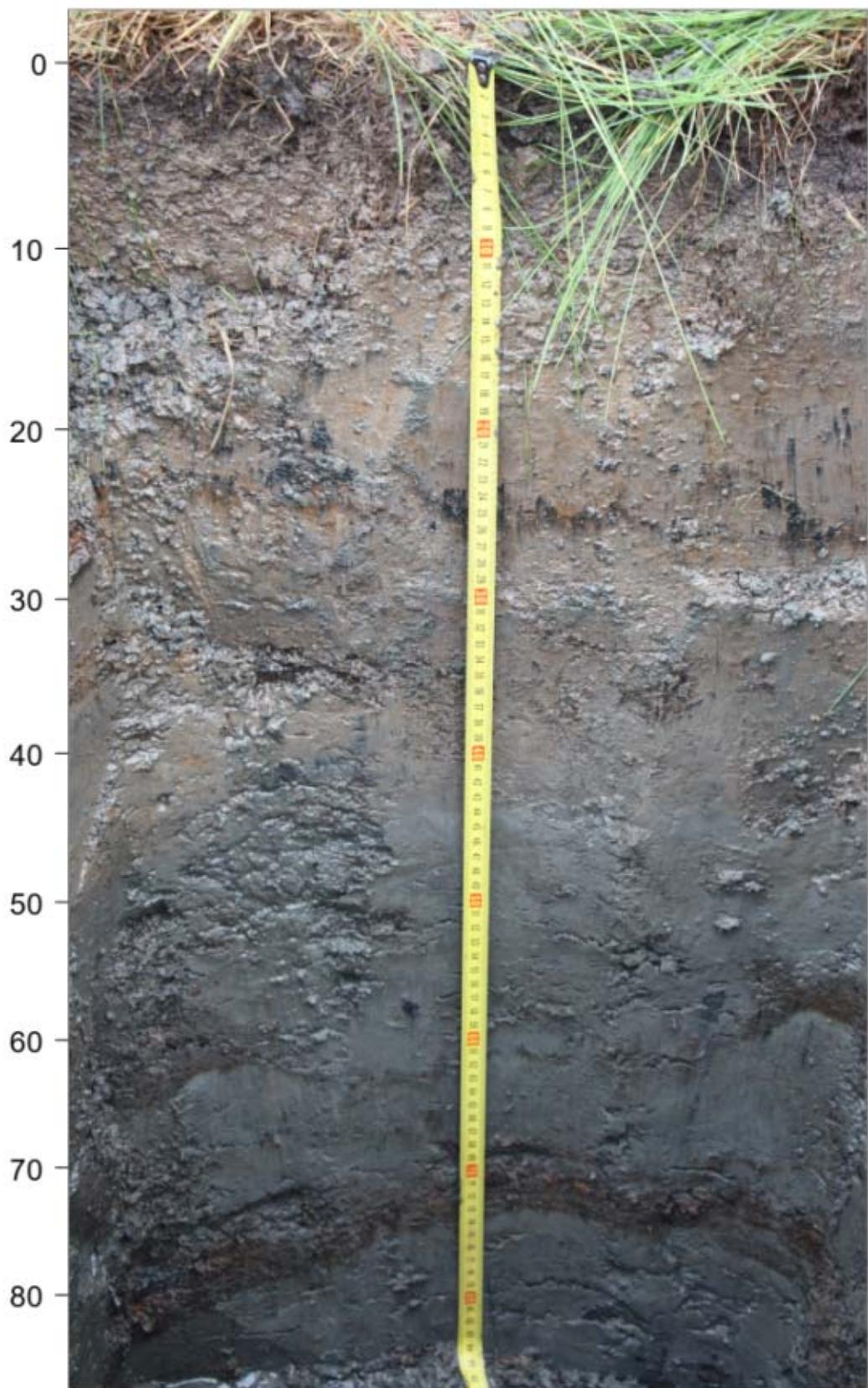


Рисунок 10 – Аллювиальная гумусовая глееватая солончаковая почва в долине р. Усолка (разрез 1)

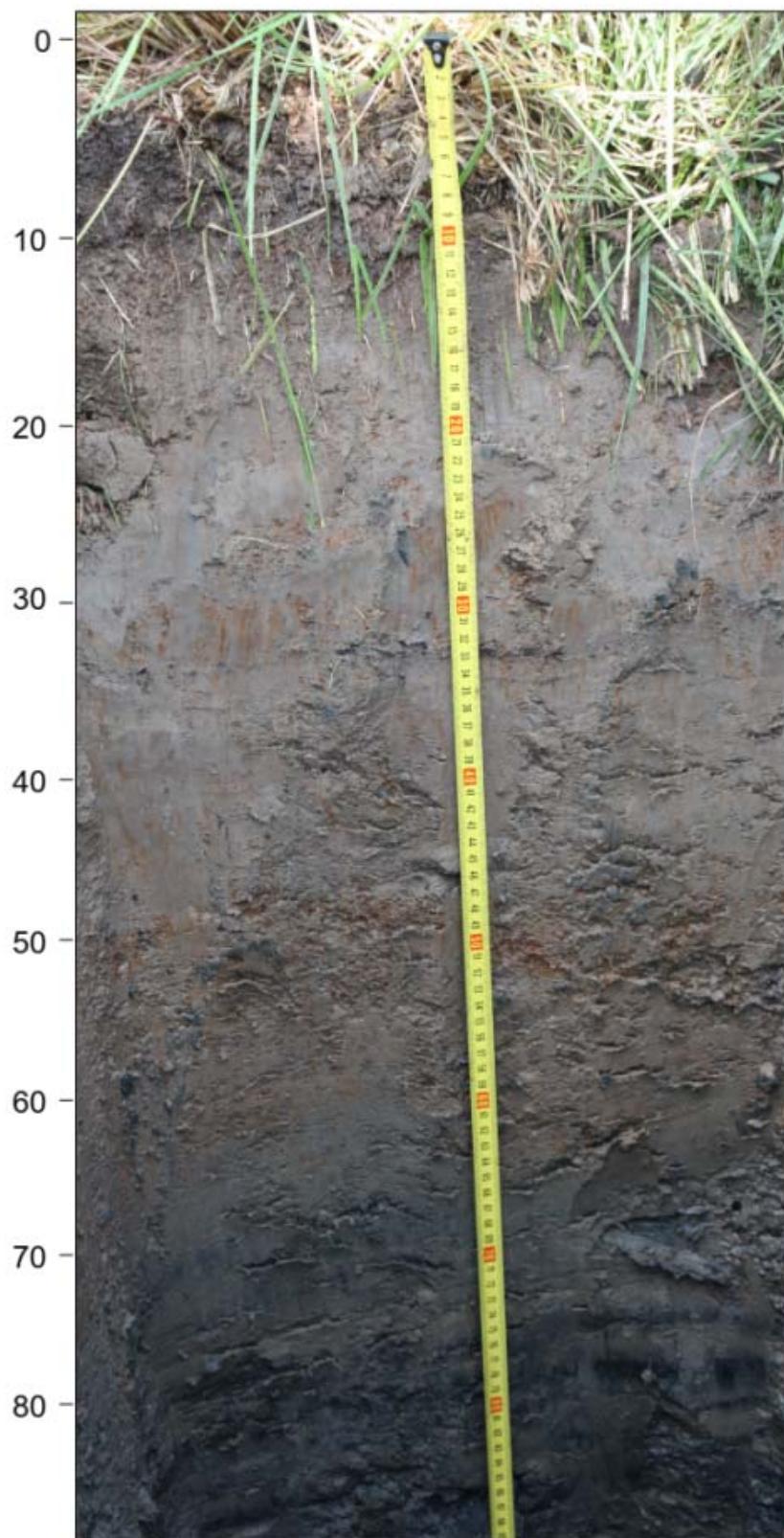


Рисунок 11 – Аллювиальная гумусовая глееватая солончаковая почва в долине р. Усолка (разрез 2)

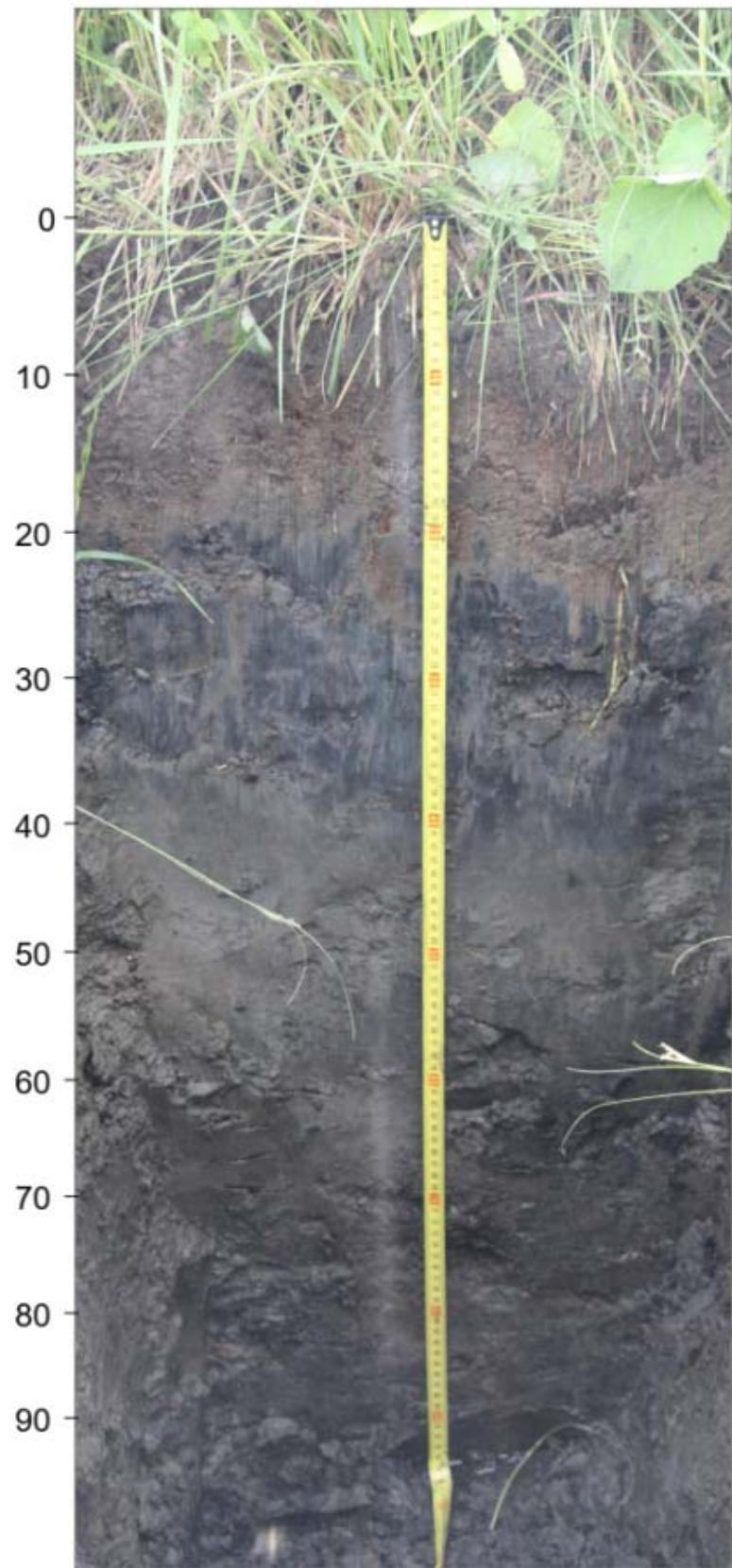


Рисунок 12 – Аллювиальная гумусовая глееватая солончаковая почва в долине р. Усолка (разрез 3)

Почва из разреза № 2 (рисунок 11) имела следующее морфологическое строение:

AYs,g – серогумусовый горизонт, 0-20/20 см, густо переплетен корнями растений, бесструктурный, темно-бурый, влажный, тяжелосуглинистый, переход постепенный.

AY/Cs,g – серогумусовый переходный к породе, 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.

C/Gs<sup>~</sup> – аллювиальная 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 (рисунок 12) имела следующее морфологическое строение:

AYs,g – серогумусовый горизонт, 0-22/22 см, темно-бурый, структура порошистая, густо переплетен корнями растений, суглинистый, влажный, переход постепенный

AY/Cs,g – серогумусовый переходный к породе, 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.

C/Gs<sup>~</sup> – засоленная глеевая почвообразующая 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 рассоловодных скважин, был описан солончак вторичный по аллювиальной гумусовой глееватой почве (разрез № 4):

S/AYg – солончаковый оглеенный 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.

C/Gs – аллювиальная 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 техногенного  $\text{Ca}^{2+}$  с  $\text{CO}_2$  биохимического происхождения приводит к появлению карбонатов в твердой фазе почв. Профильное распределение карбонатов отражает современное функционирование почв так же, как это характерно для черноземов [Глазовская, 1981; Почвообразовательные процессы, 2006].

В целом можно утверждать, что в профиле аллювиальных почв, находящихся под воздействием минерализованных вод в течение нескольких столетий, появились морфологические признаки развития галогенеза в виде новообразований мелкокристаллического гипса и вскипания от соляной кислоты. Кроме того, 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 сульфидов [Перельман 1966; Глазовская, 2007; Rabenhorst et al., 2012].

При установлении в почве окислительных условий  $H_2S$  может окисляться с образованием серной кислоты, которая вступит в реакцию с минеральной частью почвы. В случае если почва содержит карбонаты кальция, то они будут замещены гипсом. Если карбонаты в почве отсутствуют, то серная кислота начнет разрушать минеральную матрицу почвы, что приведет к оглиниванию и образованию железистых пленок на поверхности минеральных частиц [Перельман 1966; Глазовская, 2007; Rabenhorst et al., 2012].

В водной вытяжке из аллювиальных почв (рисунок 13, приложение Б) среди анионов меньше всего гидрокарбонатов ( $0,8\text{--}1,7$  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  $K^+$  ( $0,1\text{--}0,5$  ммоль(экв)/100 г). Химизм засоления почв по соотношению катионов – натриевый, по соотношению анионов – сульфатно-хлоридный.

Аллювиальные почвы в пойме р. Усолка содержат легкорастворимые соли в токсичных количествах (приложение Б), в том числе в гумусовом горизонте –  $0,31\text{--}0,56\%$ . 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.

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.

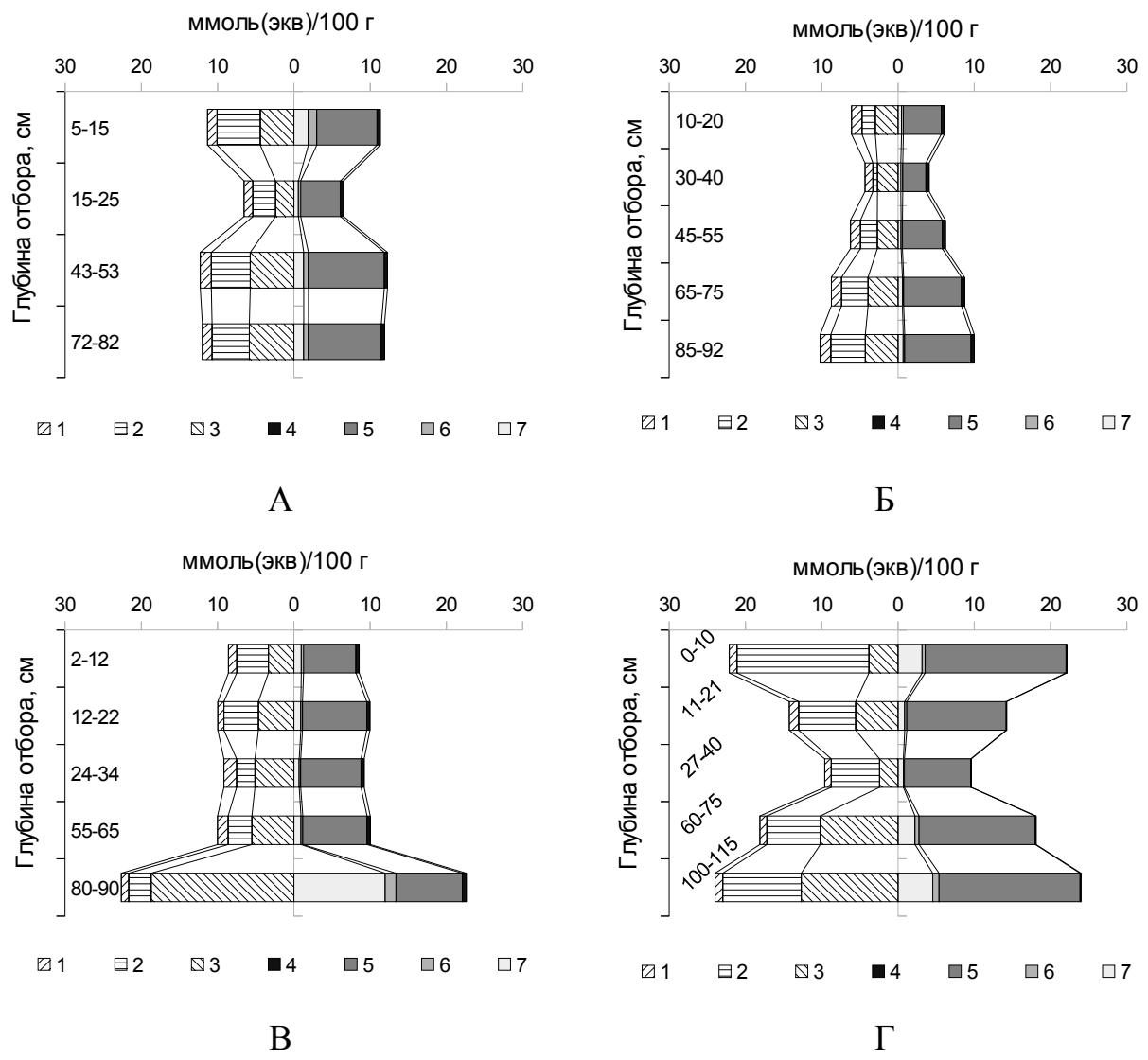


Рисунок 13 – Содержание ионов (1 –  $\text{HCO}_3^-$ ; 2 –  $\text{Cl}^-$ ; 3 –  $\text{SO}_4^{2-}$ ; 4 –  $\text{K}^+$ ; 5 –  $\text{Na}^+$ ; 6 –  $\text{Mg}^{2+}$ ; 7 –  $\text{Ca}^{2+}$ ) в водных вытяжках из почв в долине р. Усолка: А – разрез 1, Б – разрез 2, В – разрез 3, Г – разрез 4

Почвы характеризуются нейтральной и слабощелочной реакцией среды (таблица 2). Содержание органического углерода низкое, в гумусовом горизонте – 1,5-1,8%. Емкость катионного обмена составляла 17-23 ммоль(экв)/100 г почвы. В составе обменных катионов больше всего  $\text{Ca}^{2+}$ ; доля  $\text{Na}^+$  в гумусовом горизонте колебалась в пределах 33-41%. Соответственно по его содержанию почвы являются многонатриевыми. Все горизонты почв содержали небольшое количество карбонатов (1-2,9%). Гипс

Таблица 2 – Физико-химические и химические свойства вторично засоленных почв в долине реки Усолка

№ разреза	Глубина, см	С <sub>опр</sub> , %	рН <sub>вод</sub>	рН <sub>сол</sub>	Обменные катионы, ммол(экв)/100 г				ЕКО, ммол(экв)/ 100 г	%	
					Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>		CO <sub>2</sub> 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	-
	11-21	-	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.

присутствовал во всех горизонтах в пределах 1-3%, только при наличии гипсовых стяжений его количество возросло до 11% (таблица 2).

Исследуемые вторично засоленные почвы поймы 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, 2015]:

разрез 1 – аллювиальная гумусовая глееватая сульфатно-хлоридная натриевая карбонатсодержащая гипссодержащая насыщенная солончаковая сильнозасоленная многонатриевая почва; Sodic Gleyic Fluvisols (Loamic, Salic);

разрез 2 – аллювиальная гумусовая глееватая хлоридная натриевая карбонатсодержащая гипссодержащая насыщенная солончаковая сильнозасоленная многонатриевая почва; Sodic Gleyic Fluvisols (Loamic, Salic);

разрез 3 – аллювиальная гумусовая глееватая сульфатно-хлоридная натриево-кальциевая карбонатсодержащая гипссодержащая насыщенная солончаковая сильнозасоленная многонатриевая почва; Gypsic Sodic Gleyic Fluvisols (Loamic, Salic);

разрез 4 – солончак вторичный сульфатно-хлоридный натриевый насыщенный карбонатсодержащий гипссодержащий средненатриевый по аллювиальной гумусовой глеевой почве; Sodic Fluvic Gleyic Solonchak (Loamic, Hypersalic).

### **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 и Ленва. В северном направлении от шламонакопителя 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 [Бабошко, Бачурин, 2004].

Соли и микропримеси, накапливаемые в отвалах, под влиянием эрозии и инфильтрации поступают со сточными водами в поверхностные и подземные водотоки. Соли из шламонакопителей за счет инфильтрации поступают в подземные воды и разгружаются в местные дрены [Максимович и др., 2010].

Почвенно-грунтовые воды в долине р. Быгель, залегающие на глубине 90-120 см, по степени минерализации относятся к рассолам [Овчинников, 1970; Классификация почв, 1977] (таблица 3). Согласно А.И. Перельману [1982] грунтовые воды относятся к классу слабокислых вод. Среди анионов в них преобладали хлориды, в составе катионов доминировали  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$ . Таким образом, химизм вод был хлоридным калиево-натриевым.

Таблица 3. Содержание ионов в подземных водах долины р. Быгель,  
ммоль(экв)/л

Место отбора	pH	$M^*$ , г/л	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$
Грунтовые воды	6,3	111,4	108	25,6	1080,4	493,6	1644	67,4	-
	6,5	106,9	48	11,2	1069,6	500,0	1564	62,7	-

Примечание: \* – минерализация; (-) – не определялось.

Химизм вод из р. Черная 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 (таблица 4), что, согласно 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  $\text{Na}^+$  и  $\text{Ca}^{2+}$ , среди анионов доминируют хлориды. Таким образом, химизм вод соленого ручья был хлоридным кальциево-натриевым.

