

УДК 631.48

**Динамика кислотно-щелочных и окислительно-восстановительных условий в аллювиальных техногенно засоленных почвах таежно-лесной зоны**

*Пахоруков И.В., Еремченко О.З.*

*Пермский государственный национальный исследовательский университет*

**Аннотация**

*Обследованы аллювиальные техногенно засоленные почвы на территории Верхнекамского месторождения солей в Пермском крае. Установлено, что в исследованной части долин малых рек аллювиальные солончаковые почвы занимают десятки га. В течение летне-осеннего периода наблюдений в аллювиальной гумусовой глеевой солончаковой насыщенной почве (Gleyic Fluvisol (Loamic, Salic)) на глубине 10–40 см преобладали восстановительные условия ( $Eh$  от +200 мВ до –250 мВ), благоприятствующие биохимическому восстановлению железа и серы. Реакция почвенной среды колебалась в пределах 6,5–7,8 рН. В аллювиальных глеевых солончаковых ненасыщенных почвах в течение летне-осеннего периода в слое 10–40 см отмечено чередование анаэробных и аэробных условий ( $Eh$  от –50 мВ до +550 мВ); реакция почвенной среды на глубине около 10–20 см колебалась в пределах 2,5–4,1 рН. Установлена регрессионная зависимость рН от величины  $Eh$  при коэффициенте корреляции  $R = -0,84$ . По-видимому, техногенно засоленные аллювиальные почвы обладают потенциалом для образования сульфидных соединений и последующего их окисления с появлением резкокислой реакции почвенной среды.*

**Ключевые слова:** ТЕХНОГЕННОЕ ЗАСОЛЕНИЕ,  $Eh$ , рН, GLEYIC FLUVISOL (LOAMIC, SALIC)

**Введение**

В настоящее время серьезную экологическую опасность представляет нарастающая засоленность почв, вызванная природно-антропогенными процессами. Глобальная площадь первичных солесодержащих почв составляет около 955 млн га, а вторичное

засоление развито еще на 77 млн га, из которых 58% приходится на орошаемые районы [1]. Дополнительную угрозу вторичного галогенеза создают поиск и добыча нефти [1-4], образование техногенных хвостохранилищ и шламоохранилищ [5-7]. В Польше вблизи Иновроцловского содового завода и его прудов-отстойников с отходами производства засоленные почвы образовались на площади 135 га [8].

Калийное производство на Верхнекамском месторождении солей сопровождается накоплением отходов, суммарное количество которых к настоящему времени достигло 425 млн т. Наряду с твердыми галитовыми отходами, складированными на поверхности в виде солеотвалов, образуются значительные объемы глинисто-солевых шламов и избыточных рассолов, для которых сооружают шламоохранилища [9]. Фильтрационные утечки рассолов ПАО «Уралкалий», по официальным данным, достигают сотни тысяч кубометров в год. Их разгрузка в поверхностную гидросеть способствует образованию солончаковых почв в долинах малых рек Прикамья. Эти аллювиальные солончаковые почвы характеризуются как щелочной, так и резкокислой реакцией среды [10]. Известно, что в гидроморфных почвах рН имеет тенденцию увеличиваться при развитии биохимического восстановления и уменьшаться в окислительных условиях [11, 12].

Настоящая работа посвящена изучению реакции почвенной среды (рН) и окислительно-восстановительного потенциала (Еh) в аллювиальных солончаковых почвах, сформировавшихся под влиянием минерализованных вод в долинах малых рек таежно-лесной зоны Прикамья.

### **Материалы и методы**

На расширенных участках долин рек Черная и Лёнва выделены контрольные участки, в пределах которых закладывали прикопки и ключевые почвенные разрезы – до глубины водонасыщенных грунтов. Контрольный участок в долине р. Черная находится под влиянием подземных минерализованных вод, формирующихся у солеотвала Березниковского калийного производственного рудоуправления №3 (рис. 1).

В долине р. Лёнвы контрольный участок расположен в зоне воздействия шламоохранилища Березниковского калийного производственного рудоуправления №3 (рис. 2).

