Статья принята в печать и будет опубликована в журнале:
«Вестник Санкт- Петербургского университета. Науки о Земле»

Почвенно-геохимическая оценка засоления территории, прилегающей к Кучукскому месторождению солей (Алтайский край)

Симонова Юлия Владимировна, Жунусова Оксана Радиковна, Чарыкова Марина Валентиновна, Касаткина Галина Алексеевна

DOI: https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.110

Дата получения рукописи: 30.05.2023
Дата принятия рукописи в печать: 10.11.2023

Для цитирования: Симонова, Ю. В., Жунусова, О. Р., Чарыкова, М. В., Касаткина, Г. А. (2024) Почвенно-геохимическая оценка засоления территории, прилегающей к Кучукскому месторождению солей (Алтайский край). *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле,* 69 (1). DOI: https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.110

Это неотредактированный файл принятой к публикации рукописи. До публикации в окончательном виде она будет подвергнута редактированию и верстке. Обратите внимание, что во время производственного процесса могут быть выявлены ошибки, влияющие на содержание. К данной рукописи применяются все правовые оговорки, относящиеся к журналу.

ACCEPTED MANUSCRIPT

УДК 631.48, 550.47

Почвенно-геохимическая оценка засоления территории, прилегающей к Кучукскому месторождению солей (Алтайский край)

Симонова Юлия Владимировна[1], Жунусова Оксана Радиковна[1], Чарыкова Марина Валентиновна[1], Касаткина Галина Алексеевна[2]

[1]Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9
[2]Центральный музей почвоведения имени В.В. Докучаева – филиал Федерального исследовательского центра «Почвенный институт имени В.В. Докучаева», Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Биржевой пр., 6

Симонова Ю.В.: uvsim@yandex.ru;
Жунусова О.Р.: zhun.oksana@gmail.com
Чарыкова М.В.: m-char@yandex.ru;
Касаткина Г.А.: kasatkina-galina@mail.ru

Аннотация

Почвенно-геохимический анализ проводился для оценки влияния разработки месторождения солей оз. Кучук на засоление почв прилегающих территорий. Основными промышленными источниками поступления солей (пыли сульфата натрия) являются садочный бассейн и открытый солеотвал, расположенные в чаше бывшей озерной котловины. Проблема выявления вклада засоления в результате промышленной разработки сопряжена с широким распространением природного засоления почв Кулундинской степи и высоким уровнем естественного солевого фона. По результатам анализа почв, расположенных в границах горного отвода месторождения, выяснилось, что область наиболее интенсивного засоления сосредоточена в восточной и юго-восточной части котловины и обусловлена преобладающим направлением ветра. Содержание солей в почвах импактной зоны составило 1% и более, что существенно превышало значения, характерные для почв фоновых территорий – от 0.3 до 0.6%. Однако с повышением гипсометрического уровня поверхностей, по мере удаления от открытых объектов пылеуноса, а также с подветренной стороны происходило резкое (в

ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

2–3 раза) снижение содержания солей. Почвы, подвергающиеся техногенному засолению, отличались от фоновых почв не только более высоким содержанием солей, но и химизмом засоления. В составе водной вытяжки почв импактной зоны доминировали сульфаты и натрий. В химизме почв фоновой территории становилось заметней участие соды, что является природной галогеохимической особенностью Кулунды. В составе минералов солевых корок и выцветов солей в импактной зоне преобладал тенардит – продукт дегидратации мирабилита, тогда как в поверхностных корочках на фоновых участках разнообразие минералов шире. Среди них присутствовали типичные минералы эвапоритовой ассоциации и их более редкие виды. Таким образом, по ряду свойств, характеризующих засоление почв, удалось выявить область наиболее интенсивного засоления при разработке месторождения мирабилита и определить различия между почвами техногенного и природного засоления.