Таблица 4. Содержание ионов в поверхностных и подземных водах долины

р. Черная, ммоль(экв)/л

Место отбора	pH	M*, г/л	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$
Соленый ручей	6,4	25,8	118	79,2	247,8	20,8	396,6	25	1,8
Река Черная	7,0	5,7	40	8,3	30,4	2,1	71,4	10,6	2,3
Грунтовые воды	6,3	12,4	38	22,5	115,2	23,3	177,2	12,3	4,1
	6,2	5,7	10	3,2	63	10,8	79,12	6,3	-
	6,9	1,1	0,7	1,0	4,4	2,6	4,6	6,3	-

Примечание: \* – минерализация; (-) – не определялось.

Минерализация грунтовых вод главным образом зависела от местоположения и удаленности источников легкорастворимых солей. Наибольшей минерализацией (12 г/л) отличились грунтовые воды, отобранные возле ручья с соленой водой (таблица 4), наименьшей – грунтовые воды около реки (1,1 г/л). Согласно предложенным критериям [Овчинников, 1970], грунтовые воды около ручья с соленой водой относятся к группе вод с повышенной соленостью, а грунтовые воды, взятые возле реки – к группе солоноватых вод. Среди катионов в грунтовых водах доминировал  $\text{Na}^+$ , на втором месте, как правило, был  $\text{Ca}^{2+}$ . В составе анионов преобладали хлориды. Таким образом, химизм грунтовых вод в пойме р. Черная преимущественно был хлоридно-натриевым и хлоридным кальциево-натриевым. 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 (таблица 5). В водах шламохранилища среди анионов преобладали хлориды, на сульфат-ионы приходилось около 3% от суммы анионов. В составе катионов доминировали  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$ , доля  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  составляла менее 4%. Химизм вод шламохранилища был хлоридным калиево-натриевым. Воды мелководного заболоченного водоема в долине реки имели подобный состав солей при несколько повышенной минерализации. Воды р. Ленва были наименее минерализованными (группа вод с повышенной соленостью) [Овчинников, 1970] и хлоридными магниево-натриевыми по химическому составу.

Таблица 5. Содержание ионов в водах шламохранилища, в поверхностных и подземных водах долины р. Ленва, ммоль(экв)/л

Место отбора	pH	$M^*$ , г/л	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$
Шламо-хранилище	6,8	99	80	8,3	1149,6	434,1	1520,5	39,6	1,5
Заболоченный водоем	6,7	109,8	137	29,2	1238,3	434,1	1624,8	39,6	2,2
Грунтовые воды	6,5	40	110	29,2	350,4	180,5	550,1	10,4	2,1
	6,2	41,7	452	282	65,2	1,3	713	9,4	-
Река Ленва	6,5	15,3	51	16,7	113,5	32,3	211,6	6,2	1,7

Примечание: \* – минерализация; (-) – не определялось.

В почвенно-грунтовых водах долины р. Ленва степень минерализации относительно понижена, одновременно, по сравнению с водами шламохранилища, возросло содержание  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ . Различия почвенно-грунтовых вод по количеству  $\text{K}^+$  на два порядка могут быть обусловлены наличием биогеохимического барьера на пути миграции (поглощение растительностью). По А.М. Овчинникову [1970] грунтовые воды относятся к группе вод, переходных к рассолам. Химизм грунтовых вод был хлоридным магниево-кальциевым и калиево-натриевым.

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

Природные поверхностные и подземные воды Пермского края являются пресными, преимущественно, гидрокарбонатно-кальциевыми [Копылов, 2021]; в долинах малых рек Быгель, Черная и Ленва под воздействием отвально-шламового хозяйства ПАО «Уралкалий» подземные воды трансформировались в сильноминерализованные воды (вплоть до рассолов) хлоридного натриевого химизма с заметной долей ионов калия, кальция и магния. На долю сульфат-ионов приходилось около 4% от общего количества анионов.

### **3.3. Характеристика техногенно засоленных аллювиальных почв**

Под воздействием поверхностных и подземных минерализованных вод, формирующихся на территории складирования отходов отвально-шламового хозяйства ПАО «Уралкалий», в долинах малых рек образовались засоленные аллювиальные почвы.

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

Под воздействием подземных рассолов, сформированных на территории солеотвала БКПРУ-4, в долине малой реки Быгель образовался засоленный участок. Расстояние от солеотвала БКПРУ-4 до исследованного участка составляет около 800 м, средний уклон поверхности около 4%. Пятно с изреженным травяным покровом впервые обнаружено на космоснимках 2013 г.; в 2020 г. его площадь составила 2027 м<sup>2</sup>.

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 (рисунок 14).

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

AY/Cg<sup>~</sup> – переходный глееватый горизонт, 10-57/47 см, рыжевато-бурый, 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.

[AYg] – 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<sup>~</sup> – 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 (рисунок 15).

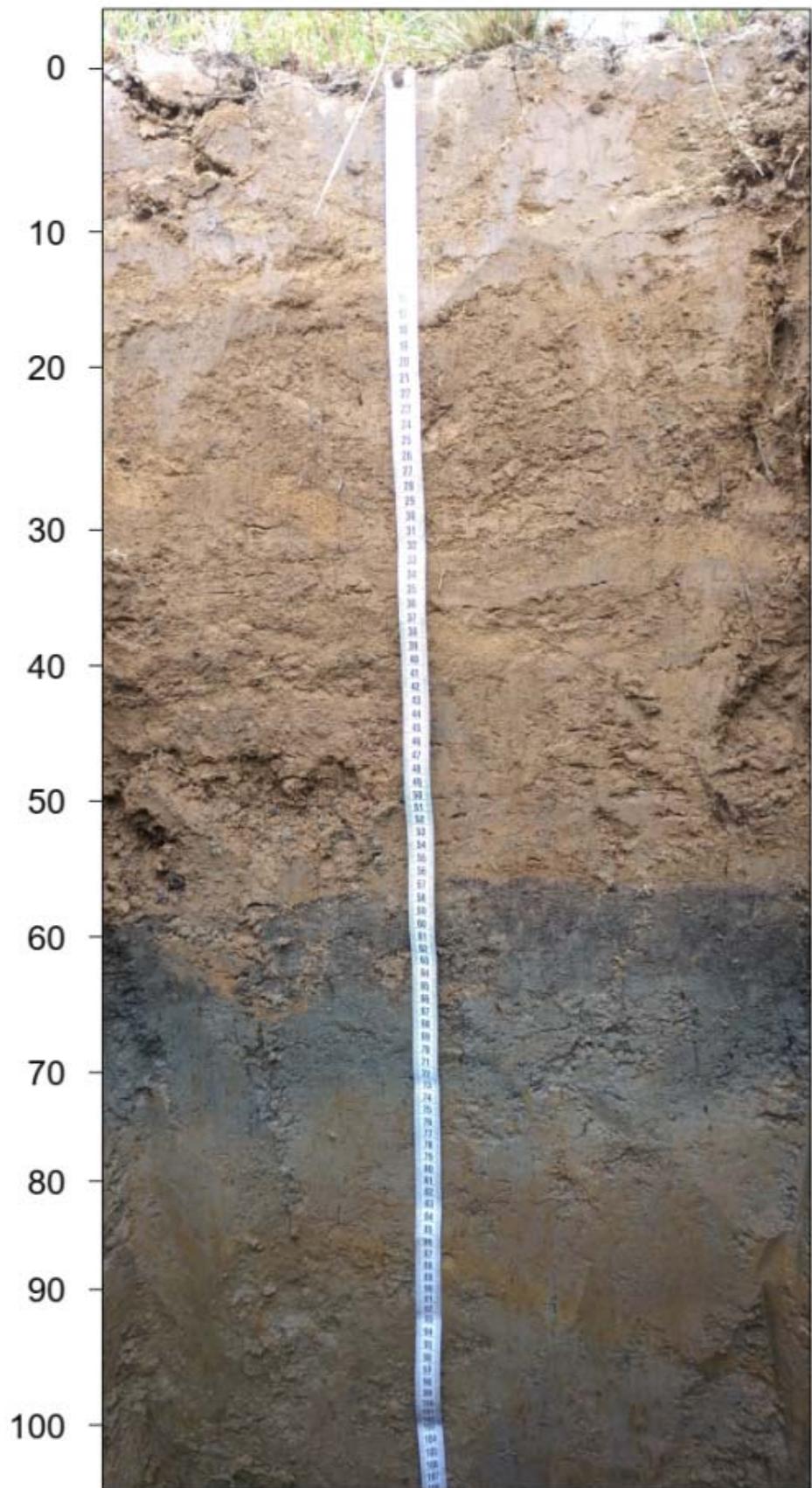


Рисунок 14 – Аллювиальная серогумусовая глеевая засоленная почва в долине р. Быгель (разрез 5)



Рисунок 15 – Аллювиальная серогумусовая глеевая засоленная почва в долине р. Быгель (разрез 6)

AY – серогумусовый 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.

AY/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.

[AYg] – 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.

В профиле обоих почв присутствуют морфологические признаки развития сульфидогенеза, а, именно, появление черной окраски, черных пятен. Потенциал для образования сульфидов в аллювиальных глеевых почвах имеется, 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 редукции Fe(III). Восстановление железа рассматривается как биохимический процесс, в котором роль бактерий сводится к сбраживанию органического вещества. В результате образуются определенные низкомолекулярные органические соединения, действующие на Fe(III) как редуктанты [Зайдельман, 1998]. Описаны железовосстанавливающие бактерии, способные использовать энергию от восстановления Fe(III) для поддержания роста [Coates, 1999]; многие из них не являются строгими анаэробами и способны использовать для дыхания кислород [Lin et al., 2004].

В профиле аллювиальных почв, находящихся под постоянным воздействием минерализованных вод, аккумулировались водорастворимые соли (рисунок 16, приложение В). В водной вытяжке из почв количество гидрокарбонатов было минимальным ( $0,2\text{-}0,3$  ммоль(экв)/100 г). Среди анионов доминировали хлориды, их содержание было на уровне  $0,7\text{-}74,8$  ммоль(экв)/100 г почвы. Количество сульфат-ионов находилось в пределах  $1,2\text{-}6,8$  ммоль(экв)/100 г. Среди катионов преобладал  $\text{Na}^+$ , на втором месте по содержанию был  $\text{K}^+$ , на его долю приходилось около 36% от суммы катионов.

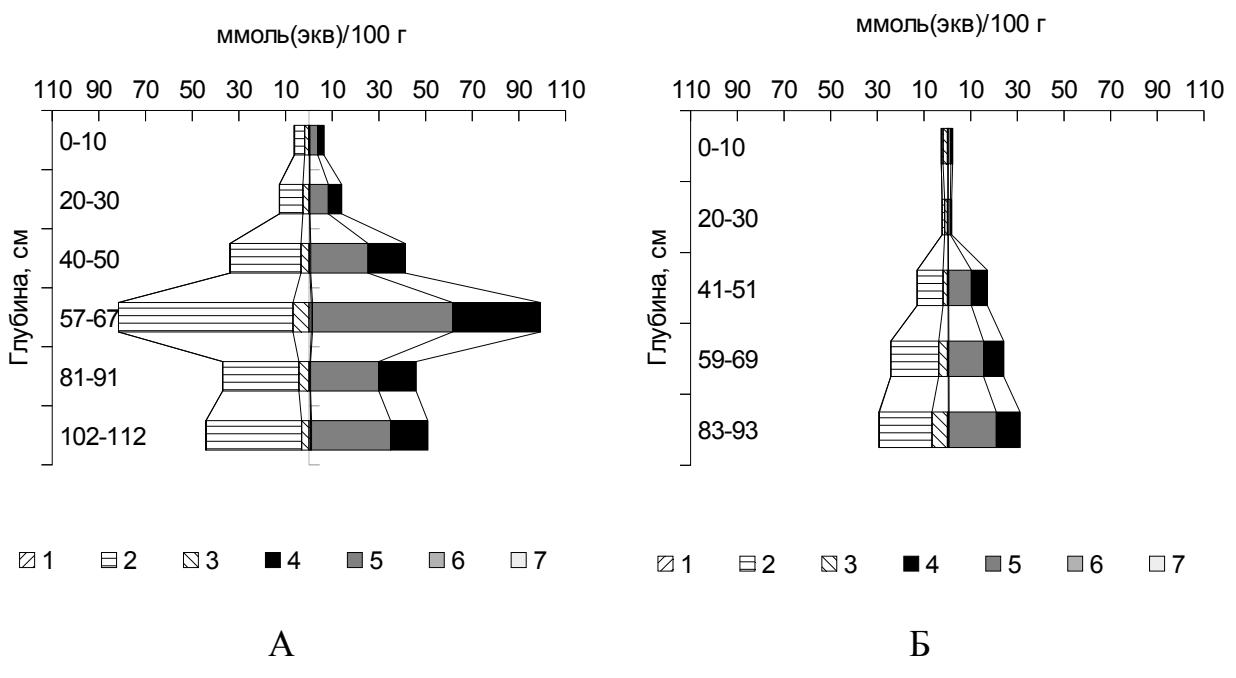


Рисунок 16 – Содержание ионов ( $1 - \text{HCO}_3^-$ ;  $2 - \text{Cl}^-$ ;  $3 - \text{SO}_4^{2-}$ ;  $4 - \text{K}^+$ ;  $5 - \text{Na}^+$ ;  $6 - \text{Mg}^{2+}$ ;  $7 - \text{Ca}^{2+}$ ) в водных вытяжках из почв в долине р. Быгель: А – разрез 5, Б – разрез 6

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 (рисунок 16, А). Почва в разрезе 6 – солончаковатая, сильнозасоленная – в средней части профиля, с хлоридным калиево-натриевым химизмом (рисунок 16, Б).

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 В).

Реакция почвенной среды в аллювиальных почвах варьировала от слабокислой ( $\text{рН}_{\text{вод}} = 6,0$ ) до слабощелочной ( $\text{рН}_{\text{вод}} = 7,8$ ) (таблица 6). Гипс содержался только в почве из разреза 6 в слое 20-30 см, в количестве 0,2%, карбонаты содержались в количестве 0,5-1,2%.

В составе обменных катионов аллювиальных почв преобладают ионы  $\text{K}^+$ , которые составляют 54-70% от емкости катионного обмена (ЕКО) (таблица 6). На долю натрия приходится около 16-26% ЕКО, содержание обменного кальция и магния – небольшое. По содержанию обменного натрия данные почвы можно охарактеризовать как малонатриевые. В разрезе 5 присутствует обменная кислотность – около 6-9% от ЕКО. 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 гумусовая глеевая ненасыщенная хлоридная кальциево-натриевая солончаковая сильнозасоленная малонатриевая суглинистая почва; Sodic Gleyic Fluvisols (Loamic, Salic).

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

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

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

Примечание: (-) – не определялось.

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

В долине р. Черная под воздействием минерализованных поверхностных и грунтовых вод произошла трансформация почвенного покрова, и сформировались комплексы техногенно засоленных аллювиальных почв. На участке с фрагментарной растительностью, в 2 м от русла реки и в 200 м от солеотвала БКПРУ-3 описана аллювиальная серогумусовая глеевая солончаковая почва (разрез 7, рисунок 17). Координаты разреза 7 (в системе координат WGS-84): N 59.17.050, E 056.49.265. Почвенный профиль (разрез № 7) имел следующее морфологическое строение:

AYs,g – серогумусовый 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.

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

C/Gs<sup>~</sup> – 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, рисунок 18). Координаты разреза 8 (в системе координат WGS-84): N 59.16.555, E 056.49.013.

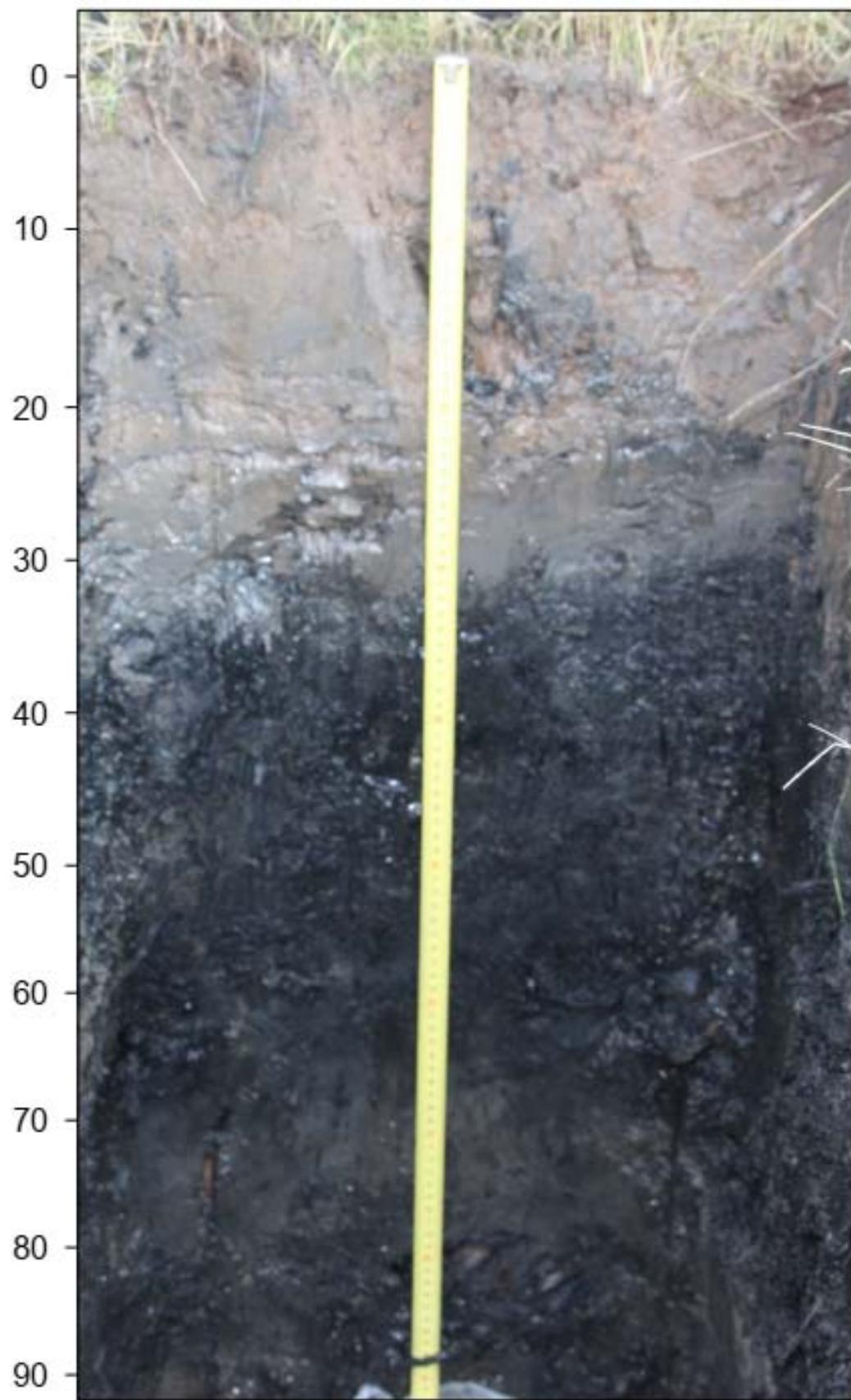


Рисунок 17 – Аллювиальная серогумусовая глеевая засоленная почва из долины р. Черная (разрез 7)

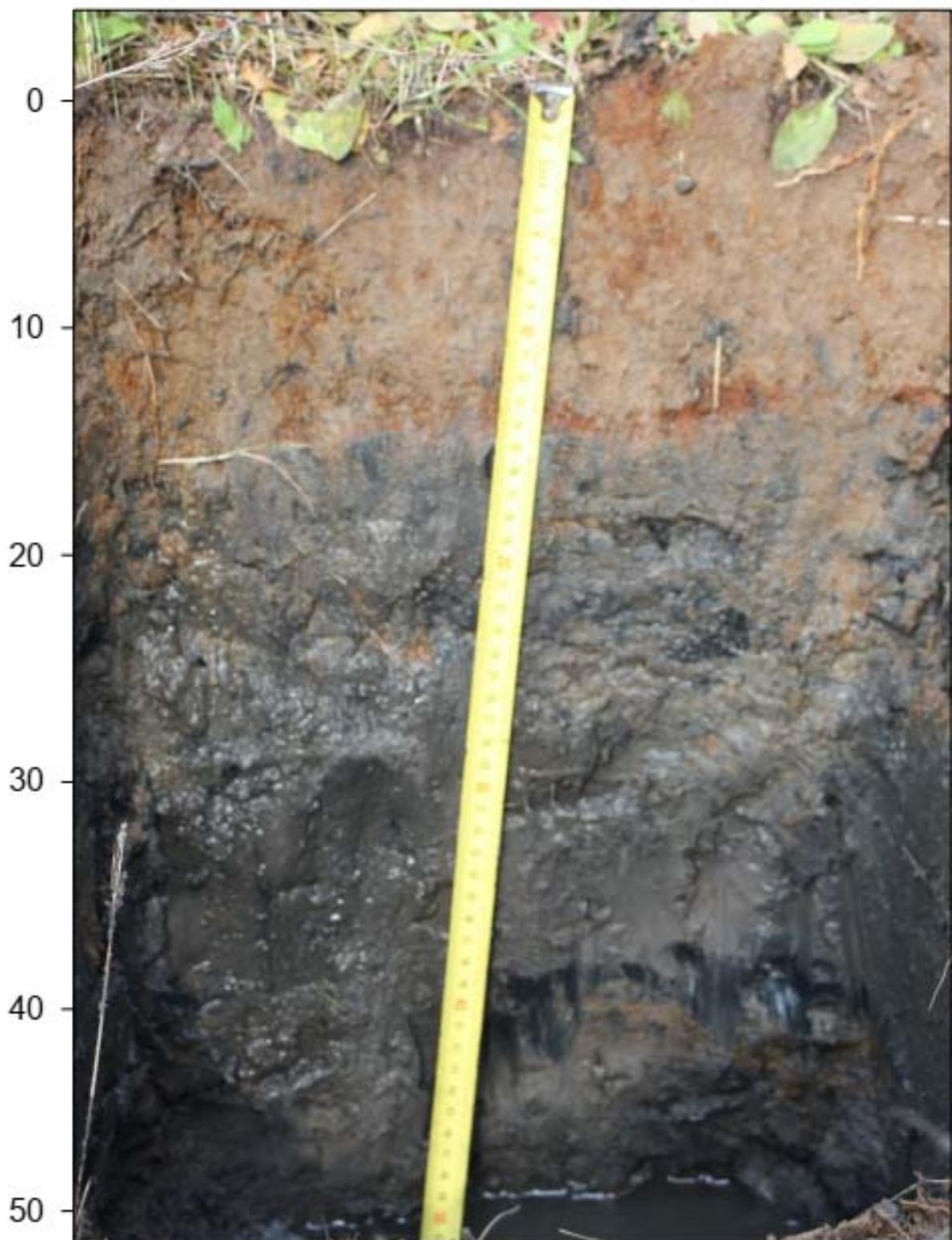


Рисунок 18 – Аллювиальная серогумусовая глеевая засоленная почва из долины р. Черная (разрез 8)

Почвенный профиль имел следующее морфологическое строение:

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

$Gs^{\sim}$  – 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 притеrrасной 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 (рисунок 19). Координаты разреза 9 (в системе координат WGS-84): N 59.16.542, E 056.48.987.