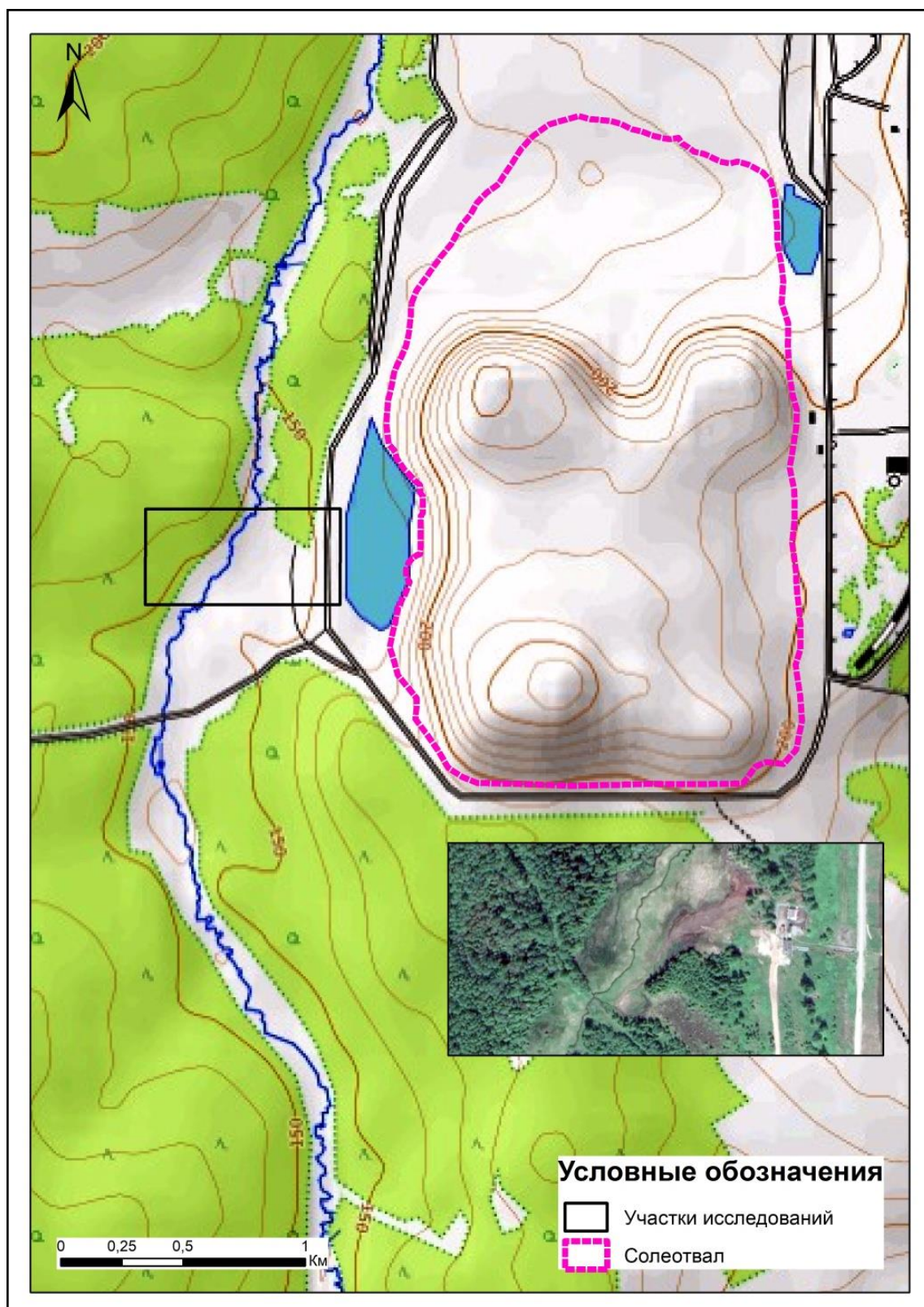


Рис. 1. Расположение контрольного участка для изучения аллювиальных почв в долине р. Черная

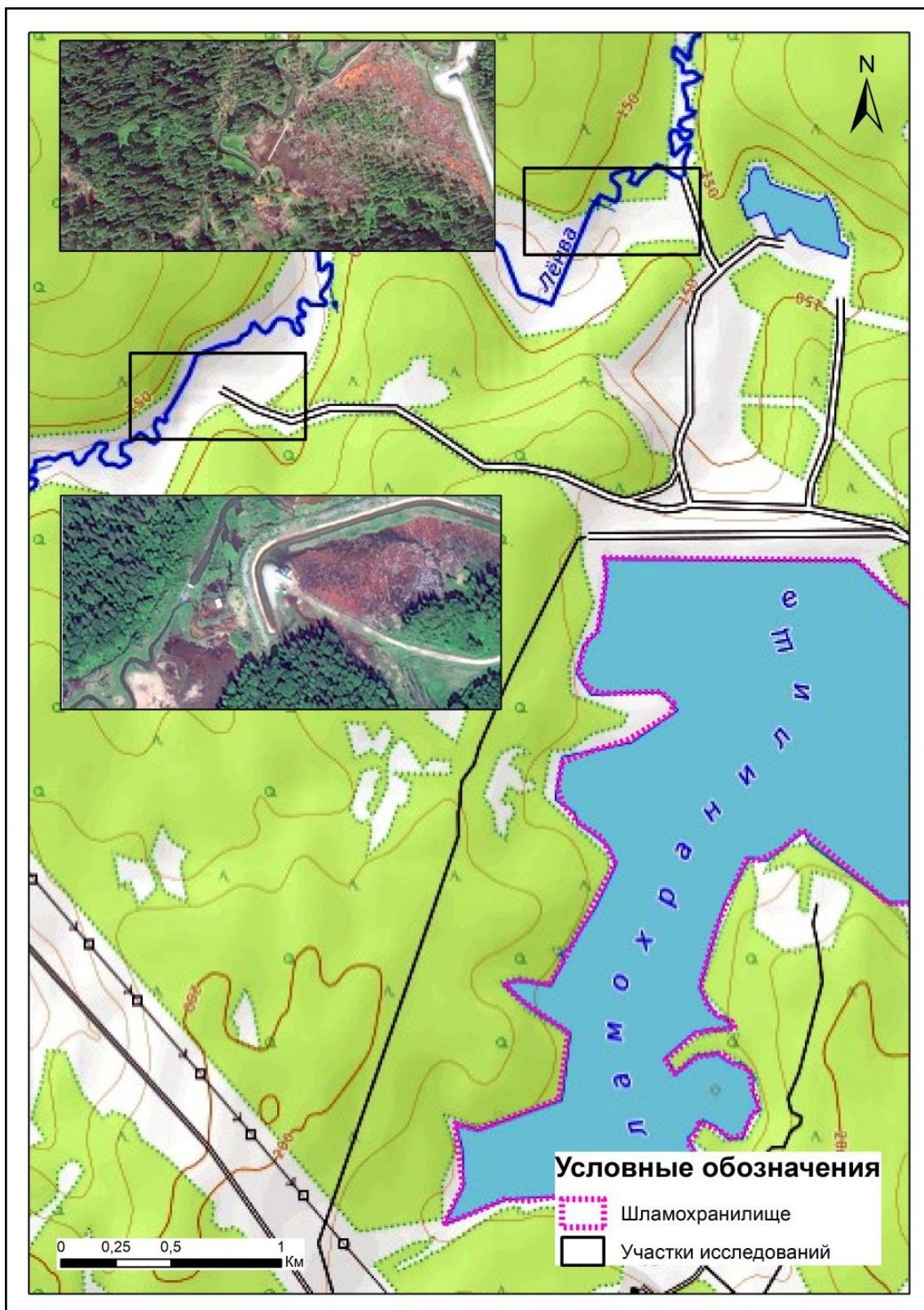


Рис. 2. Расположение контрольных участков для изучения аллювиальных солончаковых почв в долине р. Лёна

Морфологическая характеристика и свойства почв в ключевых разрезах, заложенных в долинах рек Черная и Лёнва опубликованы нами ранее [10, 13].

В летне-осенний период 2022 г. на контрольных участках изучили динамику рН и Eh почв потенциметрическим методом с помощью портативного рН-метра HI-9025 (Hanna Instruments, Германия), оборудованного электродами редокс HI 3230, рН HI 1230 и термокомпенсатором, на глубинах  $10\pm 2$ ,  $20\pm 2$ ,  $30\pm 2$ ,  $40\pm 2$  см в трехкратной повторности. Сопряженно из прикопок отобраны смешанные почвенные пробы для определения полевой влажности – весовым методом в лабораторных условиях.

В границах контрольных участков изучили ионно-солевой состав почвенно-грунтовых вод:  $\text{HCO}_3^-$  – титрованием раствором серной кислоты,  $\text{SO}_4^{2-}$  – весовым методом,  $\text{Cl}^-$  – аргентометрическим методом по Мору,  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  – комплексометрическим методом,  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$  – пламенно-фотометрическим методом, общую минерализацию – путем выпаривания с доведением осадка до постоянного веса.