Ключевые слова: Кучук, мирабилит, Западная Сибирь, засоленные почвы, месторождение солей, техногенный галогенез, солевой фон

1. Введение

Озеро Кучук является крупнейшим в Западной Сибири месторождением минеральных солей. Добычей мирабилита (десятиводного сульфата натрия) на месторождении занимается предприятие ОАО «Кучуксульфат». Разработка ведется открытым способом, поэтому главным техногенным фактором засоления почв прилегающих территорий является процесс эолового переноса солей с поверхности садочного бассейна и солевого отвала.

С одной стороны, многие неблагоприятные свойства почвы могут формироваться естественным путем под влиянием природных факторов почвообразования. С другой стороны, предметом контроля почв при проведении экологического мониторинга являются, прежде всего, их изменения, вызванные деятельностью человека.

Оценка вклада антропогенной составляющей в засоление приозерной территории осложняется естественными факторами развития Кулундинской степи, такими как слабая дренированность территории, широкое развитие в почвах гидроморфизма, засоления, осолонцевания и осолодения (Засоленные почвы…, 2006).

В вопросах генезиса засоления почв Кулунды большинство исследователей придерживается гипотезы континентального засоления (Герасимов и Иванова, 1934; Ульященко, 1935; Ковда, 1937; Кучин, 1940; Базилевич, 1965). Однако существует и

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ACCEPTED MANUSCRIPT

другая точка зрения (Казанцев, 1998), согласно которой основным источником поступления солей в южные ландшафты Западной Сибири могут являться атмосферные и эоловые осадки, переносимые со стороны аридных районов Казахстана и Средней Азии, перераспределяемые в дальнейшем в зависимости от зональных климатических и орографических особенностей.

Основная площадь Кулундинской равнины отличается плоским заозеренным рельефом с крупнейшими для Западной Сибири озерами, преимущественно солеными и солоноватыми, и богата различными соляными месторождениями, среди которых месторождения соды, гипса, поваренной соли. Важной особенностью озер рассматриваемой территории является то, что они представляют собой очень динамичные системы, подверженные значительным сезонным, годовым и декадным колебаниям уровня воды (Meyer et al., 2008). Усыхание озер Кулунды в регрессивную фазу сопровождается повышением в них концентрации солей (Леонова и др., 2007), а на высохших и периодически высыхающих частях соленых озер образуются соровые солончаки и солевые грязи (Novoselov et al., 2022). Прибрежные солончаки и плайи представляют собой мощный потенциальный источник солесодержащей пыли (Wood and Sanford, 1995; Wiggs et al., 2003; Chappell et al., 2007; Baddock et al., 2009; Goldstein et al., 2017). Переносу пыли на большие расстояния способствует характерное для района озер Кучук и Кулундинского проявление ветровой эрозии.

Таким образом, природные условия Кучукского месторождения обуславливают повышенный солевой фон в различных компонентах окружающей среды, что требуется учитывать при оценке их экологического состояния и проведении мониторинга.

Задачи настоящего исследования включали: 1) оценку вклада разработки месторождения солей оз. Кучук за счет пыления с открытых объектов в засоление и деградацию прилегающих территорий на основании геохимического анализа почв; 2) выявление специфичности техногенного засоления почв по сравнению с природным.

2. Объекты и методы исследования

2.1 Территория исследования

2.1.1 Рельеф и гидрография

Кучукское месторождение минеральных солей расположено в центральной части Кулундинской равнины на территории Алтайского края (рис. 1).

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

Кулундинская равнина занимает юг Обь-Иртышского междуречья и имеет однообразный равнинный облик со слаборазвитой речной и овражной сетью. Местами рельеф осложнен гривами и повышениями, котловинами крупных и мелких озер, пологими, блюдцеобразными понижениями, часть из которых представляют днища пересохших озер, часть имеют суффозионное происхождение.

Наиболее крупными озерами являются оз. Кулундинское и соединенное с ним протокой оз. Кучук. В геоморфологическом отношении прилегающая к озерам территория представляет собой концентрически размещающиеся на разных уровнях по отношению к Кулундинскому и Кучукскому озерам поверхности террас. Это дает основание считать их водами одного большого последовательно сокращающегося водного бассейна (Булатов и др., 2005; Леонова и др., 2007). Водная система в целом включает оз. Кулундинское, оз. Кучук, бывшее оз. Селитренное и рр. Кулунда, Кучук, Суетка, а также водотоки малых размеров.