В аллювиальной серогумусовой глеевой солончаковой почве диагностировали следующие горизонты:

AYs,g – серогумусовый 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.

$Gs^{\sim}$  – 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 (рисунок 20). Координаты разреза 10 (в системе координат WGS-84): N 59.15.648, E 056.49.259. Участок с

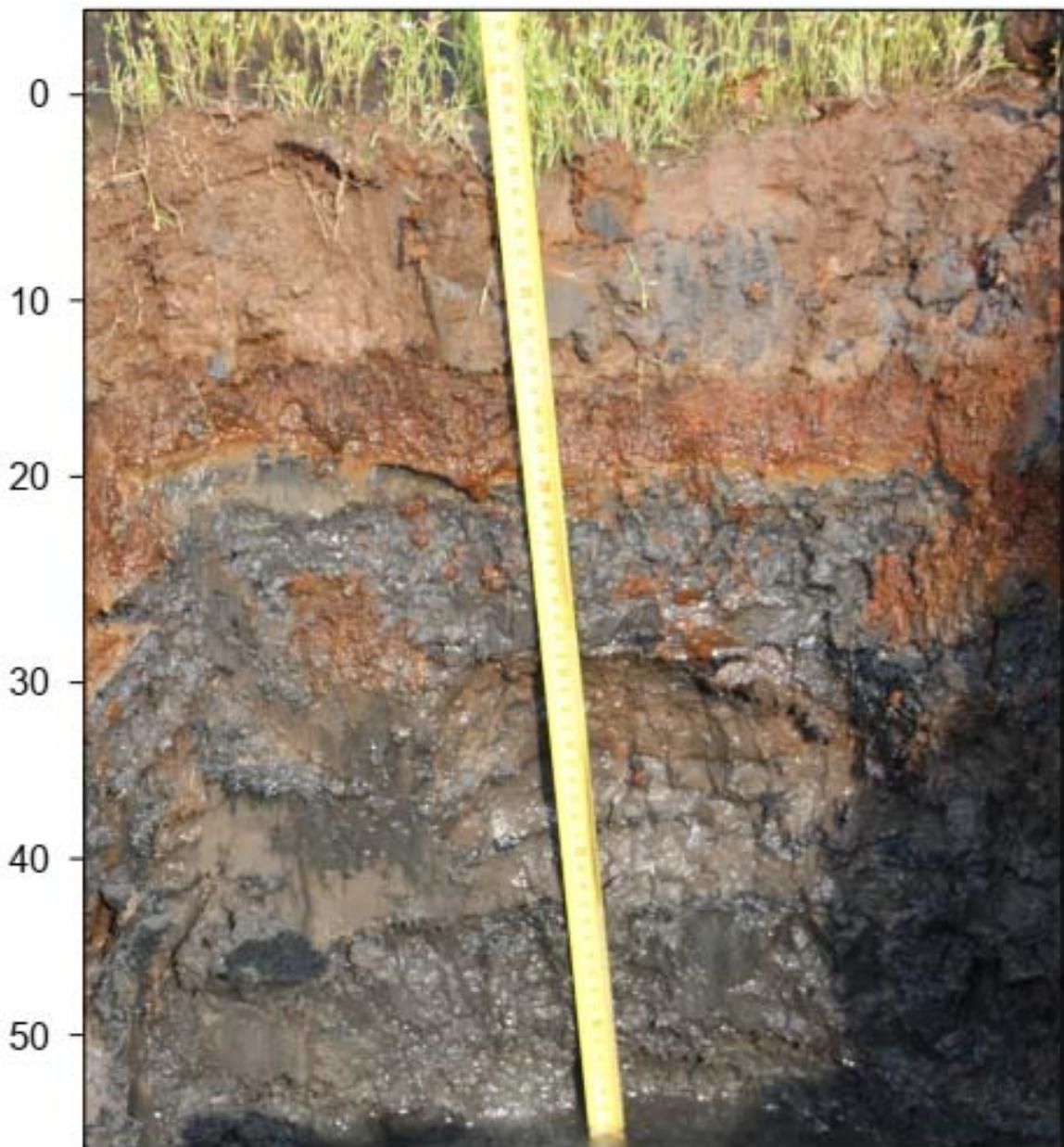


Рисунок 19 – Аллювиальная серогумусовая глеевая засоленная почва из долины р. Черная (разрез 9)

низким проективные покрытием, произрастили 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.

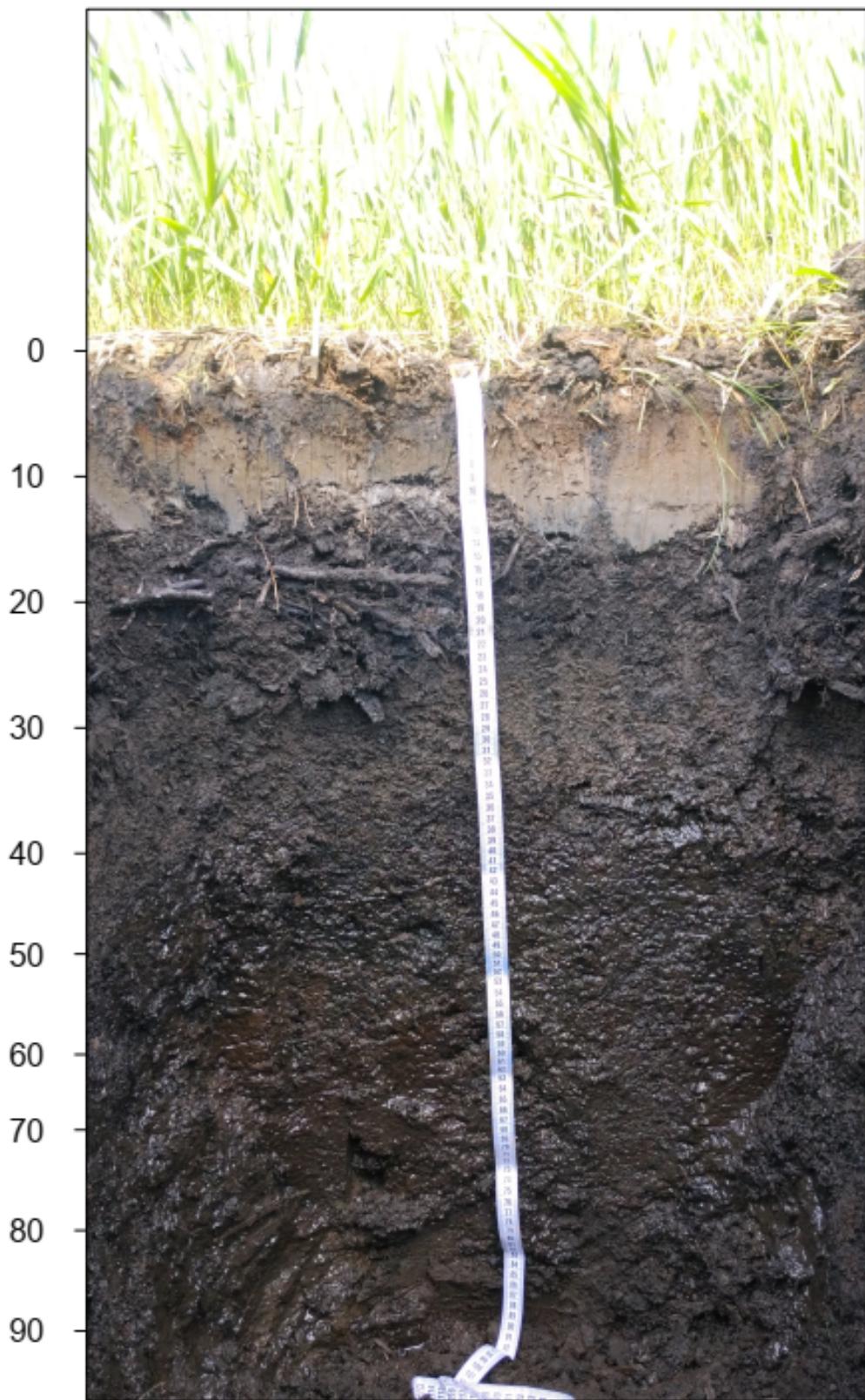


Рисунок 20 – Солончак вторичный по аллювиальной серогумусовой глеевой почве из долины р. Черная (разрез 10)

AYs,g – серогумусовый горизонт, 0-13/13 см, слой 0-5 см имел рыжевато-бурую окраску, 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, тяжелосуглинистый, встречаются корни растений, переход заметный по цвету и структуре.

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

[AYs,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.

C/Gs<sup>~</sup> – почвообразующая глеевая порода, 74-110/36 см – сырая, сизая, бесструктурная, тяжелосуглинистая.

Разрез 11 (рисунок 21) заложен на расстоянии около 500 м от солеотвала, 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.

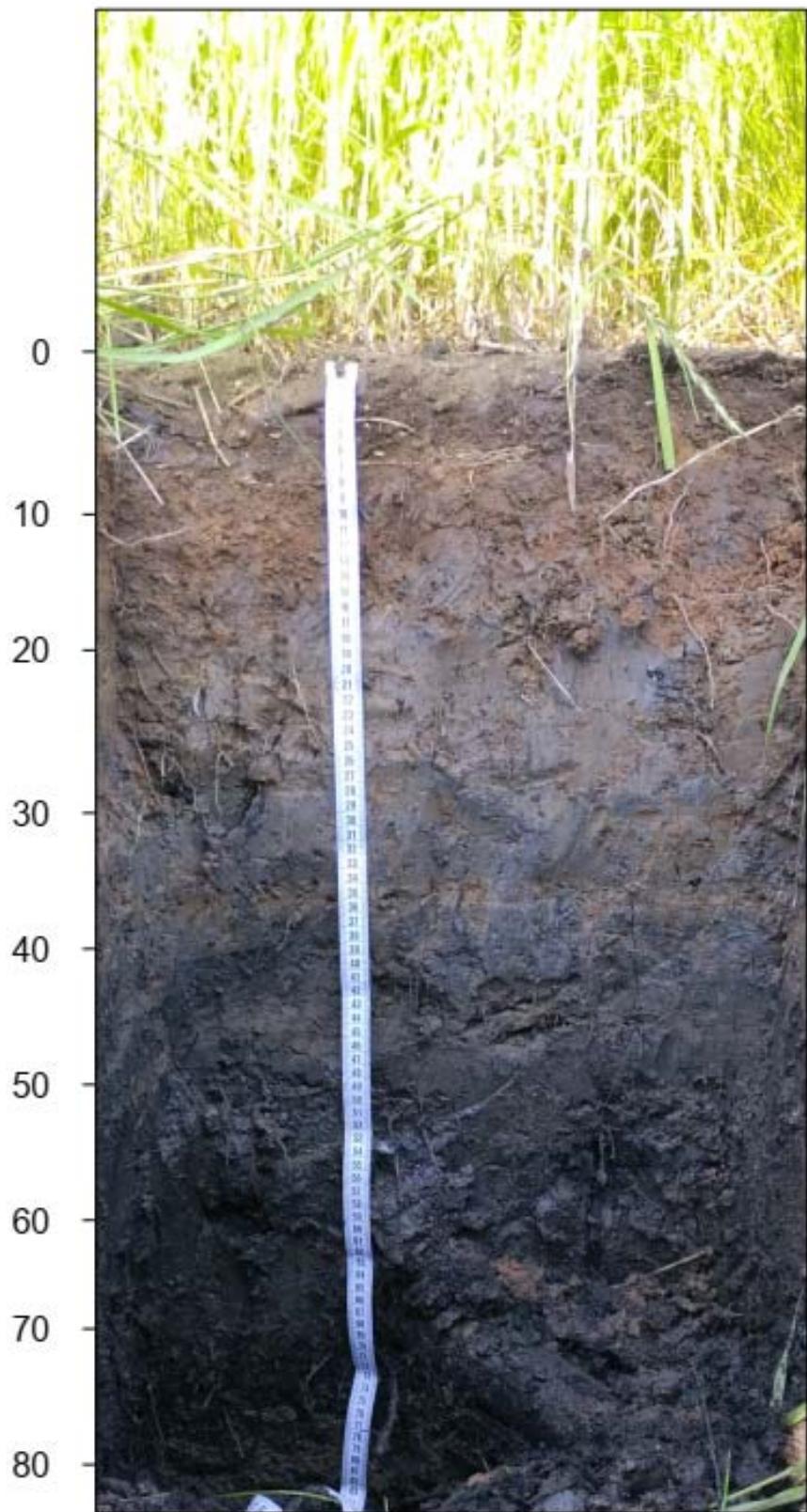


Рисунок 21 – Аллювиальная серогумусовая глеевая засоленная почва из долины р. Черная (разрез 11)

AYs,g – серогумусовый горизонт, 0-15/15 см, плотный, темно-бурый, переплетен корнями трав, суглинистый, влажный, бесструктурный; встречаются песчаные линзы, ориентированные горизонтально, переход постепенный.

AY/Cg,s<sup>~</sup> – 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<sup>~</sup> – глеевая почвообразующая порода, 53-88/35 см, неоднородной окраски: на сизо-буrom 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 (рисунок 22) 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.

AYs,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.

AY/Cg,s<sup>~</sup> – 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.

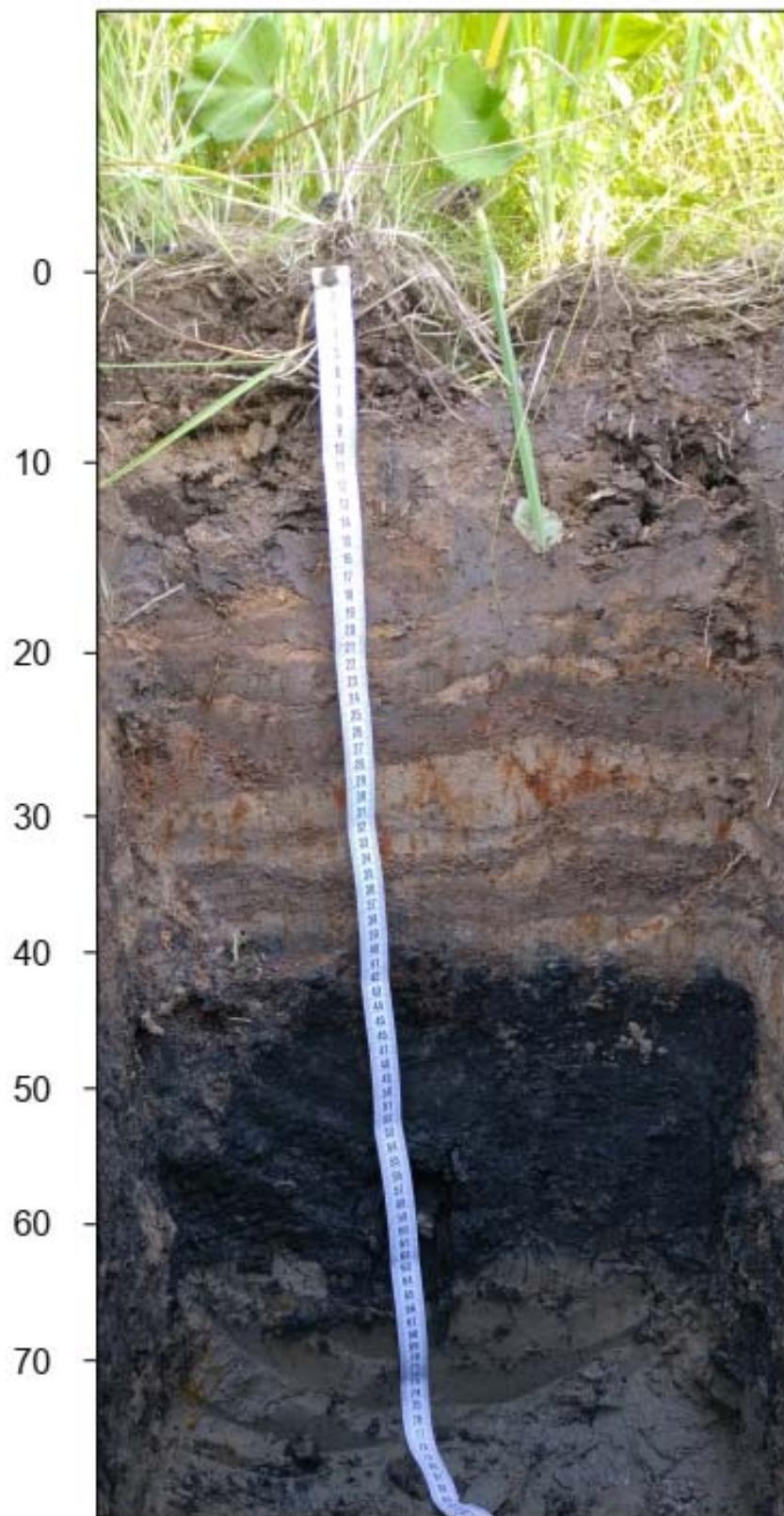


Рисунок 22 – Аллювиальная серогумусовая глеевая засоленная почва из долины р. Черная (разрез 12)

CG<sup>~~</sup> – 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 профиля исследуемых почв свидетельствует о частой смене окислительно-восстановительных условий, сопровождающейся мобилизацией Fe(II). Отмечено наличие оглеенных слоев темного цвета, причина темной окраски заключается, по-видимому, в накоплении Fe(II)-минералов. В почвах существуют минералогически разные, но биологически примерно одинаково доступные для редукции источники Fe(III): (гидр) оксиды железа и Fe(III)-содержащие слоистые силикаты. В ожелезненных тяжелосуглинистых гидроморфных почвах Предуралья оглеенные горизонты отличаются низкой светлотой за счет синтеза темных Fe(II)-минералов в условиях слабого оттока продуктов редукции Fe(III) [Водяницкий, 2008]. Рассеянный дисперсный магнетит может изменить окраску бактериально редуцированного ферригидрита и смеси его с гетитом с оранжевого цвета на черный [Benner et al., 2002].

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 редуктанты. 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 *Rhodoferax*) не являются строгими анаэробами и способны использовать для дыхания кислород [Lin et al., 2004]. Наиболее распространенные доноры электронов – некоторые органические кислоты. Переносить электроны к Fe(III) способны восстановленные гуминовые кислоты, в результате химической реакции

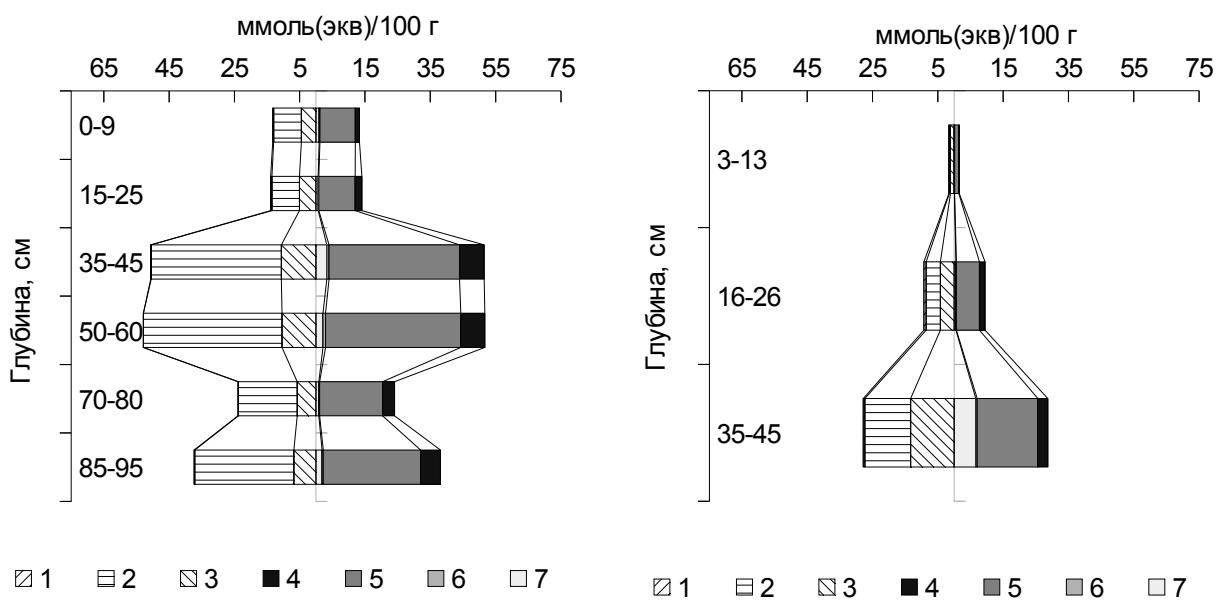
образуется Fe(II) и регенерируется окисленная форма гуминовых кислот [Lovley, Blunt-Harris, 1999].

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, образуют их верхнюю кровлю. Описанные в почвенном профиле призматические и тонкопризматические отдельности темной окраски на изломе имеют ржавый цвет. При смене окислительного режима на восстановительный (гидр)оксиды железа могут сохраняться под прикрытием Fe(II)-соединений [Roden, Zachara, 1996].

При закладке разрезов на аллювиальных почвах не отмечен запах сероводорода; тем не менее, мы не исключаем вероятность того, что темная окраска оглеенных горизонтов может быть связана с сульфидогенезом. По классическим представлениям в солоноватых и соленых водах широко распространены процессы восстановления серы сульфатов до сероводорода при участии сульфатредуцирующих бактерий. Сульфатредуцирующие бактерии (представители рода *Desulfovibrio*) – 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  $\text{FeS} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . В профилях почв из разрезов 7, 10 и 12 присутствовал черный слой, интенсивной редукции железа в котором, по-видимому, способствовали погребенные органические остатки, служащие энергетическим сырьем биогенного и биохимического восстановления Fe(III) бактериями.

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]. О возможном образовании гидротроилитового горизонта в почвах в местах разгрузки засоленных подземных вод на месторождении калийных солей в Предуралье указывали Е. А. Хайрулина с соавт. [2018].