Результаты режимных наблюдений за полевой влажностью, величиной рН и Eh были обработаны методом регрессионного анализа; адекватность уравнений оценили при уровне значимости нулевой гипотезы  $P < 0,05$ .

Площади обследованных территорий долин рек Черная и Лёнва с аллювиальными солончаковыми почвами рассчитали при помощи программы ArcMap 10.5.

### **Результаты исследований**

Уровень почвенно-грунтовых вод на контрольных участках в речных долинах находился на глубине около 0,5 м. Почвенно-грунтовые воды в долине р. Черная, согласно критериям А.М. Овчинникова [14], относятся к группе вод с повышенной соленостью (табл. 1). Среди катионов в почвенно-грунтовых водах доминировали ионы  $\text{Na}^+$ , в составе анионов преобладали хлориды. В соответствии с рН грунтовые воды отнесли к классу слабокислых вод [15].

Почвенно-грунтовые воды в долине р. Лёнва относятся к группе вод, переходных к рассолам (табл. 1); химизм грунтовых вод хлоридный калиево-натриевый. По величине рН почвенно-грунтовые воды относятся к классам слабокислых.

В долинах обеих рек почвенно-грунтовые воды содержали сульфат-ионы в количестве около 10–12 ммоль(экв)/л.

Таблица 1. Содержание ионов в почвенно-грунтовых водах долин рек Черная и Лёнва, ммоль(экв)/л

Расположение	pH	Минерализация, 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>
Долина р. Черная	6,3	12,4	38	22,5	115,2	23,3	177,2	12,3	4,1
Долина р. Лёнва	6,5	40,0	110	29,2	350,4	180,5	550,1	10,4	2,05

Отчетливые признаки развития солончакового процесса в аллювиальных почвах под изреженным растительным покровом прослежены на площади 17,3 га, что составляет около 16 % площади долины р. Черная. В профиле аллювиальных серогумусовых глеевых почв присутствуют слои темного (вплоть до черного) цвета [13]. В Белоруссии при проведении исследований почвы вблизи расслошламохранилища 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 [16]. В Предуралье о формировании гидротроилитового горизонта в почвах при разгрузке засоленных подземных вод указывали Е.А. Хайруллина с соавторами [17].

Наблюдения за pH и Eh проведены возле ключевого разреза с аллювиальной серогумусовой глеевой солончаковой почвой, которая на глубине 0–40 см содержала 0.9–1.5% водорастворимых солей, химизм засоления в серогумусовом горизонте был сульфатно-хлоридный натриевый, а в средней и нижней части профиля – хлоридно-натриевый, количество водорастворимых сульфат-ионов составляло около 5,7–6,5 ммоль(экв)/кг.

В гидроморфной почве колебания влажности сопровождаются изменением окислительно-восстановительного потенциала [18]. 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% (рис. 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.

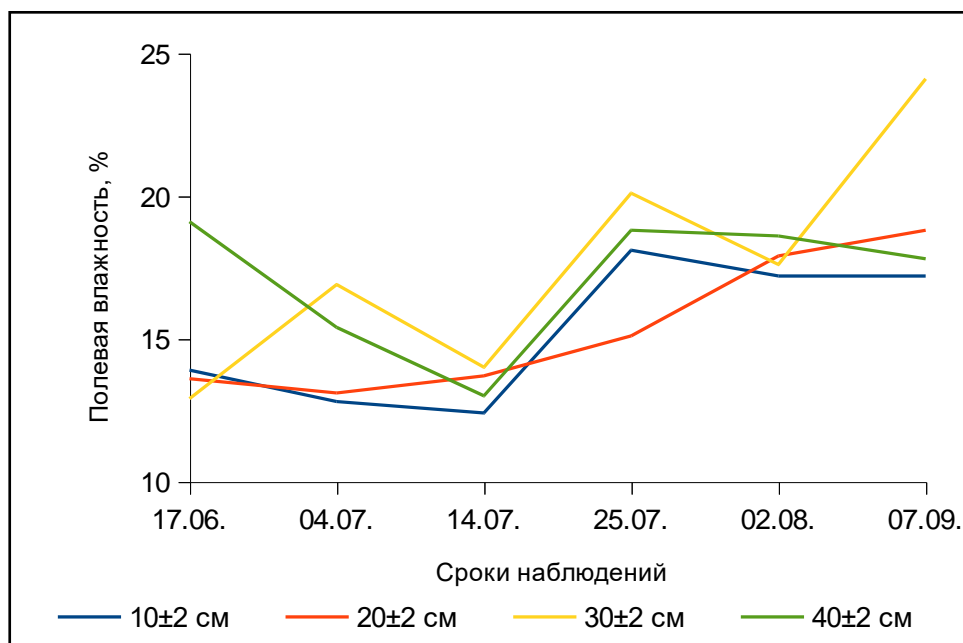


Рис. 3. Динамика полевой влажности в аллювиальной солончаковой почве из долины р. Черная

На глубине около 10–30 см в течение периода наблюдений реакция почвенной среды находилась в пределах нейтральных значений – 6,5–7,5 рН (рис. 4). В слое около 40 см в половине сроков наблюдений отмечали нейтральную реакцию почвенной среды, в остальное время – слабощелочную реакцию (7,7–7,8 рН).

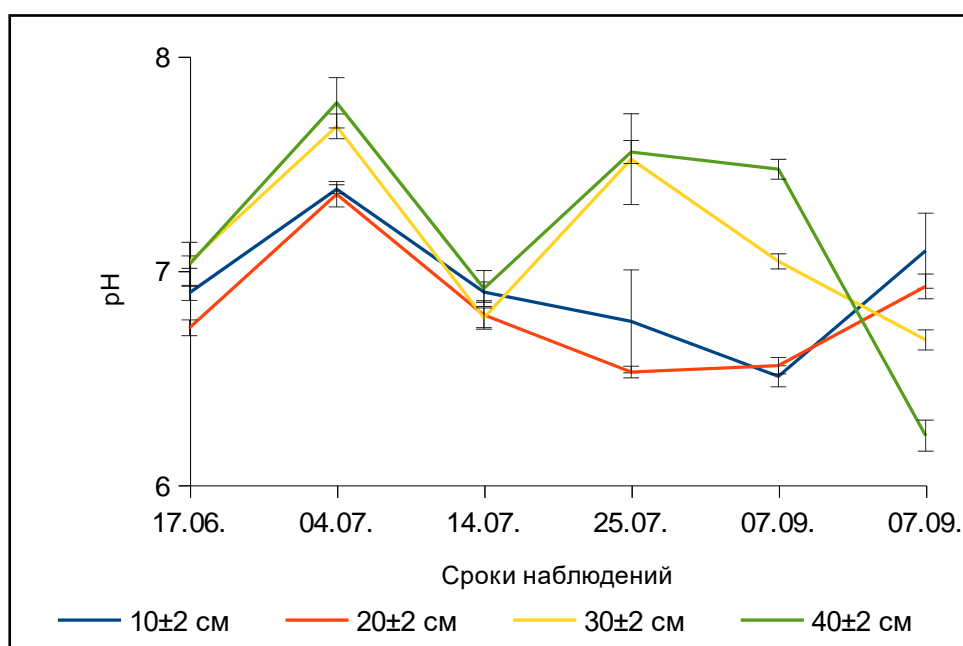


Рис. 4. Динамика рН в аллювиальной солончаковой почве из долины р. Черная

В первую половину периода наблюдений в почве на глубине около 10–20 см величина Eh, как правило, имела небольшие положительные значения – 5–185 мВ; а на глубине 30–40 см в этот период отмечены отрицательные значения Eh (от –70 до –200 мВ). В августе и сентябре в связи с уменьшением влажности во всех слоях почвы наблюдали относительно повышенные значения Eh: на глубине около 10–20 см – 220–250 мВ; на глубине около 30–40 см – от –30 до –90 мВ (рис. 5).

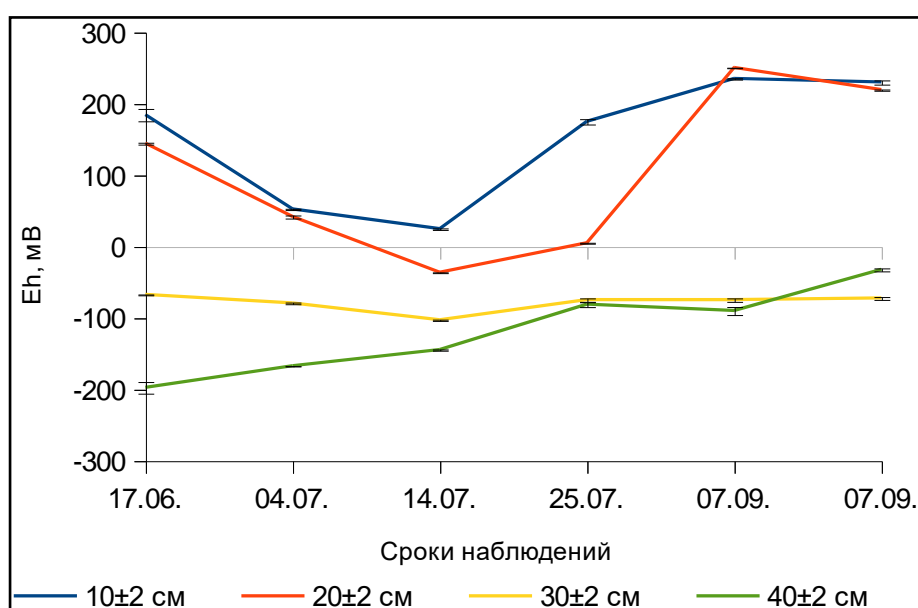


Рис. 5. Динамика Eh в аллювиальной солончаковой почве из долины р. Черная

Известно, что аэрированные почвы имеют Eh более +400 мВ [19], следовательно, для верхней части профиля солончаковой почвы из долины р. Черная характерна восстановительная обстановка. По W.J. Mitsch и J.G. Gosselink [20] в почвах с нейтральной реакцией среды величина Eh от +100 до –100 мВ свидетельствует о развитии процессов восстановления железа  $Fe(III) \rightarrow Fe(II)$ , а  $SO_4^{2-}$  восстанавливается до  $S^{2-}$  при величине Eh от –100 до –200 мВ.

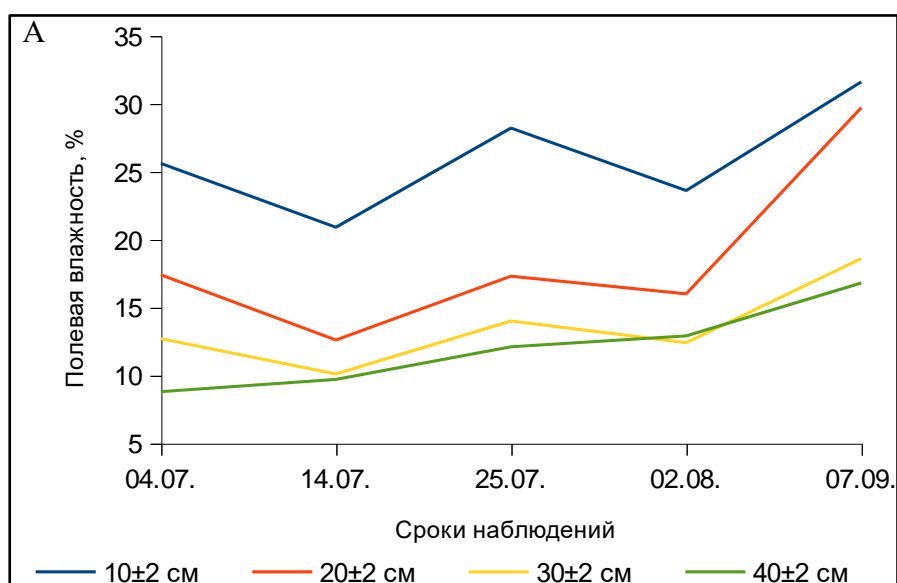
Е.А. Хайруллина с соавторами [17] отмечали образование сульфидных минералов в почве под влиянием техногенных минерализованных вод. Для сульфатредукции необходимы сульфат-ионы, железосодержащие минералы, органическое вещество и анаэробные условия, чередующиеся с ограниченной аэрацией [21–24]. Наши исследования показали, что в долине р. Черная имеются необходимые условия для образования сульфидных минералов, при Eh от +100 до –200 мВ, по-видимому, развиваются процессы восстановления железа и серы.



В обследованной части долины р. Лёнва площадь аллювиальных солончаковых почв под изреженной растительностью составляет около 15 га (8,3% долины). Режимные наблюдения за рН и Eh провели возле двух ключевых разрезов с аллювиальными серогумусовыми глеевыми солончаковыми ненасыщенными почвами, которые на глубине 0–40 см содержали 0,8–1,6% водорастворимых солей, имели хлоридный кальциевый и кальциево-натриевый химизм засоления; количество водорастворимых сульфат-ионов составляло 2,0–4,8 смоль(экв)/кг [10].