Изучение состава водной вытяжки из аллювиальных почв, находящихся под постоянным воздействием минерализованных вод от солеотвала, 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 (рисунки 23-24, приложение Г).



А

Б

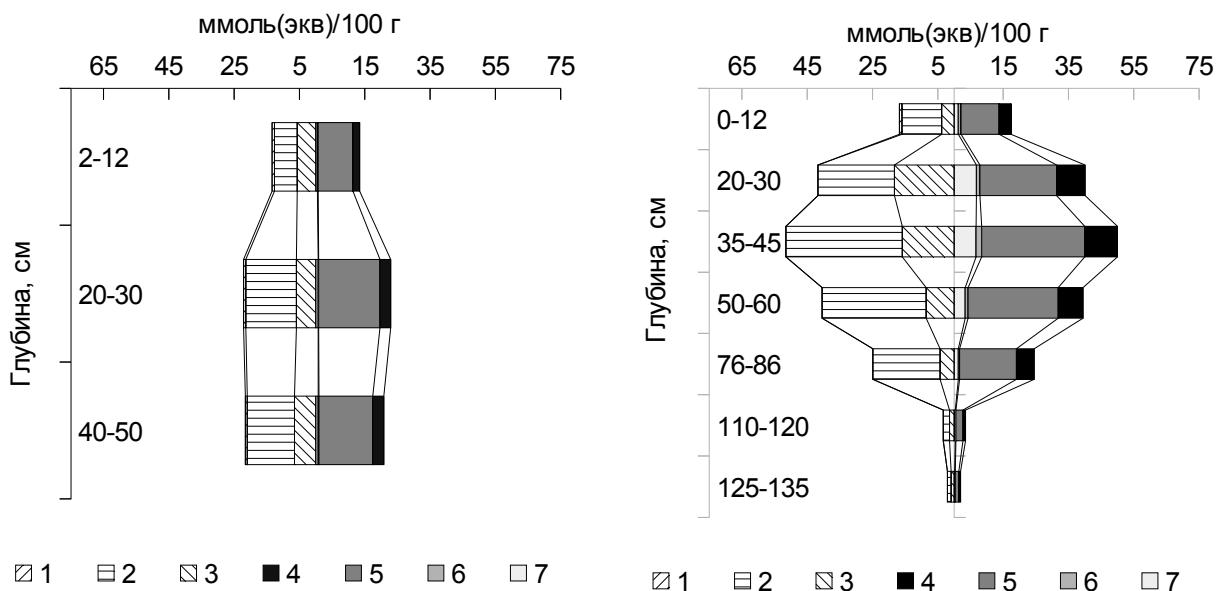


Рисунок 23 – Содержание ионов (1 – HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>; 2 – Cl<sup>-</sup>; 3 – SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; 4 – K<sup>+</sup>; 5 – Na<sup>+</sup>; 6 – Mg<sup>2+</sup>; 7 – Ca<sup>2+</sup>) в водных вытяжках из почв в долине р. Черная: А – разрез 7, Б – разрез 8, В – разрез 9, Г – разрез 10

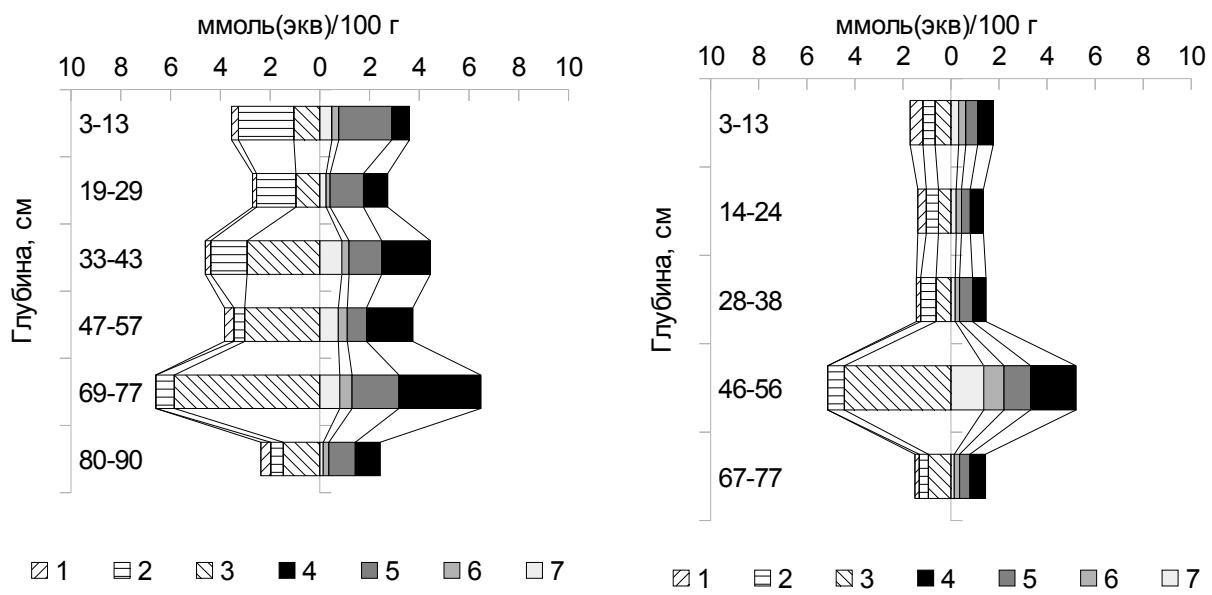


Рисунок 24 – Содержание ионов (1 – HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>; 2 – Cl<sup>-</sup>; 3 – SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; 4 – K<sup>+</sup>; 5 – Na<sup>+</sup>; 6 – Mg<sup>2+</sup>; 7 – Ca<sup>2+</sup>) в водных вытяжках из почв в долине р. Черная: А – разрез 11, Б – разрез 12

Содержание водорастворимых гидрокарбонатов в почвах находилось на уровне 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] 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  $\text{Na}^+$ , их количество составляло от 0,37 до 41,38 ммоль(экв)/100 г. Примечательно, что на втором месте по содержанию были  $\text{K}^+$ , уровень его аккумуляции превысил суммарное количество  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ , и только в почвообразующей породе из разреза 8 количество  $\text{Ca}^{2+}$  все же превысило содержание ионов  $\text{K}^+$ .

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

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

Почвы несколько отличались по кислотно-основным свойствам. Относительно контрастной была реакция среды в почве из разреза 7, она варьировала от слабокислой, нейтральной и до слабощелочной (таблица 7).

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

№ разреза	Глубина, см	С <sub>опр</sub> , %	рН <sub>вод</sub>	рН <sub>сол</sub>	Обменные катионы, ммоль(экв)/100 г					ЕКО, ммоль(экв)/ 100 г	%	
					Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	H <sup>+</sup> +Al <sup>3+</sup>		CO <sub>2</sub> карб.	Гипс
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	-	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	0,46	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	-	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	-	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	-	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	0,47
	76-86	-	5,48	4,95	5,76	3,04	11,60	12,30	9,63	42,33	0	0,09
	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 7

№ разреза	Глубина, см	C <sub>орг</sub> , %	рН <sub>вод</sub>	рН <sub>сол</sub>	Обменные катионы, ммол(экв)/100 г					ЕКО, ммол(экв)/ 100 г	%	
					Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	H <sup>+</sup> +Al <sup>3+</sup>		CO <sub>2</sub> карб.	Гипс
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	-	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	-	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	0,95	1,12
	67-77	-	7,43	5,92	2,40	2,24	2,09	4,59	0	11,32	0,47	0,73

Примечание: (-) – не определялось.

Нейтральной и слабощелочной реакцией среды характеризовались аллювиальные почвы из разрезов 8, 9, 11 и 12; содержание карбонатов в них колебалось от 0,5 до 6,7%. Реакция среды в почве из разреза 10 была сильнокислой и нейтральной ( $pH_{вод}=5,04-6,96$ ).

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 относятся к видам малонатриевых и средненатриевых почв [Классификация и диагностика почв..., 2004].

В отличие от слабощелочных аллювиальных почв (разрезы 8, 9, 11 и 12), кислые почвы из разрезов 7 и 10 сохранили ненасыщенность основаниями, общая доля обменных  $H^+$  и  $Al^{3+}$  в них составляла 8-28% ЕКО. 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 целом почвенном поглощающем комплексе доминировали  $Na^+$  и  $K^+$ , на их долю приходилось около 70% ЕКО. Необходимо отметить аномальное количество  $K^+$  в составе почвенного поглощающего комплекса (13-40% ЕКО), нередко превышающее долю  $Na^+$ . Источником ионов калия, как и натрия, служат отходы производства, складируемые в солеотвалах, растворяющиеся в атмосферных осадках и мигрирующие в подземных и поверхностных водах.

Новообразований гипса в профиле исследованных почв не обнаружено, но аналитические методы показали гипсодержание в количестве 0,7-6,4% (см. таблица 7). Появление гипса в техногенно засоленных глеевых 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 отмечали накопление карбонатов, поэтому, в окислительных условиях возможен процесс их замещения гипсом.

Оценка масштабов развития техногенного галогенеза в долине р. Черная под воздействием техногенных минерализованных вод показала, что отчетливые признаки формирования солончаковых почв под изреженным растительным покровом прослежены на площади 17,3 га, что составляет около 16% площади речной долины (рисунок 25).



Рисунок 25 – Картосхема расположения аллювиальных солончаковых почв в долине р. Черная

Ареалы солончаковых аллювиальных почв встречаются по всей долине, даже вблизи места впадения р. Черная в р. Волим. Участки под изреженной растительностью на солончаковых почвах чередуются с

участками, густо заросшими луговой и лугово-болотной растительностью. Как было показано выше, почвы на таких участках, также являются солончаковыми средне- и сильнозасоленными. По нашему мнению, все аллювиальные почвы долины р. Черная содержат некоторое количество техногенных солей.

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, 2015]:

разрез 7 – аллювиальная гумусовая глеевая ненасыщенная хлоридная натриевая гипсодержащая солончаковая очень сильнозасоленная средненатриевая суглинистая почва; Sodic Gleyic Fluvisols (Loamic, Salic);

разрез 8 – аллювиальная гумусовая глеевая насыщенная сульфатно-хлоридная кальциево-натриевая карбонатсодержащая гипсодержащая солончаковая сильнозасоленная средненатриевая суглинистая почва; Gypsiric Sodic Gleyic Fluvisols (Loamic, Salic);

разрез 9 – аллювиальная гумусовая глеевая насыщенная хлоридная натриевая карбонатсодержащая гипсодержащая солончаковая очень сильнозасоленная средненатриевая суглинистая почва; Gypsiric Sodic Gleyic Fluvisols (Loamic, Salic);

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

разрез 11 – аллювиальная гумусовая глееватая насыщенная хлоридная натриевая карбонатсодержащая гипсодержащая солончаковая сильнозасоленная малонатриевая суглинистая почва; Gypsiric Sodic Gleyic Fluvisols (Loamic, Salic);

разрез 12 – аллювиальная гумусовая глееватая насыщенная сульфатно-хлоридная натриево-калиевая карбонатсодержащая гипссодержащая солончаковая среднезасоленная малонатриевая 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 нейтрально-щелочные и сильнокислые техногенно засоленные аллювиальные почвы.

В обследованной нами части долины р. Ленва площадь аллювиальных солончаковых почв под изреженной растительностью составляет около 15 га (8,3% долины).

#### **3.3.3.1. Свойства солончаковых почв с нейтрально-щелочной реакцией среды**

На расширенном участке поймы реки в соответствии с растительностью и рельефом выделены четыре контрольных участка, в пределах которых закладывали прикопки и почвенные разрезы до глубины водонасыщенных грунтов.

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 (рисунок 26). Координаты разреза 13 (в системе координат WGS-84): N 59.19.029, E 056.49.406.

Во вторичном солончаке по аллювиальной глееватой почве (рисунок 26) диагностировали следующие горизонты:

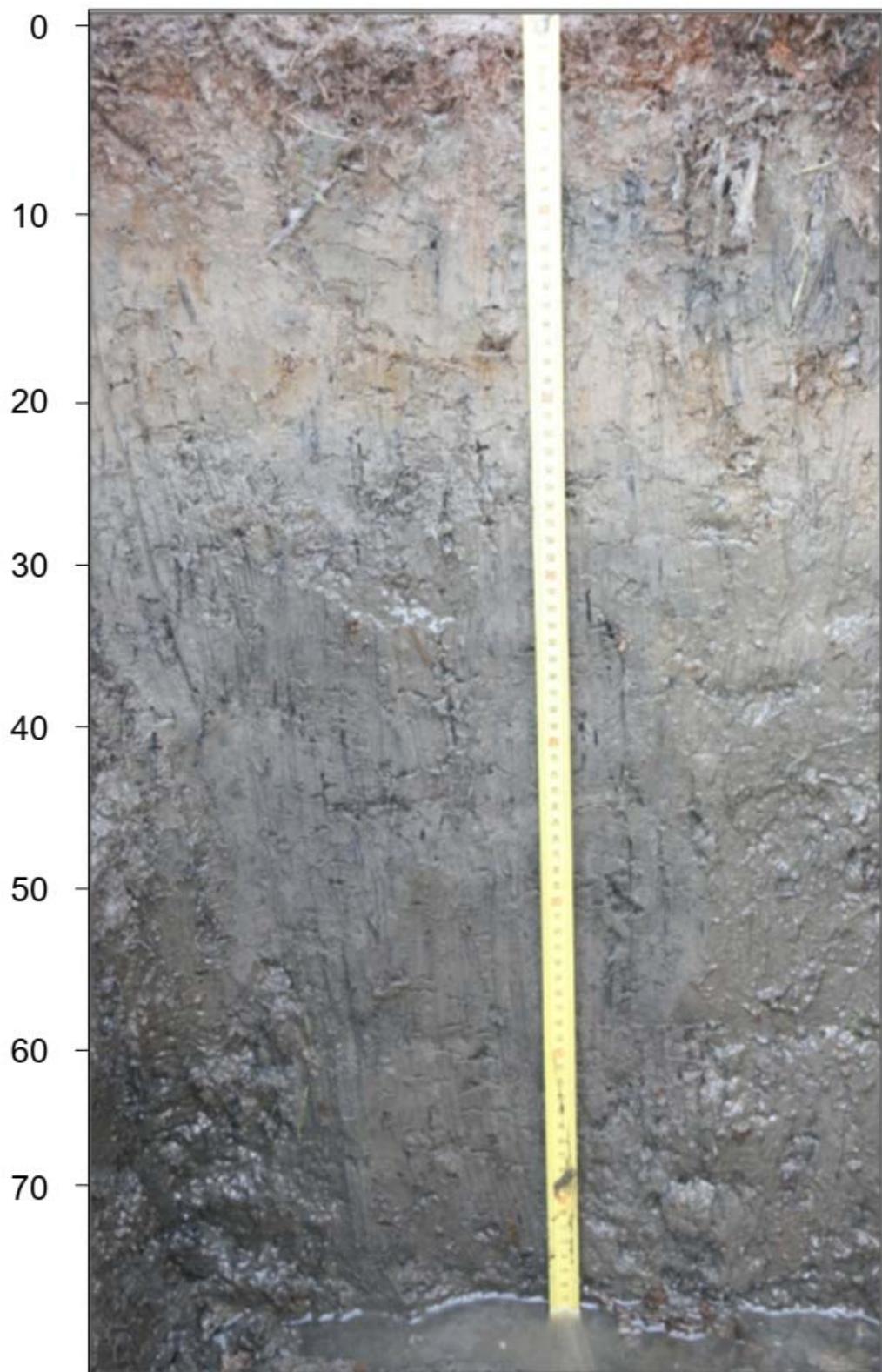


Рисунок 26 – Солончак вторичный по аллювиальной гумусовой глеевой почве из долины р. Ленва (разрез 13)

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

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

S/C<sup>~</sup>G – засоленная глеевая почвообразующая порода, 21-75/54 см, сизовато-серая, сырая, бесструктурная, вязкая, тяжелосуглинистая, содержит крупнопесчаные фракции. Уровень стояния грунтовой воды – 75 см.

На кромке болота на отложениях супесчаного гранулометрического состава под рудерально-злаковой растительностью описана аллювиальная гумусовая глееватая солончаковая почв (разрез 15, рисунок 27). Координаты разреза 15 (в системе координат WGS-84): N 59.19.038, E 056.49.631.

A<sup>s</sup>Y<sub>s,g</sub> – серогумусовый 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;

C<sub>s,g,ox</sub><sup>~</sup> – почвообразующая порода, 20-32/12 см, ржаво-рыжая, сырая, бесструктурная, супесчаная, переход заметный по цвету;

C<sub>g</sub><sup>~</sup>s – почвообразующая 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.

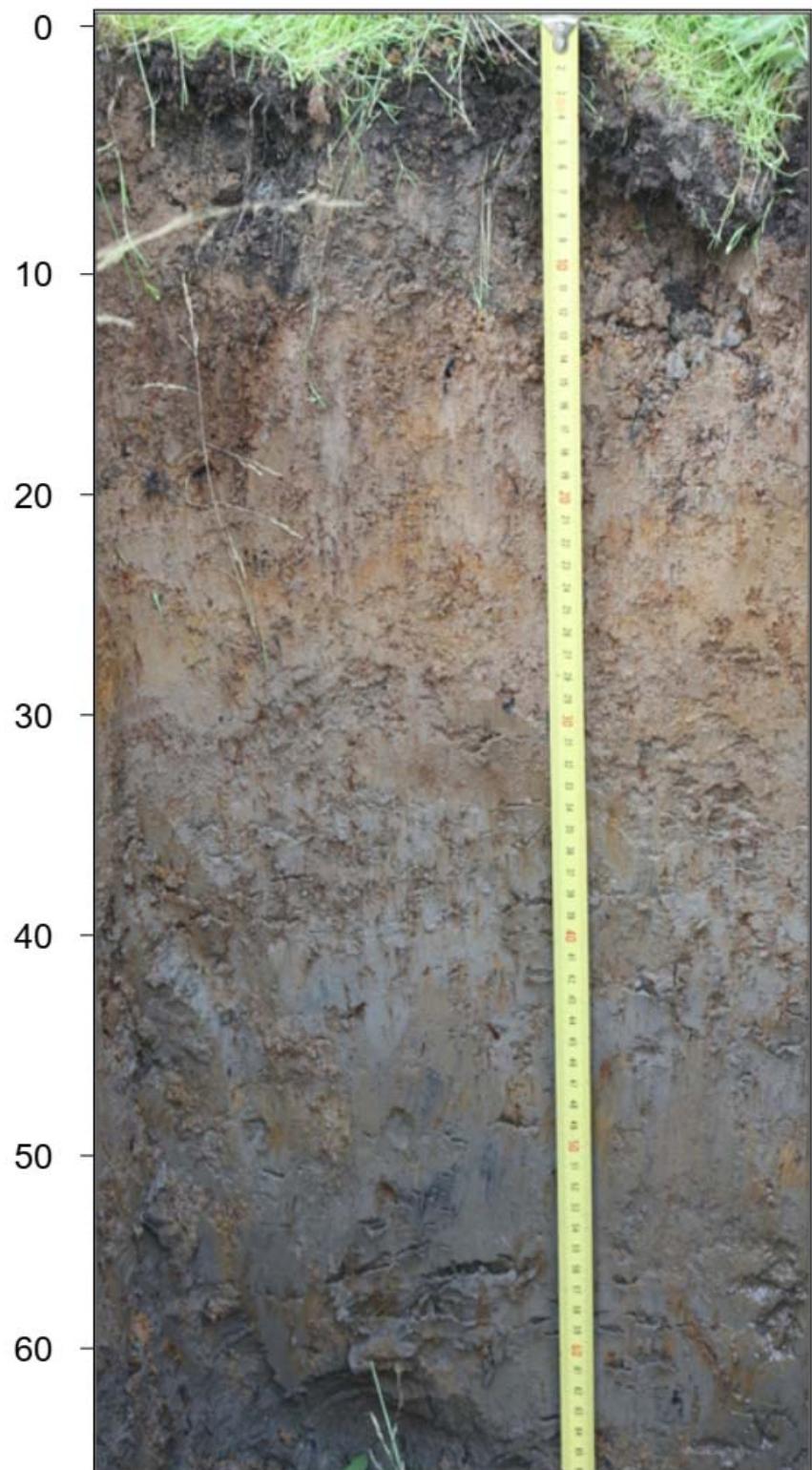


Рисунок 27 – Аллювиальная гумусовая глееватая солончаковая засоленная почва из долины р. Ленва (разрез 15)

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<sup>~</sup> – 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 гумусовой глееватой солончаковой почвы:

AYs,g – серогумусовый 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<sub>s</sub>,g,ox – оглеенная почвообразующая порода, 20-70/50 см, бурого цвета, характерны ржавые пятна и множество железомарганцевых конкреций;

C/Gs<sup>~</sup> – аллювиальная глеевая суглинистая порода, 70-100/30 см, сизая, с ржавыми примазками; с глубины 100 см становилась сырой, сизой, без ржавых пятен.

Таким образом, аллювиальные почвы, находящиеся под воздействием минерализованных вод, в целом сохранили строение профиля; отличительный морфологический признак проявился в виде новообразований мелкокристаллического гипса (разрез 15). Солончак соровый – новый компонент в почвенном покрове, образовавшийся при высыхании соленого мелководного водоема. В верхней части профиля этого солончака присутствовал черный гелеобразный осадок, видимо, сульфид железа, образовавшийся на дне водоема в присутствии растворенных сульфатов при участии сульфатредуцирующих бактерий.

В профиле аллювиальных почв, находящихся под постоянным воздействием минерализованных вод, аккумулировались водорастворимые соли (рисунок 28, приложение Д). 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 соровый отличился 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 соровый характеризовался сульфатно-хлоридным химизмом солей.

Содержание и соотношение катионов в водной вытяжке из почв колебалось в значительных пределах; наибольшим количеством  $\text{Na}^+$  отличились солончаки, особенно соровый. Количество  $\text{Na}^+$  составляло от 1,3 до 240 ммоль(экв)/100 г. В солончаке соровом количество  $\text{Ca}^{2+}$  превысило 100 ммоль(экв)/100 г, отличалась почва и наибольшим содержанием  $\text{Mg}^{2+}$ .

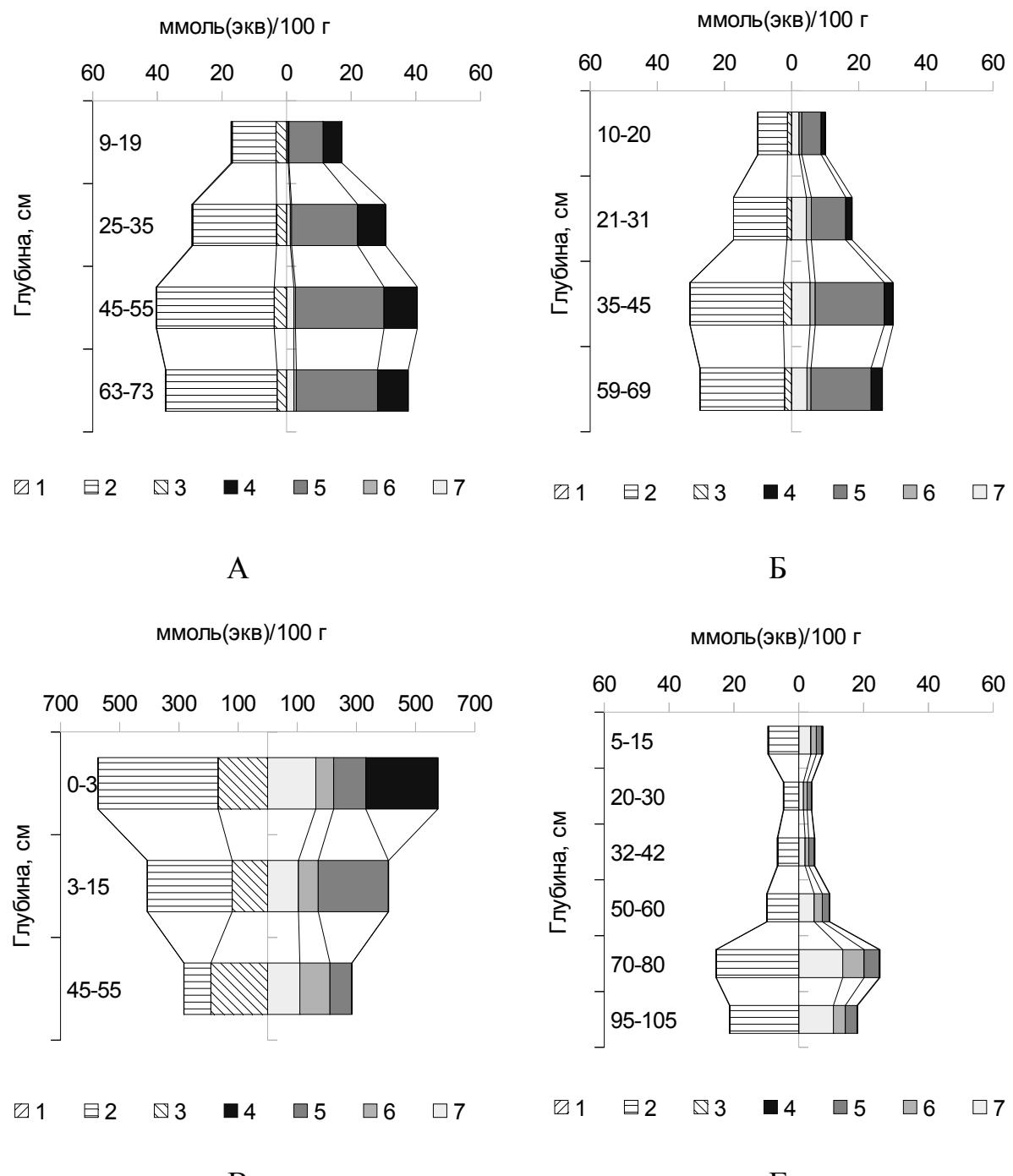


Рисунок 28 – Содержание ионов (1 –  $\text{HCO}_3^-$ ; 2 –  $\text{Cl}^-$ ; 3 –  $\text{SO}_4^{2-}$ ; 4 –  $\text{K}^+$ ; 5 –  $\text{Na}^+$ ; 6 –  $\text{Mg}^{2+}$ ; 7 –  $\text{Ca}^{2+}$ ) в водных вытяжках из почв в долине р. Ленва: А – разрез 13, Б – разрез 15, В – разрез 16, Г – разрез 17

В соответствии с составом катионов [Классификация и диагностика почв..., 2004], аллювиальные почвы отличались химизмом засоления. Солончак соровий имел кальциево-натриевый химизм в солевом горизонте и

натриево-магниево-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-магниево-кальциевый и магниево-натриево-кальциевый (разрез 17) химизм.

Отличительной особенностью обоих солончаков было высокое содержание ионов  $K^+$ . 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  $Mg^{2+}$ .

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 Д).

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.

Исследованные почвы поймы р. Ленва заметно отличались по реакции почвенной среды (таблица 8). Нейтральной и преимущественно нейтральной реакцией характеризовались солончак вторичный и аллювиальная глееватая

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

№ разреза	Глубина, см	С <sub>орг</sub> , %	рН <sub>вод</sub>	рН <sub>сол</sub>	Обменные катионы, ммол(экв)/100 г					ЕКО, ммол(экв)/ 100 г	%	
					Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	H <sup>+</sup> +Al <sup>3+</sup>		CO <sub>2</sub> карб.	Гипс
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.

почва (разрезы 13, 15). Слабокислая реакция среды выявлена в солончаке соровом, сильноокислая – в аллювиальной почве (разрез 17).

В почвах с нейтральной реакцией среды (разрезы 13, 15) содержались карбонаты в количестве 1,2-1,6%, распределение их по профилю было относительно равномерным. Появление карбонатов в аллювиальных почвах таежно-лесной зоны, по-видимому, связано с дополнительным поступлением кальция с техногенными водами, а также вытеснением  $\text{Ca}^{2+}$  техногенным натрием из почвенного поглощающего комплекса.

В условиях пойменного режима содержание органического углерода в почвах невысокое, особенно при супесчаном гранулометрическом составе (таблица 8). Некоторое увеличение количества органического углерода связано не только с гумусом, но и с накоплением перегнойного вещества в глеевых почвах. Значительным было содержание органического углерода в солончаке соровом, по-видимому, 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. В солончаке соровом доля обменного натрия достигала 24-28% ЕКО, соответственно почва относится к виду мало- и средненатриевых почв [Классификация и диагностика почв..., 2004]. Солончак вторичный по доле обменного натрия (27-32%) – средненатриевый, одновременно в нем относительное содержание  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$  составляло 77-82% ЕКО. Аллювиальные солончаковые почвы по доле обменного  $\text{Na}^+$  отнесены к средненатриевому и малонатриевому видам (таблица 8).

Часть исследованных почв сохранила ненасыщенность основаниями, в солончаке соровом общая доля обменных  $\text{H}^+$  и  $\text{Al}^{3+}$  (гидролитическая кислотность) составляла 6-14% ЕКО. Кислая аллювиальная почва была слабонасыщенной ( $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$  – от 30 до 57%).

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. Глеообразование – 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) отмечены кислотность среды и ненасыщенность основаниями.

В нашем случае 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, однако, эти почвы не являются засоленными. Солоди образуются при рассолении солонцов, обменный  $Na^+$  постепенно вытесняется  $H^+$  [Базилевич, 1965]. В кислых аллювиальных почвах, напротив, в почвенном поглощающем комплексе под воздействием минерализованных вод идет постепенная замена водорода одновалентными катионами, прежде всего  $Na^+$ .

Не менее аномальным является и отмеченное присутствие в почвенном поглощающем комплексе 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).

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 гипсодержание в количестве 1,3-2,0%. В естественных условиях аккумуляция гипса характерна для почв аридных и с semiаридных регионов. Гипсообразование 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]. 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 – явление сезонное и относительно кратковременное. 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]. При определенном уровне соленакопления причиной образования кристаллов гипса, вероятно, могут служить обменные реакции между натриево-калиевыми водами и почвенным поглощающим комплексом; при этом вытесненный  $\text{Ca}^{2+}$  связывается с сульфат-ионами.

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, 2015]:

разрез 13 – солончак вторичный насыщенный хлоридный калиево-натриевый карбонатсодержащий гипсосодержащий средненатриевый по аллювиальной гумусовой глеевой суглинистой почве; Fluvic Gypsic Sodic Gleyic Solonchak (Loamic, Chloridic, Ochric, Hypersalic);

разрез 15 – аллювиальная гумусовая глееватая насыщенная хлоридная кальциево-натриевая карбонатсодержащая солончаковая сильнозасоленная средненатриевая супесчано-легкосуглинистая почва Gipsiric Sodic Gleyic Fluvisol (Loamic, Oric, Salic);

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

разрез 17 – аллювиальная гумусовая глееватая ненасыщенная хлоридная магниево-натриево-кальциевая солончаковая сильнозасоленная малонатриевая почва; Eutric Protosodic Gleyic Fluvisol (Loamic, Ochric, Protosalic);

### **3.3.3.2. Свойства солончаковых почв с сильнокислой реакцией среды**

В 2018 и 2021 гг. на двух контрольных участках долины р. Ленва, находящихся на расстоянии около 1 км друг от друга, изучены свойства трех

аллювиальных солончаковых почв с резкокислой реакцией почвенной среды в верхних горизонтах.

Внешний вид аллювиальной гумусовой глееватой солончаковой почвы (разрез 14) продемонстрирован на рисунке 29.

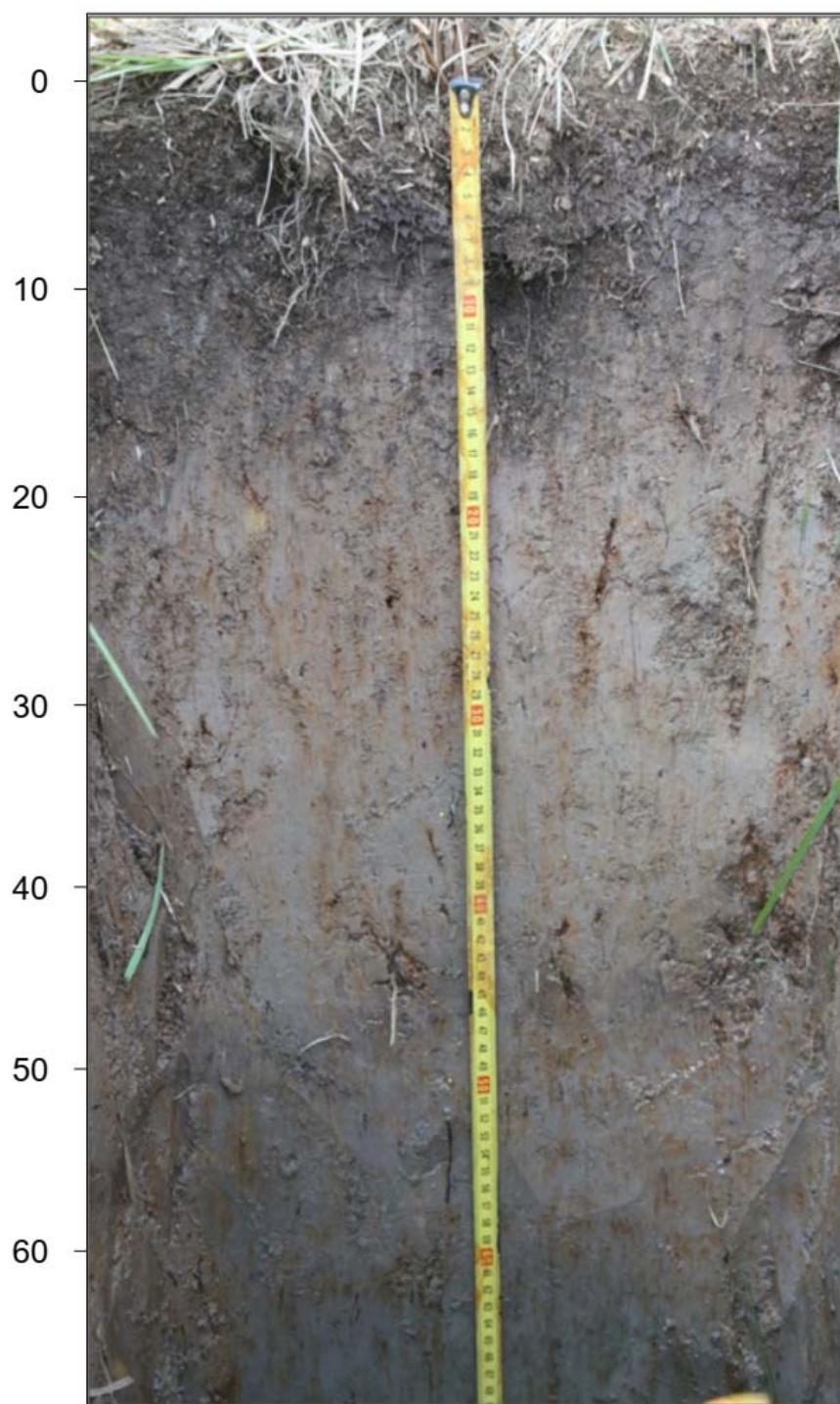


Рисунок 29 – Аллювиальная гумусовая глееватая солончаковая засоленная почва из долины р. Ленва (разрез 14)

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

A<sub>Ys,g</sub> – серогумусовый (дерновый) горизонт, 0-15/15 см, темно-бурый, слой 0-4 см более темного цвета, густо переплетен корнями, тяжелосуглинистый, комковатый, увлажненный, слегка вязкий, переход постепенный;

C<sub>s,g,ox</sub>~ – почвообразующая порода, 15-65/40 см, светло-сизая с яркими рыжими пятнами, сырая, бесструктурная, вязкая, суглинистая; с глубины около 40 см сочится вода;

C/Gs~ – с 65 см порода приобретает серо-сизую окраску с редкими рыжими пятнами; на глубине около 80 см присутствуют округлые стяжения мелкоクリсталлического гипса.

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. Координаты разреза 18 (в системе координат WGS-84): N 59.19.271 E 056.50.491. Внешний вид аллювиальной гумусовой глеевой солончаковой почвы представлен на рисунке 30.

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

A<sub>Ys,g</sub> – серогумусовый (дерновый) горизонт, 8-20/12 см, темно-бурый, тяжелосуглинистый, непрочнокомковатый, сырой, по корневинам отложены железистые новообразования ржавого цвета; переход заметный по цвету.

A<sub>Ys,g</sub> – серогумусовый (дерновый) горизонт, переходный к материнской породе, 20-29/9 см, неоднородно окрашенный: бурые языки и ржавые заклины; тяжелосуглинистый, бесструктурный, более уплотненный, вязкий, по корневинам отложены железистые новообразования ржавого цвета, переход заметный по цвету.

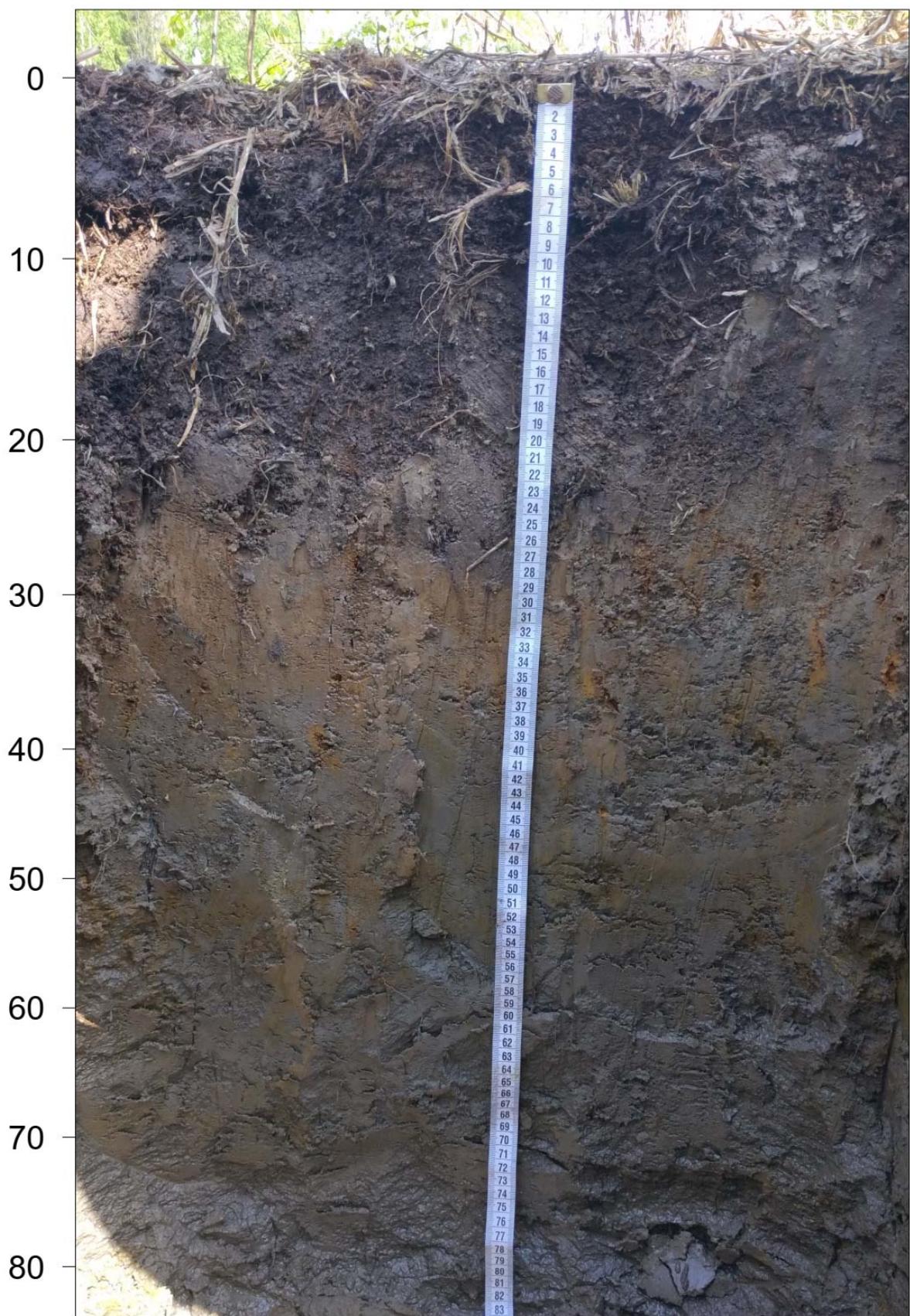


Рисунок 30 – Аллювиальная гумусовая глеевая солончаковая засоленная почва из долины р. Ленва (разрез 18)

$Cs,g,ox^{\sim}$  – почвообразующая порода, 29-37/8 см, рыже-светло-коричневая, тяжелосуглинистая, вязкая, содержит железистые трубочки ржавого цвета.

$Cs,g,ox^{\sim}$  – почвообразующая порода, 37-58/21 см, сизая с ржавыми пятнами, среднесуглинистая, сырая.

$C/Gs^{\sim}$  – почвообразующая порода, 58-82/24 см, сизая, тяжелосуглинистая, липкая, с глубины около 70 см сочится вода.

Разрез 19 аллювиальная серогумусовая глеевая солончаковая почва (рисунок 31). 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.

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

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

$Cs^{\sim}$  – почвообразующая порода, 44-92/48 см, бурый, сырой, бесструктурный, вязкий, липкий, с глубины 52 см сочится вода, переход по цвету.

$Cs,g,ox^{\sim}$  – почвообразующая порода с глубины 92 см, серо-голубая с единичными ржавыми пятнами, сырая, тяжелосуглинисто-легкоглинистая, слоистая.

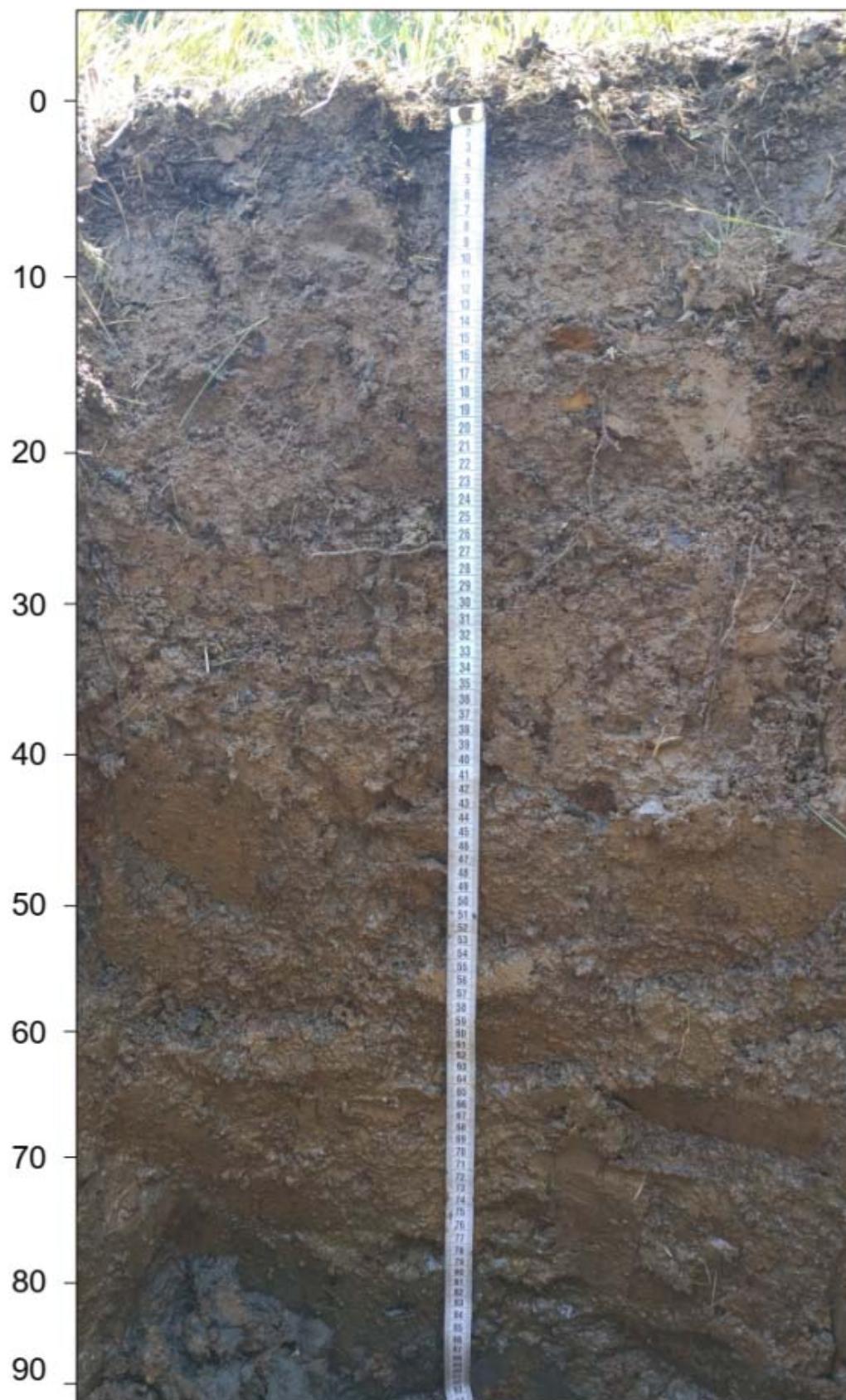


Рисунок 31 – Аллювиальная гумусовая глеевая солончаковая засоленная почва из долины р. Ленва (разрез 19)

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 (рисунок 32, приложение Д).