В зависимости от климатических условий и влажности почвы реакция почвенной среды и окислительно-восстановительный потенциал демонстрируют определенную временную изменчивость с суточными, сезонными и межгодовыми колебаниями [25, 26]. В течение периода наблюдений в аллювиальной солончаковой почве у ключевого разреза №1 полевая влажность колебалась в пределах 9–32%; прослежена некоторая тенденция к увеличению влажности от начала лета к сентябрю (рис. 6, А). 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 органогенного поверхностного слоя.

В почве у ключевого разреза №2 полевая влажность почвы колебалась в пределах 9–17% (рис. 6, Б). 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.



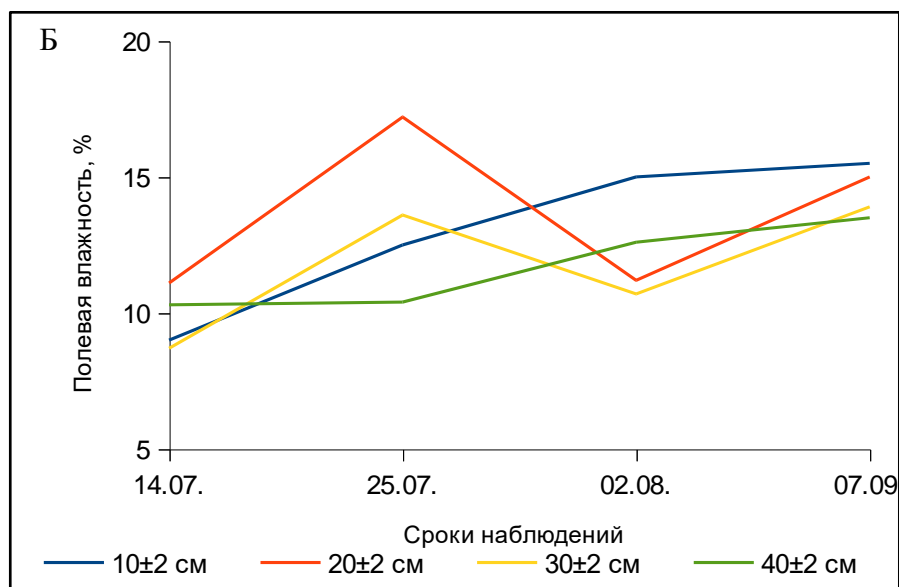
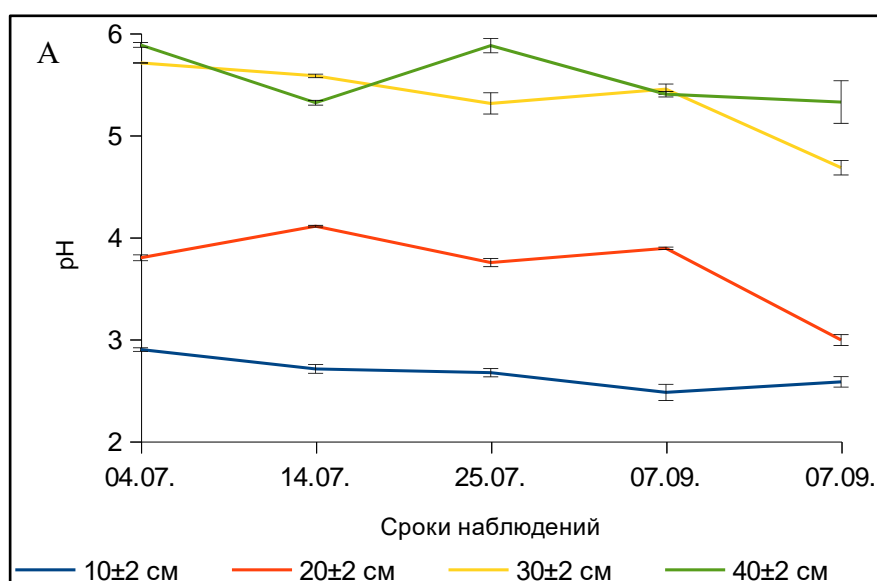


Рис. 6. Динамика полевой влажности в аллювиальной солончаковой почве из долины р. Лёнва: А – у ключевого разреза №1, Б – у ключевого разреза №2

В период наблюдений верхние слои почвы долины р. Лёнва характеризовались резкокислой реакцией почвенной среды: на глубине около 10 см – рН менее 3, на глубине около 20 см – 3–4 рН (рис. 7). В нижерасположенных слоях почвы рН колебалась от 4 рН до 6 рН. Резкокислая реакция среды характерна для почв, в которых идут процессы окисления сульфидов с образованием серной кислоты [27-29].



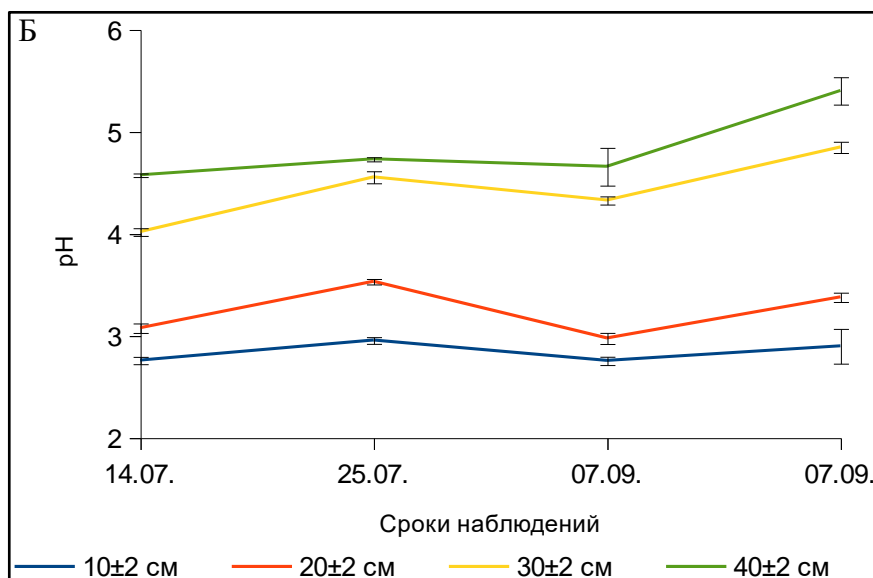
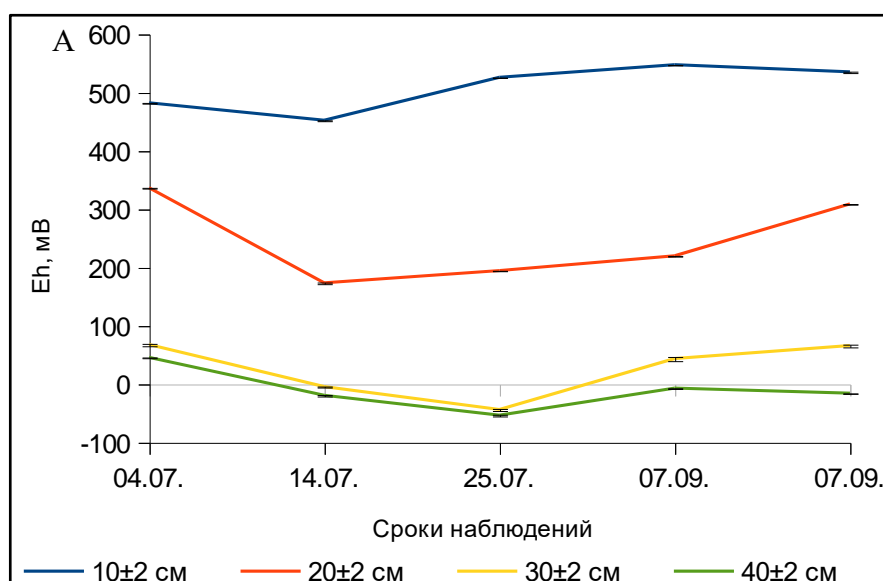