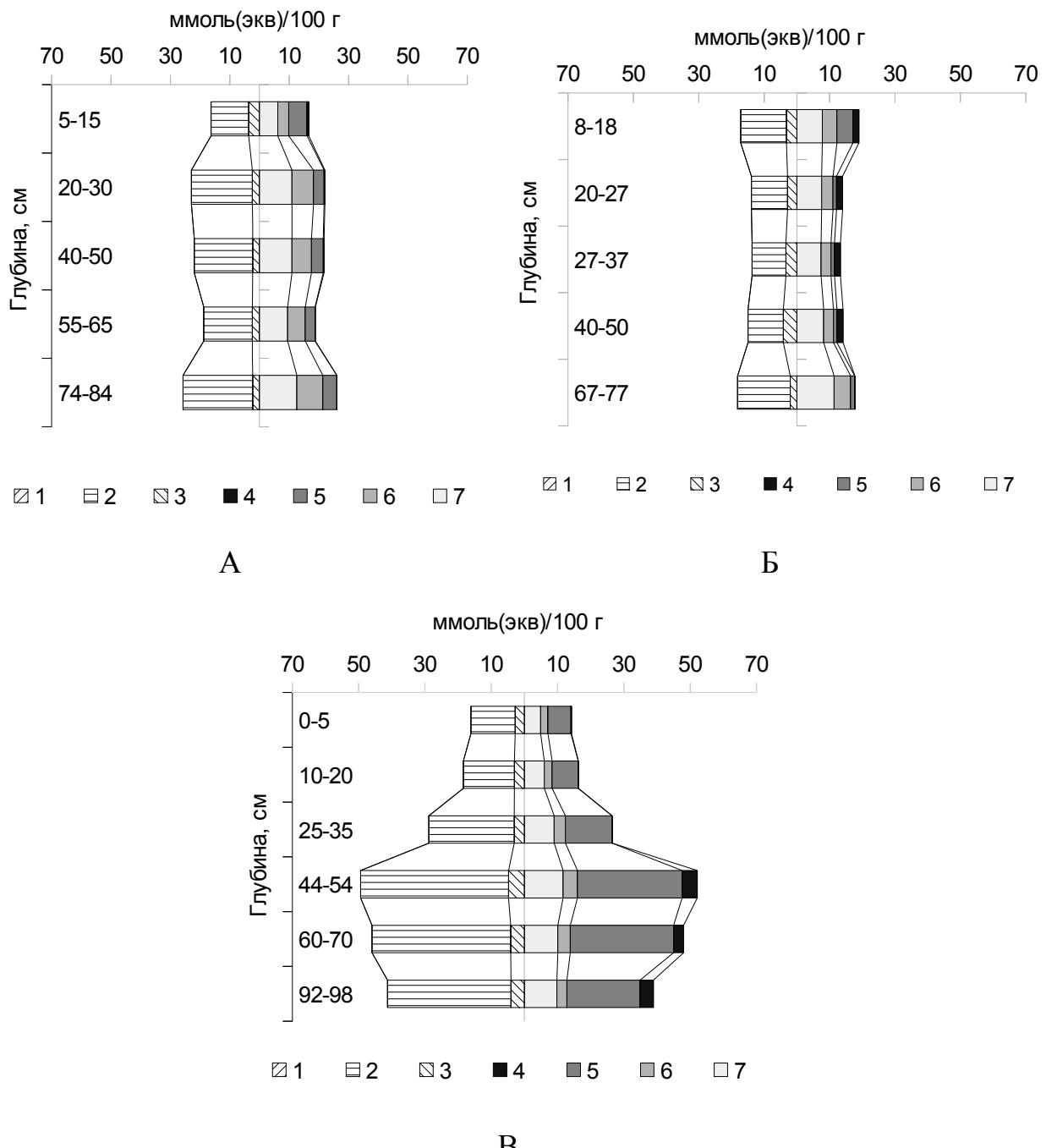


Рисунок 32 – Содержание ионов (1 –  $\text{HCO}_3^-$ ; 2 –  $\text{Cl}^-$ ; 3 –  $\text{SO}_4^{2-}$ ; 4 –  $\text{K}^+$ ; 5 –  $\text{Na}^+$ ; 6 –  $\text{Mg}^{2+}$ ; 7 –  $\text{Ca}^{2+}$ ) в водных вытяжках из аллювиальных гумусовых глеевых почв солончаковых почв в долине р. Ленва (А – разрез 14; Б – разрез 18, В – разрез 19)

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.

Среди катионов водной вытяжки в почвах из разрезов 14 и 18 доминировали ионы  $\text{Ca}^{2+}$ , их количество составляло от 6,2 до 12,6 ммоль(экв)/100 г, а в почве из разреза 19 доминировали ионы  $\text{Na}^+$  (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.

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 44-54 см) в почве из разреза 19.

Почвы характеризовались резкокислой реакцией среды, в почвах из разрезов 14 и 18 pH меньше 4 по всему профилю. В почве из разреза 19 кислотность с глубиной постепенно снижалась, и в почвообразующей породе реакция почвенной среды была слабокислой (таблица 9).

Таблица 9 – Физико-химические и химические свойства техногенно засоленных почв в долине реки Ленва

№ разреза	Глубина, см	С <sub>орг</sub> , %	рН <sub>вод</sub>	рН <sub>сол</sub>	Обменные катионы, ммол(экв)/100 г					ЕКО, ммол(экв)/ 100 г	Гипс, %
					Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	H <sup>+</sup> +Al <sup>3+</sup>		
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  $\text{Na}^+$  в составе поглощенных катионов почвы из разрезов 14 и 18 относятся к виду слабонатриевых почв, а почва из разреза 19 – к виду средненатриевых (таблица 9) [Классификация и диагностика почв..., 2004].

Солончаковые почвы не насыщены основаниями, общая доля обменных  $\text{H}^+$  и  $\text{Al}^{3+}$  составляла от 6 до 77% от емкости катионного обмена. В резко кислых почвенных горизонтах данные обменные катионы преобладали в составе почвенного поглощающего комплекса. С уменьшением почвенной кислотности в составе обменных катионов начинали доминировать  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Na}^+$ , в слабокислой почвообразующей породе (разрез 19) на их долю приходится около 77% ЕКО (см. таблица 9). Количество гипса варьировало в пределах 2,5-5,5%, карбонаты отсутствовали. Содержание органического вещества [по шкале: Гришина, Орлов, 1978] в 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, 2015]:

разрез 14 – аллювиальная гумусовая глееватая ненасыщенная хлоридная натриево-магниево-кальциевая гипссодержащая солончаковая сильнозасоленная малонатриевая суглинистая почва; Sodic Gleyic Fluvisol (Loamic, Ochric, Salic);

разрез 18 – аллювиальная гумусовая глеевая ненасыщенная хлоридная кальциевая гипссодержащая солончаковая очень сильнозасоленная слабонатриевая суглинистая почва; Sodic Gleyic Fluvisols (Loamic, Salic, Thionic);

разрез 19 – аллювиальная гумусовая глеевая ненасыщенная хлоридная кальциево-натриевая гипсодержащая солончаковая очень сильнозасоленная средненатриевая суглинистая почва; Sodic Gleyic Fluvisols (Loamic, Salic, Thionic).

### **3.4. Динамика полевой влажности, показателей рН 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, среднее количество выпавших осадков – 6,3 мм (приложения Е, Ж).

17 июня наблюдалась средние 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. рисунок 1).

### Динамика полевой влажности, показателей рН и Eh в нейтрально-щелочных почвах

На контрольном участке в долине р. Черная строение профиля и основные свойства генетических горизонтов почв, находящихся под воздействием минерализованных вод от солеотвала БКПРУ-3, были представлены в разделе 3.3.2. В профиле аллювиальных серогумусовых

глеевых солончаковых почв отмечены оглеенные горизонты темного (вплоть до черного) цвета, образование которых, по-видимому, обусловлено накоплением сульфидных минералов.

Известно, что колебания влажности в гидроморфных почвах сопровождаются существенными изменениями окислительно-восстановительного потенциала [Picek et al., 2000]. В течение летне-осеннего периода 2022 г. на контрольном участке в долине р. Черная на глубине около 10-40 см полевая влажность аллювиальной почвы находилась в пределах 13-24% (рисунок 33; 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.

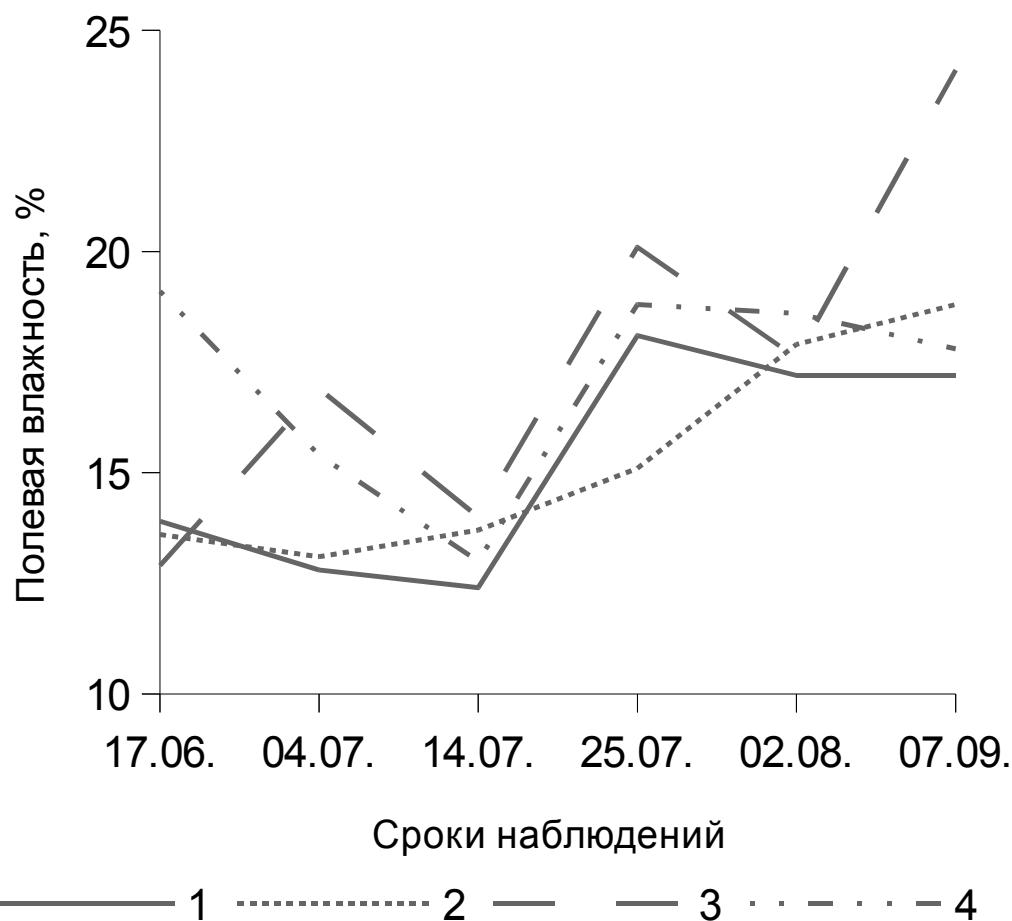


Рисунок 33 – Полевая влажность в аллювиальной почве из долины р. Черная на глубине: 1 – 10±2 см; 2 – 20±2 см; 3 – 30±2 см; 4 – 40±2 см

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 pH (рисунок 34, А; приложение И). На глубине около 40 см в половине сроков наблюдений отмечали слабощелочную реакцию (7,7-7,8 pH), в остальное время – нейтральную реакцию почвенной среды.

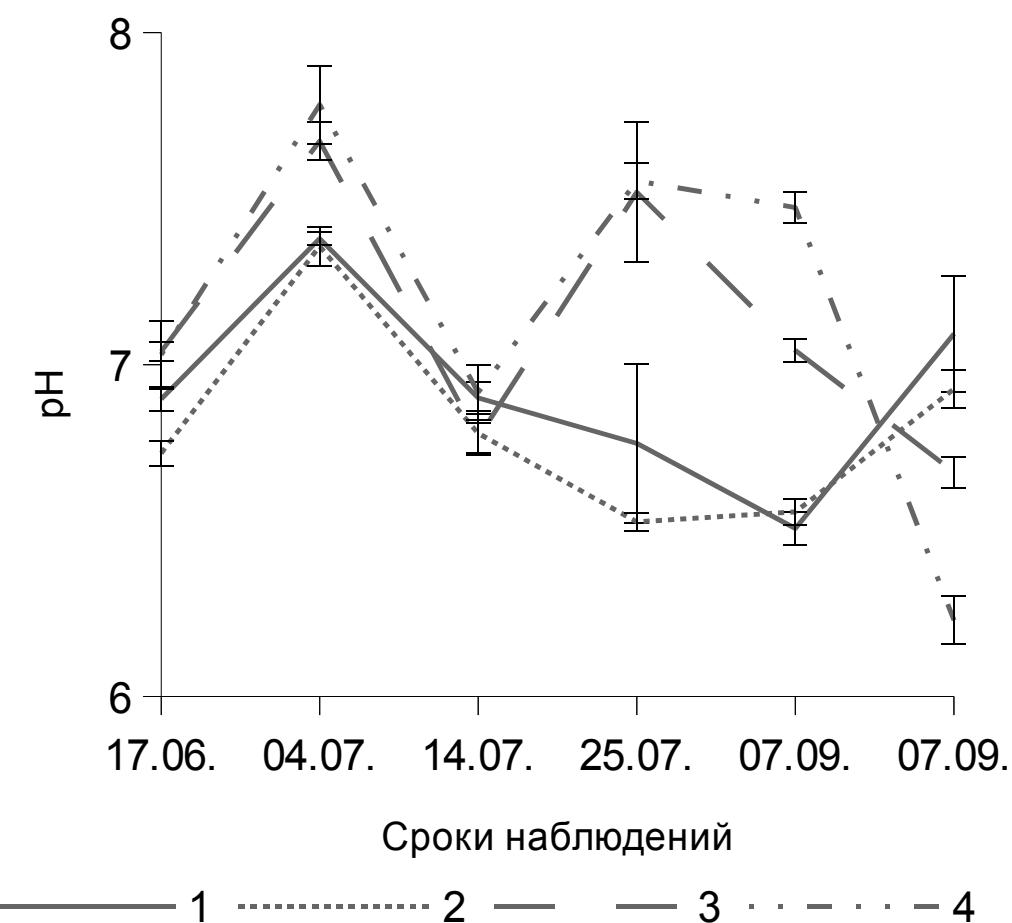


Рисунок 34 – Величина pH в аллювиальной почве из долины р. Черная на глубине: 1 – 10±2 см; 2 – 20±2 см; 3 – 30±2 см; 4 – 40±2 см

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 (рисунок 35; приложение И); 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.

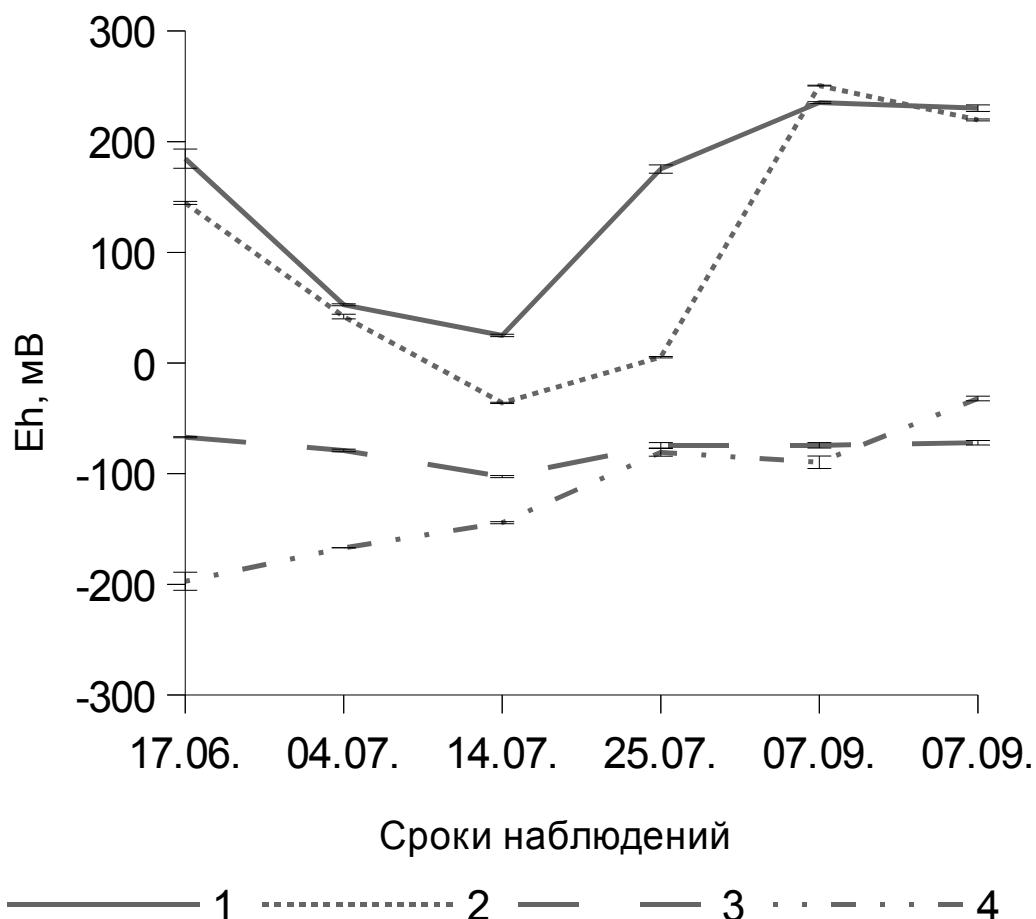


Рисунок 35 – Величина Eh в аллювиальной почве из долины р. Черная на глубине: 1 – 10±2 см; 2 – 20±2 см; 3 – 30±2 см; 4 – 40±2 см

Аэрированные почвы имеют Eh более +400 мВ [Кауричев, 1967], следовательно, для верхней части профиля солончаковой почвы из долины р. Черная характерна восстановительная обстановка. По W.J. Mitsch и J.G. Gosselink [Mitsch et al., 2015] в почвах с нейтральной реакцией среды величина Eh около 225-250 мВ свидетельствует о развитии процессов восстановления азота и марганца; а 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 сульфата требуются отрицательные значения Eh [Harter et al., 1965; Takai et al., 1966; Connell et al.,

1968]. По W.J. Mitsch и J.G. Gosselink [Mitsch et al., 2015] в почвах с нейтральной реакцией среды  $\text{SO}_4^{2-}$  восстанавливается до  $\text{S}^{2-}$  при величине Eh от  $-100$  до  $-200$  мВ. Следовательно, в исследуемой аллювиальной почве на глубине около 30-40 см при Eh в пределах от  $+100$  до  $-200$  мВ развиваются процессы восстановления железа и серы.

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 редуктанты [Зайдельман, 1998]. Описаны железовосстанавливающие бактерии, способные использовать энергию от восстановления Fe(III) для поддержания роста [Coates, 1999]; многие из них (представители родов *Shewanella*, *Panatoea* и *Rhodoferax*) не являются строгими анаэробами и способны использовать для дыхания кислород [Lin et al, 2004].

#### Динамика полевой влажности, показателей pH и Eh в кислых почвах

В долине р. Ленва, находящейся под воздействием шламохранилища БКПРУ-3, сформировались почвы, обладающие резкокислой реакцией почвенной среды. Строение профиля данных почв и основные свойства их генетических горизонтов были показаны в разделе 3.3.3.2. На двух почвах (разрезы 18 и 19), из представленных в разделе 3.3.3.2, в 2022 г. были проведены режимные наблюдения.

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

влажность колебалась в пределах 9-32%; прослежена некоторая тенденция к увеличению влажности от начала лета к сентябрю (рисунок 36; 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.

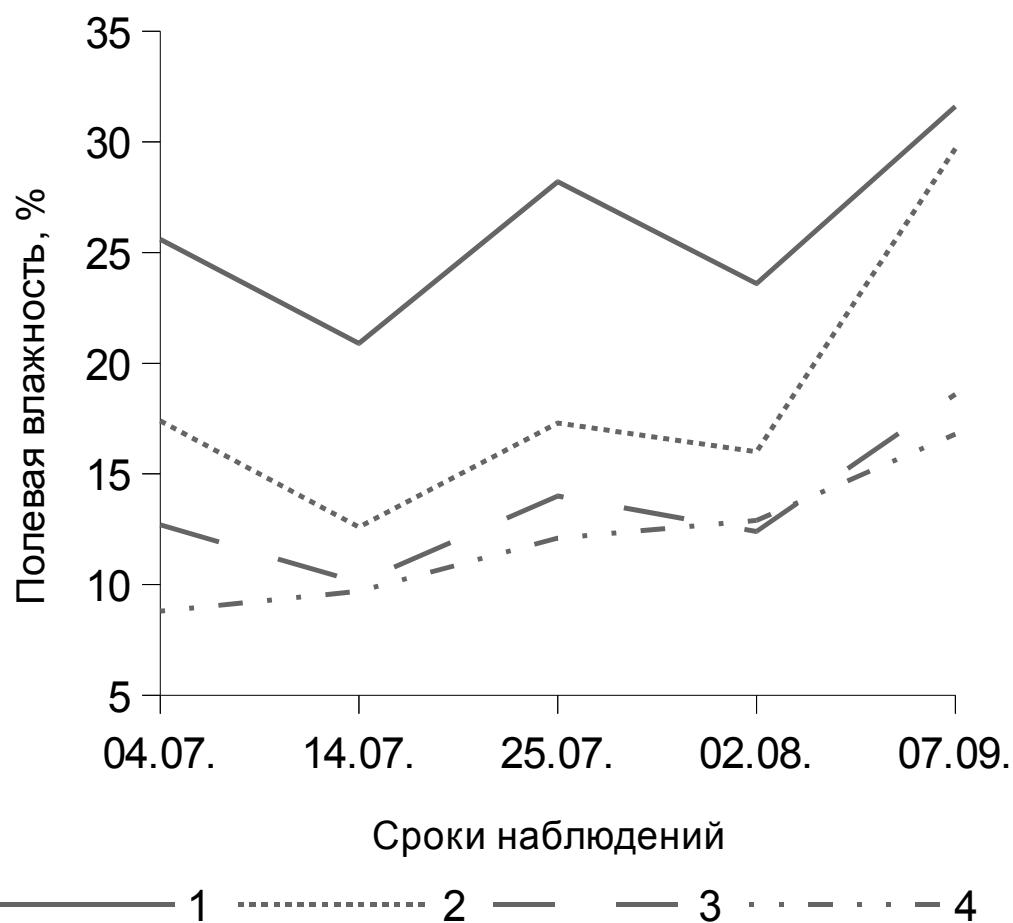


Рисунок 36 – Динамика полевой влажности в аллювиальной гумусовой глеевой солончаковой почве (разрез 18) в долине р. Ленва на глубине:

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% (рисунок 37; 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.

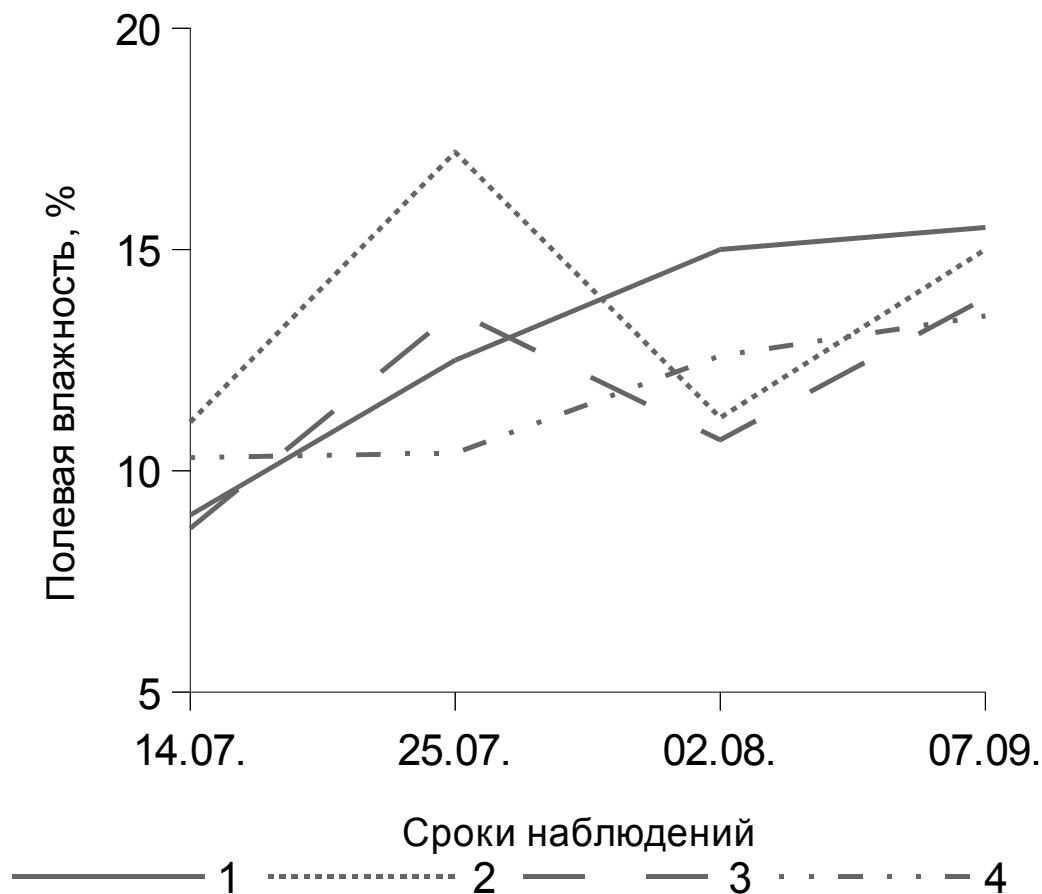


Рисунок 37 – Динамика полевой влажности в аллювиальной гумусовой глеевой солончаковой почве (разрез 19) в долине р. Ленва на глубине:

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 во всех трех почвенных разрезах. 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.

Для pH и Eh в почвах характерна суточная и сезонная изменчивость в зависимости от климатических условий и влажности почвы [Mansfeldt, 2003; Sabiene et al., 2010]. Обе аллювиальные почвы в период наблюдений характеризовались резкокислой реакцией почвенной среды: на глубине около

10 см рН менее 3, на глубине около 20 см – 3-4 рН (рисунки 38-39; приложение М). В почве из разреза 18 на глубине около 30-40 см кислотность почвы снижалась до 4,7-5,9 рН; почва из разреза 19 в этом слое была более кислой – в пределах 4-5 рН. В почве из разреза 18 за период наблюдений прослежена тенденция к повышению кислотности; в почве из разреза 19, напротив, в начале осени кислотность была наименьшей. Считается, что резкокислая реакция среды (менее 4 рН) характерна для почв, в которых идут процессы окисления сульфидов с образованием серной кислоты [Dent, 1993; Husson et al., 2000; Michael, 2018].

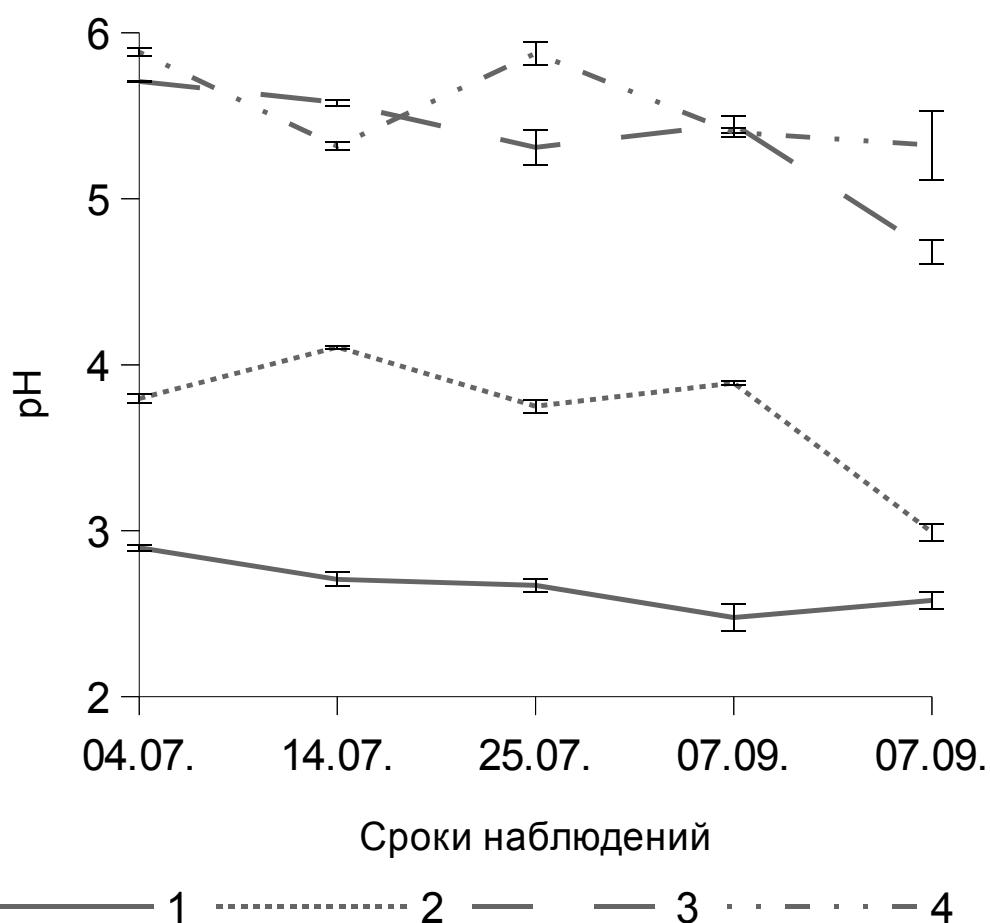


Рисунок 38 – Величина рН в аллювиальной почве (разрез 18) из долины р. Ленва на глубине: 1 – 10±2 см; 2 – 20±2 см; 3 – 30±2 см; 4 – 40±2 см

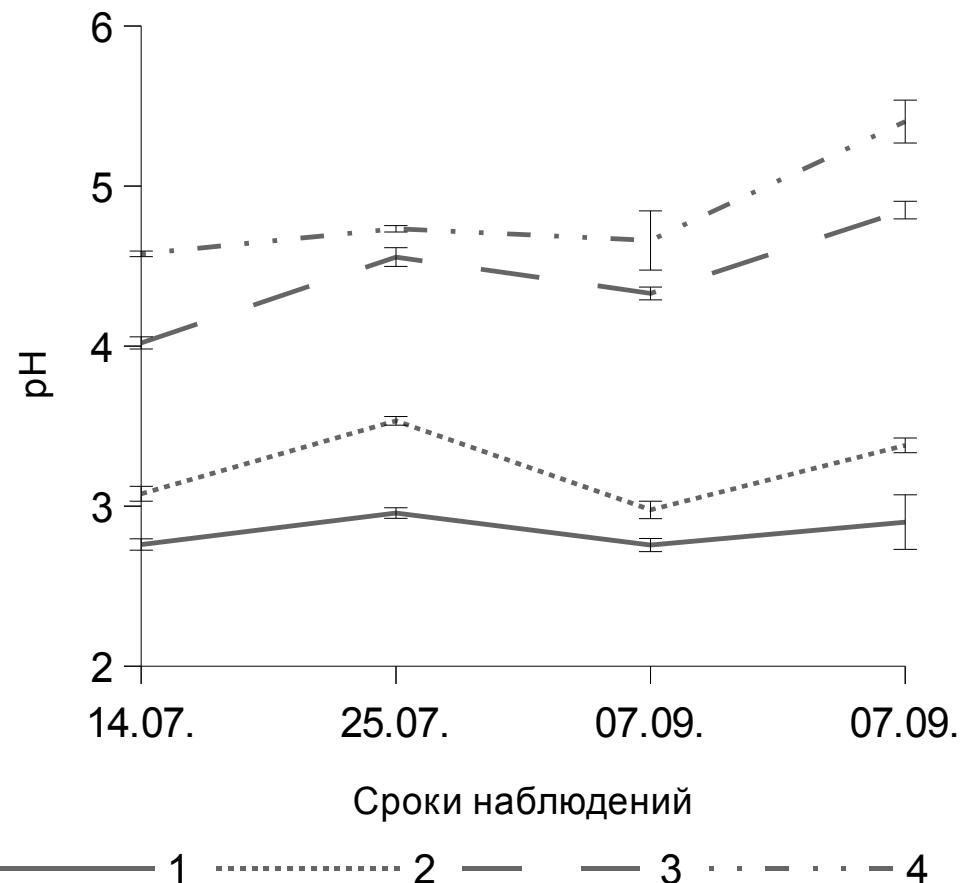


Рисунок 39 – Величина рН в аллювиальной почве (разрез 19) из долины р. Ленва на глубине: 1 – 10±2 см; 2 – 20±2 см; 3 – 30±2 см; 4 – 40±2 см

В течение периода наблюдений в обеих почвах из долины р. Ленва на глубине около 10 см отмечали окислительную обстановку ( $Eh$  450-540 мВ). В почве из 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 из 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 (рисунки 40-41; приложение М).

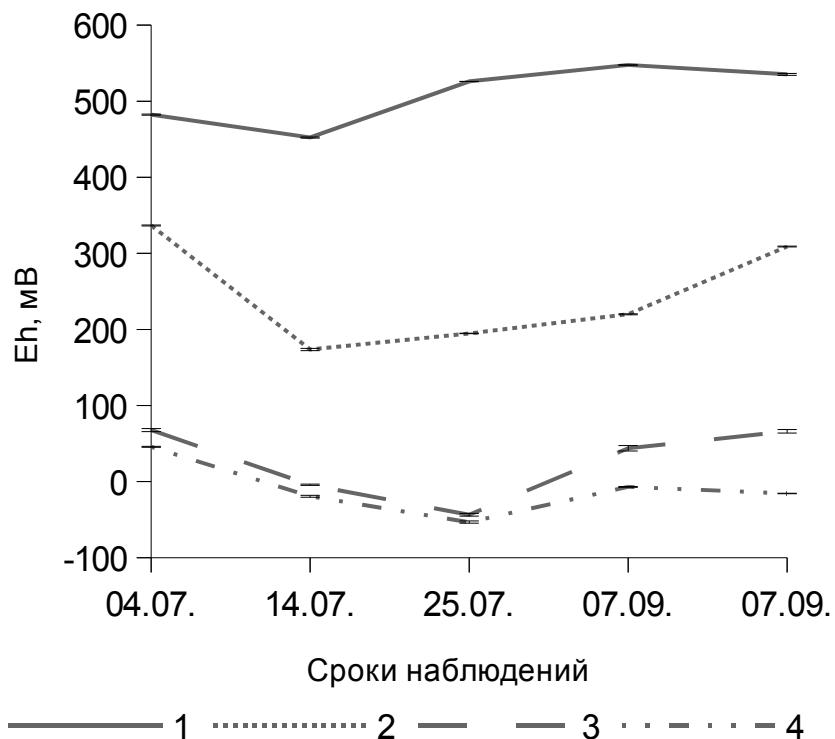


Рисунок 40 – Величина Eh в аллювиальной почве (разрез 18) из долины р. Ленва на глубине: 1 –  $10 \pm 2$  см; 2 –  $20 \pm 2$  см; 3 –  $30 \pm 2$  см; 4 –  $40 \pm 2$  см

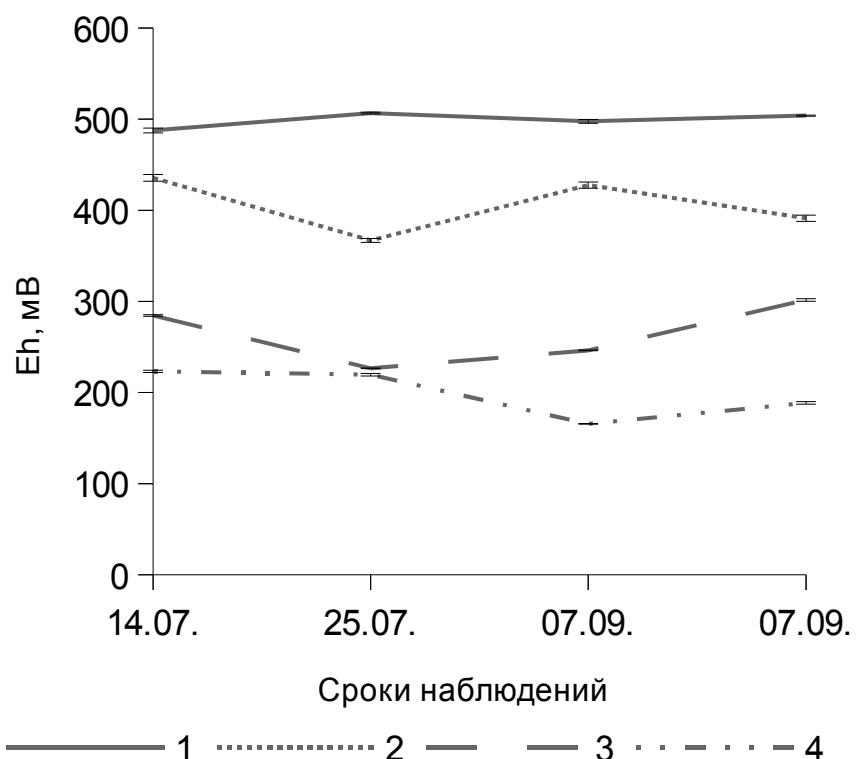


Рисунок 41 – Величина Eh в аллювиальной почве (разрез 19) из долины р. Ленва на глубине: 1 –  $10 \pm 2$  см; 2 –  $20 \pm 2$  см; 3 –  $30 \pm 2$  см; 4 –  $40 \pm 2$  см

Восстановительная среда с Eh менее 100 мВ предполагает развитие процессов восстановления железа [Mitsch et al., 2015]. О подвижности восстановленного железа, множественных переходах  $\text{Fe}^{3+} \leftrightarrow \text{Fe}^{2+}$  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 pH 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, отсутствует темная (почти черная) окраска горизонтов.

Считается, что pH и Eh отрицательно коррелируют в почвах, pH имеет тенденцию увеличиваться при развитии биохимического восстановления и уменьшаться в окислительных условиях [Van Breemen, 1987; Bohrerova et al., 2004]. Связь между этими показателями в исследуемых аллювиальных солончаковых почвах долин рек Черная и Ленва была подтверждена регрессионной зависимостью между показателями pH ( $y$ ) и Eh ( $x$ ):  $y = 6,35 - 0.0068x$ ; коэффициент корреляции  $R = -0,84$ ; критерий Фишера  $F=130$ ; уровень значимости  $P=0,00$  (рисунок 42). Согласно уравнению, адекватному полученным данным, в верхних слоях (около 10-40 см) почв при Eh около – 20 мВ величина pH=6,6, а при Eh=500 мВ pH снижается до 3,0. Изменения Eh резко влияют на реакцию среды в почвах, содержащих пирит, при окислении которого образуется серная кислота [Dent, 1993; Husson et al., 2000].

Полученная нами зависимость косвенно подтверждает развитие процессов окисления сульфидов при поступлении кислорода в аллювиальные почвы, образующаяся при этом серная кислота создает резкокислую реакцию почвенной среды. Восстановленную серу ( $\text{H}_2\text{S}$  или  $\text{FeS}_2$ ) могут окислять до серной кислоты автотрофные бактерии, такие, как *Thiobacillus* spp. [Ivarson et al., 1982; Kittrick et al., 1982; Dent, 1993], а также представители родов *Shewanella*, *Panatoea* и *Rhodoferax*, которые способны использовать для дыхания кислород [Lin et al., 2004].

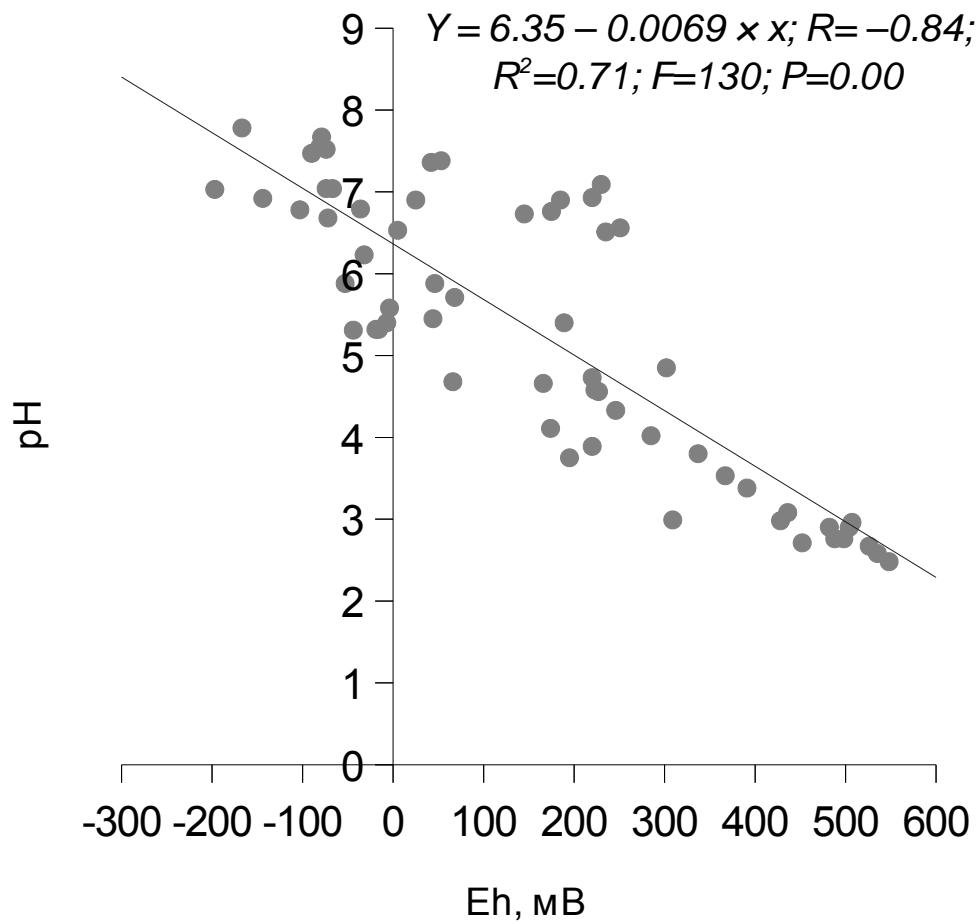


Рисунок 42 – Зависимость между реакцией почвенной среды и окислительно-восстановительными условиями в аллювиальных глеевых солончаковых почвах

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

Данные режимных наблюдений указывают на то, что в техногенно засоленных аллювиальных почвах долин малых рек Прикамья развиваются процессы, приводящие к формированию почв с сильноизвестной реакцией среды: 1) сульфатредукция и образование сульфидов железа (в том числе пирита) при участии сульфатвосстанавливающих бактерий; 2) окисление новообразованных сульфидов с образованием серной кислоты и резкому повышению кислотности почв. На месторождении калийных солей в местах

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

Экологические риски, связанные с распространением резко кислых аллювиальных солончаковых почв в Прикамье, до сих пор не получили необходимой оценки. В результате сернокислого гидролиза минералов происходит мобилизация элементов; подвижные железо, алюминий, тяжелые металлы и металлоиды (в том числе, мышьяк) могут вызывать подкисление грунтовых и поверхностных вод, гибель растительности, рыб и других водных организмов, разрушение бетонных и стальных конструкций [Sohlenius et al., 2002; Rosicky et al., 2004; Nordmyr et al., 2008; Ljung et al., 2009; Poch et al., 2009]. 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, по-видимому, требует дальнейшего изучения.