Рис. 7. Величина рН в аллювиальных солончаковых почвах долины р. Лёнва: А – у ключевого разреза №1, Б – у ключевого разреза №2

На глубине около 10 см в почвах долины р. Лёнва отмечали окислительную обстановку ( $E_h$  450–540 мВ); максимальные значения  $E_h$  более 500 мВ были в конце июля – начале сентября (рис. 8). В почве у разреза №1 на глубине около 10-20 см и 30-40 см была слабо восстановительная обстановка ( $E_h$  170–340 мВ) и восстановительная обстановка ( $E_h$  от +70 до -50 мВ) соответственно. В почве у разреза №2 отрицательных значений  $E_h$  не наблюдали; преобладала переходная обстановка, в слое около 20 см  $E_h$  – в пределах 370–440 мВ, на глубине 30–40 см – 160–300 мВ.



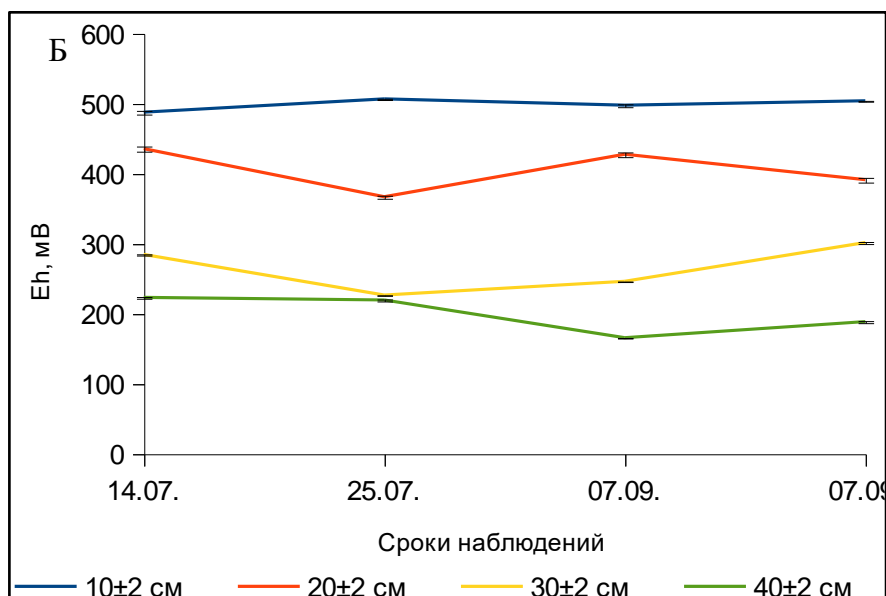


Рис. 8. Величина Eh в аллювиальных солончаковых почвах долины р. Лёнва: А – у ключевого разреза №1, Б – у ключевого разреза №2

Восстановительная среда с Eh менее 100 мВ предполагает развитие процессов восстановления железа [20]. О подвижности восстановленного железа, множественных переходах  $Fe^{3+} \leftrightarrow Fe^{2+}$  в почвах долины Лёнва свидетельствует обилие железистых новообразований ржаво-коричневого цвета [10]. В почвенном покрове долины р. Лёнва встречаются неокислые солончаковые почвы с характерной почти черной окраской, указывающей на образование сульфидных минералов, а также сильноокислые ненасыщенные основаниями солончаковые почвы [10]. Вероятно, пространственное и временное варьирование окислительно-восстановительных условий сопровождается существенной неоднородностью кислотно-щелочной обстановки с изменениями от 8,6 рН до 2,3 рН.

Считается, что показатели рН и Eh отрицательно коррелируют в почвах, рН имеет тенденцию увеличиваться при развитии биохимического восстановления и уменьшаться в окислительных условиях [11, 12]. В исследуемых аллювиальных солончаковых почвах долин рек Черная и Лёнва получена отрицательная регрессионная зависимость между показателями рН (y) и Eh (x):  $y = 6,35 - 0,0068x$ ; коэффициент корреляции  $R = -0.84$ ; критерий Фишера  $F = 130$ ; уровень значимости  $P = 0,00$  (рис. 9). Согласно уравнению, адекватному полученным данным, в верхних слоях (около 10–40 см) почвы при Eh = – 20 мВ величина рН=6,6, а при Eh 500 мВ рН снижается до 3,0.