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

В мировой корреляционной базе почвенных ресурсов [WRB, 2014] дополнительные квалификаторы Chloridic, Gypsic, Salic, Sodic обозначают признаки антропогенного происхождения, связанные с водной миграцией техногенных солей. Вслед за предложением использовать квалификатор Calcitechnic для обозначения карбонатов кальция техногенного происхождения [Hulisz et al., 2018], нам представляется целесообразным и логичным предложить использовать дополнительные квалификаторы Salictechnic, Chloridictechnic, Gypsictechnic, Sodictechnic для почв с аккумуляцией техногенных солей, хлоридных солей, гипса, а также насыщенных обменным натрием (более 15% от ЕКО).

Согласно WRB [2014] чрезвычайно кислый подповерхностный горизонт мощностью  $\geq 15$  см с  $\text{pH} < 4$ , в котором серная кислота образуется в результате окисления сульфидов, получил название Thionic – тионовый

горизонт. Тионовые горизонты обычно имеют бледно-желтые (ярозитовые) или желтовато-коричневые (швертманнитовые) пятна или покрытия. В перечне диагностических горизонтов почв России горизонт Thionic отсутствует [Классификация и диагностика..., 2004; Хитров, 2021]. В связи с появлением признаков нового горизонта в аллювиальных солончаковых резкокислых почвах долин малых рек Прикамья считаем целесообразным рекомендовать дополнительный квалификатор Thionictechnic к использованию в названии почв.

## ВЫВОДЫ

1. Почвенно-грунтовые воды в долинах малых рек Прикамья, формирующиеся под влиянием отвально-шламового хозяйства ПАО «Уралкалий», отнесены к категории минерализованных вод преимущественно слабокислых с хлоридно-натриевым химизмом, содержащих некоторое количество сульфат-ионов.

2. В морфологическом профиле аллювиальных почв таежно-лесной зоны, находящихся под воздействие минерализованных вод, появились признаки карбонатообразования («всплытие» от соляной кислоты) и аккумуляции гипса в форме округлых стяжений. Черная окраска почвенных горизонтов и слоев, а также запах сероводорода (в отдельных случаях) свидетельствуют, по-видимому, о развитии сульфидогенеза.

3. При близком стоянии (менее 100 см от поверхности) минерализованных почвенно-грунтовых вод аллювиальные почвы характеризовались солончакостью, средним и сильным засолением, преимущественно хлоридным, в отдельных случаях сульфатно-хлоридным, натриевым и калиево-натриевым химизмом.

4. В почвенном поглощающем комплексе аллювиальных солончаковых насыщенных почв, находящихся преимущественно в восстановительных условиях, преобладали ионы  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$  (50-90% от емкости поглощения). Содержание карбонатов в профиле почв составляло от 0,5% до 6,7%, количество гипса достигало 11%.

5. Аллювиальные солончаковые ненасыщенные почвы, характеризующиеся периодически окислительными условиями, имели сильнокислую реакцию почвенной среды (менее 4 рН), сильную ненасыщенность основаниями (до 77%), содержали до 5% гипса.

6. В настоящее время площади аллювиальных солончаковых почв в обследованных частях долины р. Быгель составляют 0,2 га, р. Черная – 17 га, р. Ленва – 15 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. Спириidonов, 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. Базилевич, Н.И. Лесостепные солоди / Н.И. Базилевич – М. : Наука, 1965. – 97 с.
5. Белкин, В.В. Мониторинг геологической среды в процессе разработки калийных месторождений / В.В. Белкин // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2008. – № 1. – С. 49-59.
6. Бобошко, А.Ю. Экологические проблемы верхнекамского калия / А.Ю. Бобошко, Б.А. Бачурин // Горное эхо. – 2004. – №4. – С. 26-30.
7. Борисевич, Д.В. Рельеф и геологическое строение / Д.В. Борисевич – М. : Урал и Приуралье., 1968. – С. 19-70.
8. Бреслер, Э. Солончаки и солонцы / Э. Бреслер, Б.Л. Макнил, Д.Л. Картер – Л. : Гидрометеоиздат, 1987. – 286 с.
9. Водяницкий, Ю.Н. Диагностика переувлажненных минеральных почв / Ю.Н. Водяницкий – М. : ГНУ Почвенный институт им. В. В. Докучаева РАСХН, 2008. – 81 с.
10. Воробьева, Л.А. Щелочные засоленные почвы России / Л.А. Воробьева, Е.И. Панкова // Почвоведение. – 2008. – №. 5. – С. 517-532.

11. Глазовская, М.А. Общее почвоведение и география почв / М.А. Глазовская – М. : Высшая школа, 1981. – 400 с.
12. Глазовская, М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов / М.А. Глазовская – М. : Географический ф-т МГУ, 2007. – 350 с.
13. 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
14. Гришина, Л.А. Система показателей гумусного состояния почв / Л.А. Гришина, Д.С. Орлов – М : Проблемы почвоведения, 1978. – С. 42-47.
15. Добровольский, Г.В. Систематика и классификация почв (история и современное состояние) / Г.В. Добровольский, С.Я. Трофимов – М. : Изд-во МГУ, 1996. – 80 с.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.

20. Зайдельман, Ф.Р. Процесс глеообразования и его роль в формировании почв / Ф.Р. Зайдельман – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1998. – 300 с.
21. Засоленные почвы России / Отв. редакторы Л.Л. Шишов, Е.И. Панкова – М. : ИКЦ «Академкнига», 2006. – 854 с.
22. 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.
23. 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. Урусовской – М., 1997.
24. Кауричев, И.С. Окислительно-восстановительные условия почв легкого механического состава Мещерской низменности / Кауричев И.С., Шишова В.С. // Почвоведение. – 1967. – № 75. – С. 66-78.
25. Классификация и диагностика почв СССР / В.В. Егоров и др. – М. : «Колос», 1977. – 221 с.
26. Классификация и диагностика почв России / Под ред. Г.В. Добровольского – Смоленск : Ойкумена, 2004. – 342 с.
27. Классификация и диагностика почв России – URL: <http://soils.narod.ru/index.html> (дата обращения 12.04.2023).
28. Ковда, В.А. Происхождение и режим засоленных почв / В.А. Ковда – М. : Изд-во Академии наук, 1946. – 575 с.
29. Копылов, И.С. Геоэкология, гидрогеология и инженерная геология Пермского края / И.С. Копылов – Пермь : Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2021. – 501 с.
30. Коротаев, Н.Я. Почвы Пермской области / Н.Я. Коротаев – Пермь, 1962. – 278 с.
31. Кудряшов, А.И. Верхнекамское месторождение солей / А.И. Кудряшов – М. : ООО «РПФ» Эпсилон Плюс, 2013. – 368 с.

- 32.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.
- 33.Максимович, Н.Г. Техногенные биогеохимические процессы в Пермском крае / Н.Г. Максимович, Е.А. Ворончихина и др. // Геориск. – 2010. – № 2. – С. 38-45.
- 34.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.
- 35.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.
- 36.Назаров, Н.Н. География Пермского края : Природная (физическая) география / Н.Н. Назаров – Пермь, 2006. – 139 с.
- 37.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.
- 38.Овеснов, С.А. Местная флора. Флора Пермского края и ее анализ / С.А. Овеснов – Пермь : Изд-во Перм. гос. ун-т, 2009. – 171 с.
- 39.Овчинников, А.М. Гидрогоеохимия / А.М. Овчинников – М. : Недра, 1970. – 200 с.
- 40.Оленев, А.М. Природа / А.М. Оленев, П.Л. Горчаковский // М. : Российская Федерация : Урал, 1969. – С. 19-70.
- 41.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.
- 42.Перельман, А.И. Геохимия ландшафта / А.И. Перельман – М. : Изд-во Высшая школа, 1966. – 392 с.
- 43.Перельман, А.И. Геохимия природных вод / А.И. Перельман – М. : Наука, 1982. – 154 с.
- 44.Перельман, А.И. Геохимия ландшафта / А.И. Перельман, Н.С. Касимов – М. : МГУ, 1999. – 610 с.
- 45.Пермская область: отрасли, регионы, города: учебно-методический материал. – Пермь, 1997. – 93 с.
- 46.Полевой определитель почв. – М. : Почвенный институт имени В.В. Докучаева, 2008. – 182 с.
- 47.Почвенная карта Пермского края / географическая основа – 1:2 500 000, 25 км в 1 см – Пермь, 1979.
- 48.Почвоведение : Типы почв, их география и использование / Под ред. В.А. Ковды, Б.Г. Розанова – М. : Высш. шк., 1988. – 368 с.
- 49.Почвообразовательные процессы / Под ред. М.С. Симаковой, В.Д. Тонконогова – М. : Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2006. – 510 с.
- 50.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.
- 51.Расписание погоды [Электронный ресурс] – URL: <https://rp5.ru> (дата обращения 20.04.2023).
- 52.Родикова, А.В. О происхождении и свойствах солончаков Хакасии / А.В. Родикова // Вестник Томского государственного университета. – 2007. – №. 305. – С. 208-210.

53. 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.
54. 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.
55. 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
56. Сафоницкий, П.А. Геологическое строение / П.А. Сафоницкий // Пермская область. Пермь, 1959. – С. 19-29.
57. 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.
58. 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.
59. Солнцева, Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов / Н.П. Солнцева – М. : изд-во МГУ, 1998. – 367 с.
60. 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.
61. Соромотин, А.В. Соловое 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.
62. Состояние окружающей среды и здоровья населения г. Перми в 2001 г. : Справочно-информационные материалы. – Пермь, 2002. – 320 с
63. Тонконогов, В.Д. Классификация почв России 1997-2004-2008 / В.Д. Тонконогов, М.И. Герасимова, И.И. Лебедева // Грунтознавство. – 2008. – №.9. – С. 142-146.
64. 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.
65. Филькин, Т.Г. База геоданных «Почвы. Пермский край» / Т.Г. Филькин, О.З. Еремченко, С.Е. Максимова, И.Е. Шестаков – ПГНИУ, Пермь. – 2014.
66. 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.
67. 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.
68. 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.
- 69.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.
- 70.Хитров, Н.Б. Диагностические горизонты в классификации почв России: Версия 2021 г. / Н.Б. Хитров // Почвоведение. – 2021. – № 8. – С. 899-910.
- 71.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.
- 72.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.
- 73.Шкляев, А.С. Климат Пермской области / А.С. Шкляев, В.А. Балков – Пермь : Пермское книжное изд-во, 1963. – 191 с.
- 74.Шраг, В.И. Пойменные почвы, их мелиорация и сельскохозяйственное использование / В.И. Шраг – М. : Россельхозиздат, 1969. – 271 с.
- 75.Шумилов, Е.Н. Усть-Игум / Е.Н. Шумилов // Материалы по Пермской области к Уральской исторической энциклопедии. – Пермь, 1994. – Вып. 1. – С. 146.
- 76.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.
- 77.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.
78. 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.
79. Ястребов, Е.В. Рельеф / Е.В. Ястребов // Пермская область. Пермь, 1959. – С. 30-41.
80. Andriesse, W. Acid sulfate soils, distribution and extent / W. Andriesse, M.E.F. van Mensvoort // Encyclopedia of soil science. Marcel Dekker. – 2002. – P. 6-6.
81. 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.
82. 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.
83. 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.
84. Benner, S.G. Reductive dissolution and biomimetic mineralization of iron hydroxide under dynamic flow conditions / S.G. Benner, C.M. Hansel, R.W. Wielinga, T.M. Barber, S. Fendorf // Environ. Sci. Technol. – 2002. – V.36. – P. 1705-1711.
85. 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.
86. 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.
87. 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.
88. Dent, D.L. Bottom-up and top-down development of acid sulphate soils / D.L. Dent // Catena. – 1993. – V.20. – №4. – P. 419-425.
89. Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils : USDA Agriculture handbook. – 1954. – № 60. – 160 p.
90. 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.
91. 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.
92. 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.
93. 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.
94. 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.
95. 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.

96. 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.
97. 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.
98. 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.
99. 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.
100. 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.
101. 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.
102. Kittrick, J.A. Acid Sulfate Weathering / J.A. Kittrick, D.S. Fanning, L.R. Hossner – *Soil Sci. Soc. Am. Special Pub.*, 1982. – P. 234.
103. 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.
104. 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.
105. 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.

106. Mansfeldt, T. In situ longterm redox potential measurements in a dyked marsh soil / T. Mansfeldt // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. – 2003. – V.166. – № 2. – P. 210-219.
107. 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.
108. Mitsch, W.J. Wetlands / W.J. Mitsch, J.G. Gosselink – New Jersey : John Wiley & Sons, 2015. – 752 pp.
109. Nikiforova, E.M. Long-term dynamics of anthropogenic solonetzicity 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.
110. 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.
111. Phillips, J.D. Soil Complexity and Pedogenesis / J.D. Phillips // Soil Science. – 2017. – V.182. – №4. – P. 117-127.
112. 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.
113. 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.
114. 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.

115. 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.
116. Ramakrishna, D. Environmental impact of chemical deicers – a review / D. Ramakrishna, T. Viraraghavan // Water, Air and Soil Pollution. – 2005. – V.166. – P. 49-63.
117. 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.
118. 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.
119. 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.
120. 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.
121. Sohlenius, G. Sura sulfatjordar läcker metaller - orsaker och möjliga åtgärder / G. Sohlenius, I. Öhborn // Fakta Jordbruk. – 2002. – V.7. – P. 4-4.
122. Szabolcs, I. Salt-affected soils / I. Szabolcs – Florida : CRC Press, 1989. – 274 p.
123. 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.
124. Takai, Y. The mechanism of reduction in waterlogged paddy soil / Y. Takai, T. Kamura // Folia microbiologica. – 1966. – V.11. – P. 304-313.

125. 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.
126. 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.
127. World reference base for soil resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. – World Soil Resources Reports №106. – Rome : FAO, 2015. – 203 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»

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](mailto:gimet@meteo.perm.ru)  
Сайт: [www.meteo.perm.ru](http://www.meteo.perm.ru)

Директору ЕНИ ПГНИУ  
В.А.Наумову

[ecogeopsu@mail.ru](mailto:ecogeopsu@mail.ru)

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

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 штили (1985-2018)

C	СВ	B	ЮВ	Ю	ЮЗ	3	C3	Штиль
11	5	7	15	25	15	3	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 A, 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: **157 см**

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

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

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

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

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

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

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

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

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

## Продолжение приложения Г

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

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

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

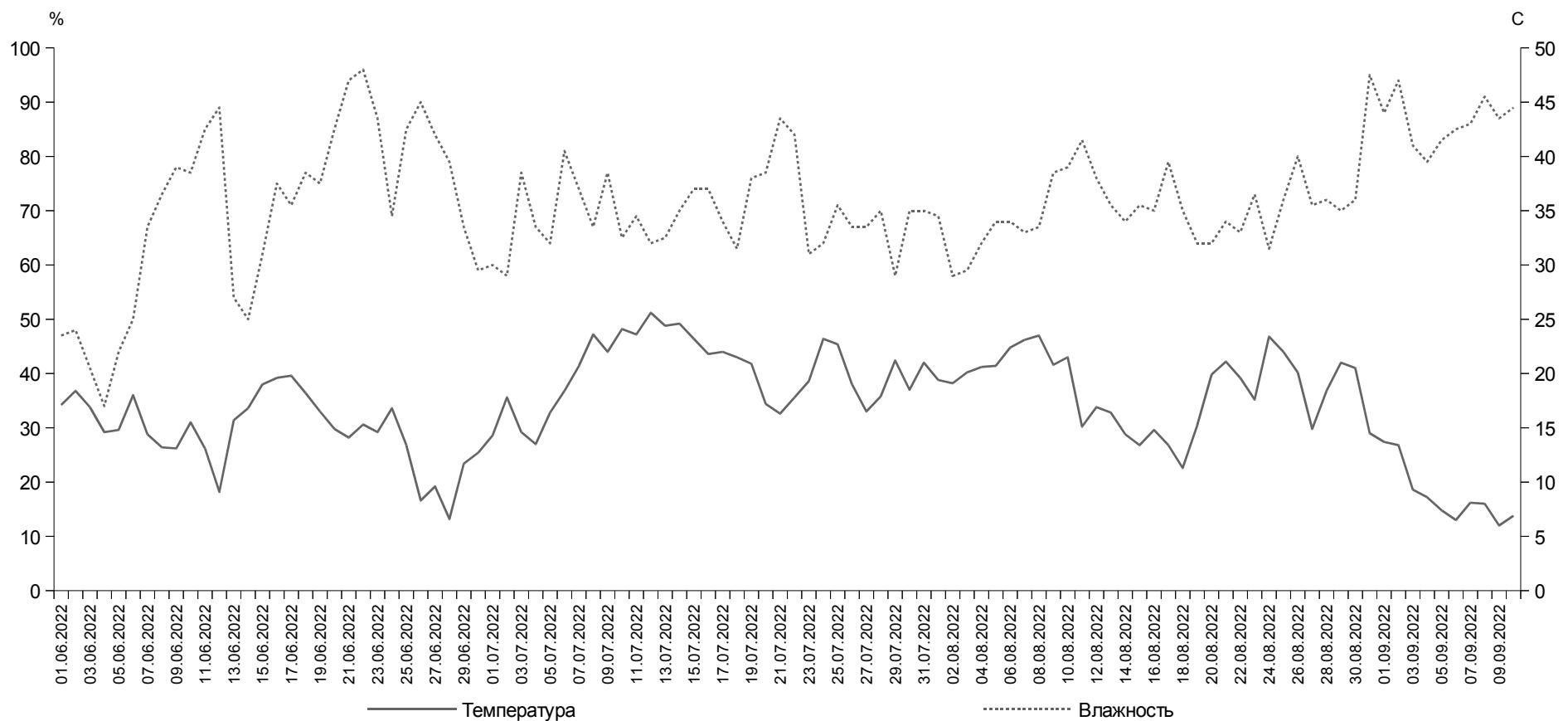
№ разреза	Глубина отбора, см	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Сумма солей, %	Сумма токсичных солей, %
13	9-19	0,55	0,20	10,61	5,77	3,26	13,55	0,36	1,20	1,10
	25-35	1,19	0,39	20,43	8,67	3,09	25,94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

## Продолжение приложения Д

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

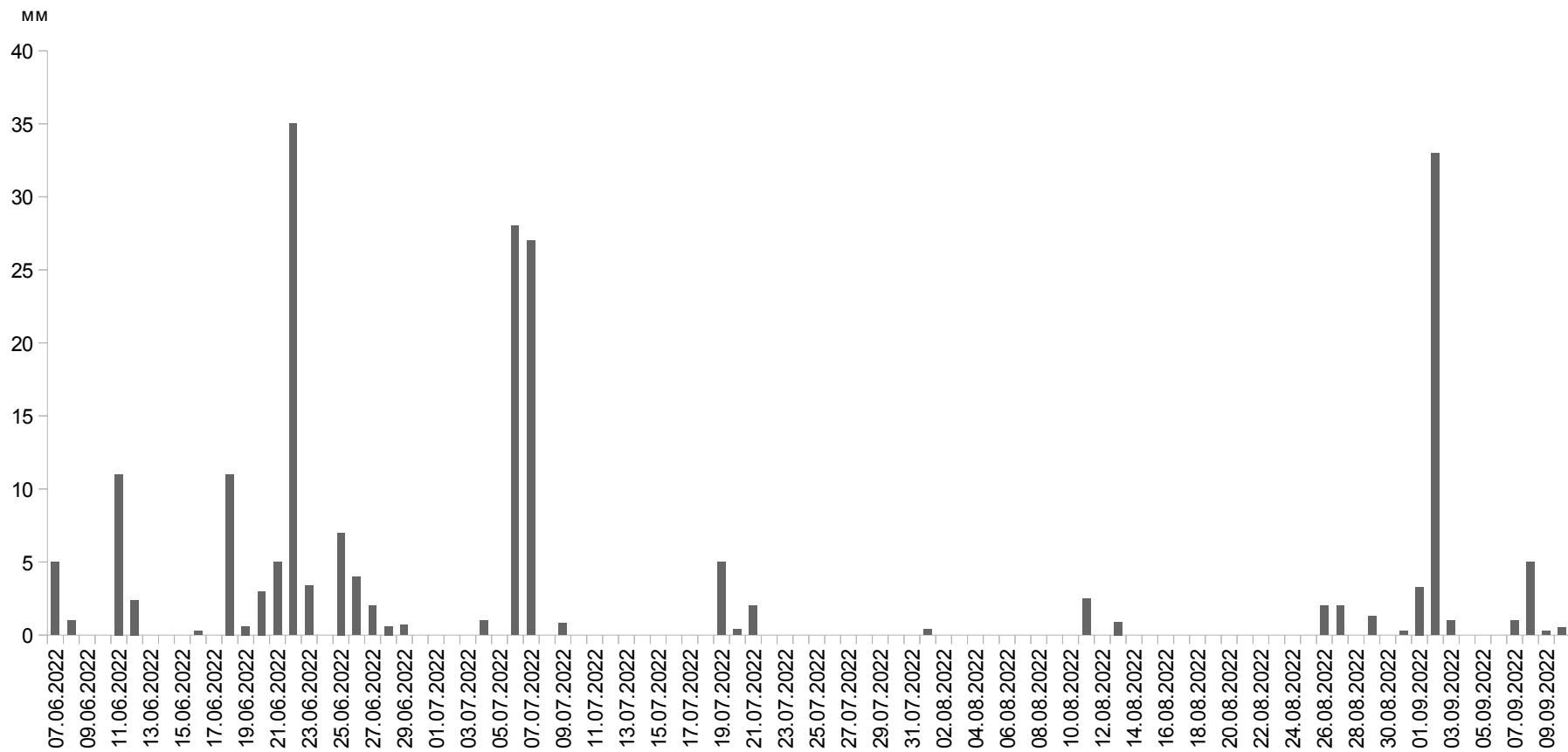
## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Температура ( $^{\circ}\text{C}$ ) и относительная влажность воздуха (%) в период наблюдений по данным метеостанции г. Березники



## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Атмосферные осадки в период наблюдений (мм) по данным метеостанции г. Березники



### ПРИЛОЖЕНИЕ З

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

Период наблюдений	Глубина, см	pH	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 pH и Eh в аллювиальных солончаковых почвах из долины р. Ленва

Период наблюдений	Глубина, см	Разрез 18		Разрез 19	
		pH	Eh	pH	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