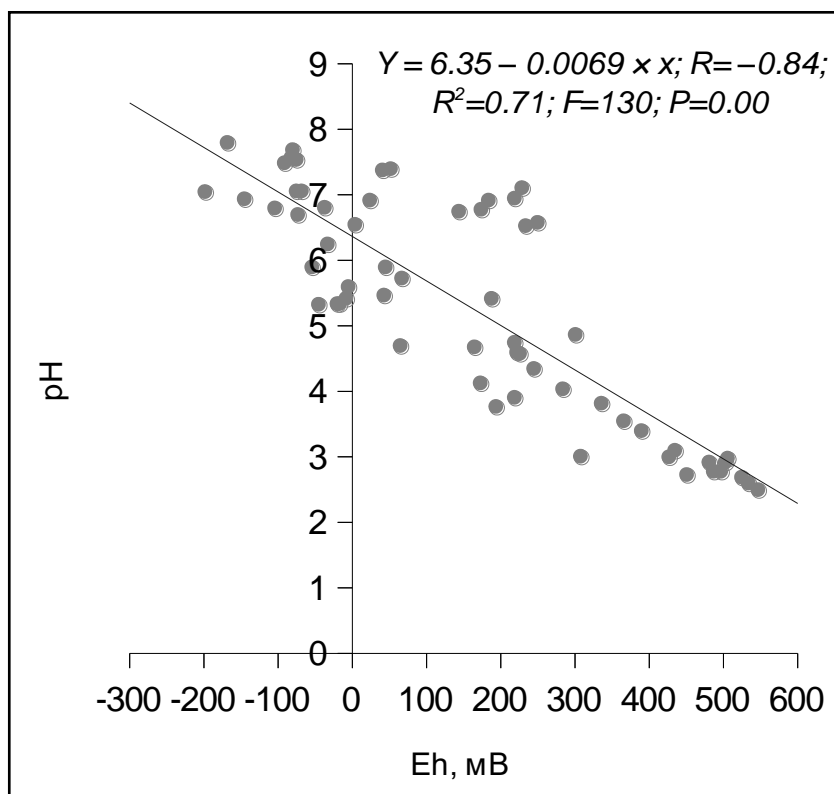


Рис. 9. Зависимость между реакцией почвенной среды и окислительно-восстановительным потенциалом в аллювиальных солончаковых почвах

Ученые отмечали, что изменения Eh резко влияют на реакцию среды в почвах, содержащих пирит, при окислении которого образуется серная кислота [27, 28]. Полученная нами зависимость косвенно подтверждает развитие процессов окисления сульфидов при поступлении кислорода в аллювиальные почвы, образующаяся при этом серная кислота создает резко кислую реакцию почвенной среды. Восстановленную серу ( $H_2S$  или  $FeS_2$ ) могут окислять до серной кислоты автотрофные бактерии, такие, как *Thiobacillus* spp. [21, 22, 27], а также представители родов *Shewanella*, *Panatoea* и *Rhodoferax*), которые не являются строгими анаэробами и способны использовать для дыхания кислород [30].

Резкокислой реакцией почвенной среды (менее 3-4 pH) характеризуются кислотнo-сульфатные почвы, которые называют “самыми отвратительными” почвами на Земле [24, 29, 31, 32]. Токсичность кислотнo-сульфатных почв, прежде всего, связана с низким значением pH, нарушающем метаболизм растительных клеток [33, 34]. В мире выявлено более 17 млн га кислотнo-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 [32, 35]. Ученые указывают на необходимость углубленного изучения кислотно-сульфатных почв [24, 36].

В результате сернокислого гидролиза почвенных минералов происходит мобилизация элементов; подвижные железо, алюминий, тяжелые металлы и металлоиды (в том числе, мышьяк) могут вызывать гибель растительности, подкисление грунтовых и поверхностных вод, гибель рыб и других водных организмов, разрушение бетонных и стальных конструкций [36-40]. Из мобилизованных веществ могут формироваться новые минералы, по мнению [24] образование железистых, а также, кремнистых горизонтов и корок в результате сернокислого выветривания минералов требует дальнейшего изучения. В Прикамье экологические риски, связанные с появлением аллювиальных кислотно-сульфатных солончаковых почв, еще не получили необходимой оценки.

### **Выводы**

В почвенном покрове долин малых рек Прикамья под воздействием техногенных хлоридно-натриевых вод, содержащих сульфаты, сформировались аллювиальные солончаковые почвы, характеризующиеся как слабощелочной, так и резкокислой реакцией среды.

В слабощелочной солончаковой аллювиальной почве в течение летне-осеннего периода преобладала восстановительная обстановка ( $E_h$  опускался до  $-200\text{ мВ}$ ), при которой возможно развитие процессов восстановления серы (VI) и железа (III).

В кислой солончаковой аллювиальной почве наблюдали колебания  $E_h$  от окислительных ( $+540\text{ мВ}$ ) до восстановительных значений ( $-50\text{ мВ}$ ). Выявлена регрессионная зависимость между величиной  $E_h$  и  $pH$ , указывающая на появление резкокислой реакции почвенной среды при смене восстановительных условий на окислительные условия.

### **Список использованных источников:**

1. Imetternicht G., Azinck J. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints // Remote Sensing of Environment. – 2003. Vol. 85. – N 1. – P. 1–20.
2. Ронжина Т.В. Техногенная трансформация дерново-подзолистых почв в районах добычи углеводородного сырья при разливе сточных вод // Естественные и технические науки. – 2009. – № 6. – С. 452–454.

3. Фоминых Д.Е., Щербак Г.Г. Техногенное засоление и возможности рекультивации почв на территориях нефтяных месторождений Западной Сибири // Инженерные изыскания. – 2012. – № 9. – С. 66–71.
4. Якимов А.С., Сванидзе И.Г., Казанцева М.Н., Соромотин А.В. Изменение свойств почв речных долин южной тайги Западной Сибири под действием минерализованных артезианских вод // Почвоведение. – 2014. – № 3. – С. 364–374.
5. Лискова М.Ю. Негативное воздействие, оказываемое на окружающую среду предприятиями по добыче и обогащению калийно-магниевых солей // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т.16. – №1. – С.82–88.
6. Szabolcs I. An overview on soil salinity and alkalinity in Europe // Soil Salinization and Alkalization in Europe. – 1996. – P. 1–12.
7. Gabbasova I.M., Suleimanov R.R. Transformation of gray forest soils upon technogenic salinization and alkalization and subsequent rehabilitation in oil-producing regions of the southern Urals // Eurasian Soil Science. – 2007. – Vol. 40. N 9. – P. 1000–1007.
8. Hulisz P., Charzyński P., Giani L. Application of the WRB classification to salt-affected soils in Poland and Germany // Polish Journal of Soil Science. – 2010. – Vol. 43. N 1. – P. 81–92.
9. Бобошко А.Ю., Бачурин Б.А. Экологические проблемы верхнекамского калия // Горное эхо. – 2004. – №4. – С. 26–30.
10. Eremchenko O.Z., Pakhorukov I.V., Shestakov I.E. Development of the Solonchak Process in Soils of Small River Valleys in the Taiga-Forest Zone in Relation to the Production of Potassium Salts // Eurasian Soil Science. – 2020. – Vol. 53. – N 4. – P. 512–522.
11. Van Breemen N. Effects of redox processes on soil acidity // Netherlands Journal of Agricultural Science. – 1987. – Vol. 35. – N 3. – P. 271–279.
12. Bohrerova Z., Stralkova R., Podesvova J., Bohrer G., Pokorny E. The relationship between redox potential and nitrification under different sequences of crop rotations // Soil and Tillage Research. – 2004. – Vol. 77. – N 1. – P. 25–33.
13. Пахоруков И.В., Еремченко О.З. Свойства вторично засоленных аллювиальных почв в таежно-лесной зоне Прикамья // Сибирский лесной журнал. – 2021. – № 3. – С. 76–86.
14. Овчинников А.М. Гидрогеохимия. – М.: Недра, 1970. – 200 с.
15. Перельман А.И. Геохимия природных вод. – М.: Наука, 1982. – 154 с.
16. Хомич В.С. Сульфидные новообразования в почвогрунтах как результат взаимодействия природных и техногенных факторов // Доклады Академии БССР. – 1985. – Т. XXIX. – №3. – С. 267–270.
17. Хайруллина Е.А., Новоселова Л.В., Шестаков И.Е., Богуш А.А. Формирование природно-техногенных ландшафтов при разработке месторождения калийных солей // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, центральной Азии и Сибири. – 2018. – Т. II. – С. 220–223.

18. Picek T., Simek M., Santruckova H. Microbial responses to fluctuation of soil aeration status and redox conditions // *Biology and Fertility of Soils*. – 2000. Vol. 31. – P. 315-322.
19. Кауричев И.С., Шишова В.С. Окислительно-восстановительные условия почв легкого механического состава Мещерской низменности // *Почвоведение*. – 1967. – № 75. – С. 66–78.
20. Mitsch W.J., Gosselink J.G. *Wetlands*. 5th edition. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2015. – 752 pp.
21. Ivarson K.C., Ross G.J., Miles N.M. Microbiological transformations of iron and sulfur and their applications to acid sulfate soils and tidal marshes // *Acid sulfate weathering*. – 1982. – Vol. 10. – P. 57–75.
22. Kittrick J.A., Fanning D.S., Hossner L.R. *Acid Sulfate Weathering* // *Soil Sci. Soc. Am. Special Pub.* – 1982. – P. 234.
23. Pons L.J., Van Breemen N., Driessen P.M. Physiography of coastal sediments and development of potential soil acidity // *Acid sulfate weathering*. – 1982. – Vol. 10. – P. 1–18.
24. Fanning D.S., Rabenhorst M.C., Fitzpatrick R.W. Historical developments in the understanding of acid sulfate soils // *Geoderma*. – 2017. – Vol. 308. – P. 191-206.
25. Mansfeldt T. In situ long-term redox potential measurements in a dyked marsh soil // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. – 2003. – Vol. 166. – N 2. – P. 210–219.
26. Sabiene N., Kusliene G., Zaleckas E. The influence of land use on soil organic carbon and nitrogen content and redox potential // *Žemdirbystė Agriculture*. – 2010. – Vol. 97. – N 3. – P. 15–24.
27. Dent D.L. Bottom-up and top-down development of acid sulphate soils // *Catena*. – 1993. – Vol. 20. – N 4. – P. 419–425.
28. Husson O., Verburg P.H., Phung M.T., Van Mensvoort M.E.F. Spatial variability of acid sulphate soils in the Plain of Reeds, Mekong delta, Vietnam // *Geoderma*. – 2000. – Vol. 97. – N 12. – P. 1-19.
29. 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 // *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science*. – 2018. – Vol. 41. – N 4. – P. 1627–1641.
30. Lin W.C., Coppi M.V., Lovley D.R. *Geobacter sulfurreducens* can grow with oxygen as a terminal electron acceptor // *Appl. Environ. Microbiol.* – 2004. – Vol. 70. – N 4. – P. 2525–2528.
31. Fanning D.S. *Acid sulfate soils* // *Encyclopedia of Soil Science*. Marcel Dekker, New York. – 2002. – P. 11–13.
32. Fitzpatrick R.W., Shand P., Merry R.H. *Acid sulfate soils* // *Natural history of the Riverland and Murraylands*. – 2009. – Vol. 178. – P. 65–111.
33. Shavrukov Y., Hirai Y. Good and bad protons: genetic aspects of acidity stress responses in plants // *Journal of experimental botany*. – 2016. – Vol. 67. – N 1. – P. 15–30.



34. Bhuyan M.H.M., Hasanuzzaman M., Mahmud J.A., Hossain M., Bhuiyan T.F., Fujita M. Unraveling morphophysiological and biochemical responses of *Triticum aestivum* L. to extreme pH: Coordinated actions of antioxidant defense and glyoxalase systems // *Plants*. – 2019. – Vol. 8. – N 1. – P. 24.

35. Andriessse W., van Mensvoort M.E.F. Acid sulfate soils, distribution and extent // *Encyclopedia of soil science*. Marcel Dekker. – 2002. – P. 6-6.

36. Ljung K., Maley F., Cook A., Weinstein P. Acid sulfate soils and human health a millennium ecosystem assessment // *Environment international*. – 2009. – Vol. 35. – N 8. – P. 1234-1242.

37. Sohlenius G., Öhborn I. Sura sulfatjordar läcker metaller - orsaker och möjliga åtgärder // *Fakta Jordbruk*. – 2002. – Vol. 7. – P. 4-4.

38. Rosicky M., Sullivan L., Slavich P., Hughes M. Factors contributing to the acid sulfate soil scalding process in the coastal floodplains of New South Wales, Australia // *Soil Research*. – 2004. – Vol. 42. – N 6. – P. 587–594.

39. Nordmyr, L., Åström, M., & Peltola, P. Metal pollution of estuarine sediments caused by leaching of acid sulphate soils // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. – 2008. – Vol. 76. – N 1. – P. 141–152.

40. Poch R.M., Thomas B.P., Fitzpatrick R.W., Merry R.H. Micromorphological evidence for mineral weathering pathways in a coastal acid sulfate soil sequence with Mediterranean-type climate, South Australia // *Soil Research*. – 2009. – Vol. 47. – N 4. – P. 403-422.

#### Цитирование:

Пахоруков И.В., Еремченко О.З. Динамика кислотного-щелочных и окислительно-восстановительных условий в аллювиальных техногенно засоленных почвах таежно-лесной зоны [Электрон. ресурс] // *АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал*. – 2023. – № 4. – Режим доступа: [http://agroecoinfo.ru/STATYI/2023/4/st\\_414.pdf](http://agroecoinfo.ru/STATYI/2023/4/st_414.pdf). DOI: <https://doi.org/10.51419/202134414>.