2.1.2 Климат

Климат Центральной части Кулундинской степи относится к континентальному, для которого характерны суровая продолжительная зима и сравнительно короткое, но жаркое лето. По данным ближайших к объекту изучения метеостанций Алтайского края среднегодовая температура воздуха составляет от 2.8 °С (Камень-на-Оби) до 3.5 °С (Славгород). Температура самого холодного месяца (январь) – от –16.8 °С (Барнаул) до –17.2 °С (Камень-на-Оби), самого жаркого (июль) – от 20.2 °С (Камень-на-Оби) до 21.0 °С (Славгород) (Climate data, 2022).

Средняя продолжительность периода со снежным покровом в степях Западно-Сибирской равнины составляет 148 дней, мощность снежного покрова – 22 см, глубина сезонного промерзания – от 1.5 до 2.0 м (Шульгин, 1972).

На климат района большое влияние оказывают ветры, максимальное количество которых приходится на январь-март. Преобладающее направление ветров южное и юго-западное (Казахстанский суховей), на них приходится 52% всех ветров.

Среднегодовое количество осадков варьирует от 382 мм (Славгород) до 589 мм (Барнаул) (Climate data, 2022). В теплое время года выпадает 80% от их общего количества. Отличительной особенностью климата является превышение испаряемости над количеством выпадающих осадков.

2.1.3 Почвообразующие породы

Обширное Приобское плато в поверхностных горизонтах грядово-увалистых возвышенностей сложено преимущественно лессовидными суглинками. Суглинки

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ACCEPTED MANUSCRIPT

подстилаются слоистой песчано-глинистой толщей (Ковалев и др., 1967). Широкие и глубокие ложбины древнего стока Приобского плато выполнены песками, подстилаемыми на небольшой глубине песчано-глинистыми отложениями.

Верхнечетвертичная толща Кулунды представлена пылеватыми супесями, глинистыми песками, лессовидными суглинками, возникшими в результате перевеивания аллювиальных наносов древних рек, пески которых прошли стадию эолового переотложения (Мартынов, 1957). Широкая плоская терраса Кучук-Кулундинской озерной котловины сложена комплексом озерно-аллювиальных отложений, пестрых по гранулометрическому составу: от глин до песков (Ковалев и др., 1967).

2.1.4 Почвенный покров

Согласно почвенно-экологическому районированию России (Урусевская и др., 2020) по территории исследования проходит граница зоны обыкновенных и южных черноземов степи и зоны темно-каштановых и каштановых почв сухой степи. Засушливая зона сухой степи располагается вдоль западной границы Алтайского края, а ее основная часть переходит в Павлодарскую область Казахстана.

Черноземы и каштановые почвы формируются на водораздельных территориях, при глубоком залегании грунтовых вод. Однако, относительно недавнее осушение поверхности приводит к тому, что в природных комплексах всех высотных уровней в той или иной степени сохранились черты гидроморфизма (Булатов и др., 2005).

По сравнению с Приобским плато в Центрально-Кулундинской депрессии значительно шире распространены засоленные почвы. Для почвенного покрова равнинных участков характерна комплексность с включением солонцов и солонцеватых разностей. На пониженных участках слабоволнистой равнины формируются лугово-черноземные и лугово-каштановые почвы. В условиях засушливого климата и близкого залегания грунтовых вод активное современное засоление пониженных озерных и аллювиальных ландшафтов приводит к развитию солончаков (Ковалев и др., 1967).

2.1.5 Галогеохимическая характеристика территории

По почвенно-геохимическому районированию юга Западной Сибири Кулундинская равнина относится к провинции активного водо-солеобмена с преобладанием привноса солей над их выносом, с недостаточно увлажненными почвогрунтами. Отношение выноса к привносу составляет 0.7–0.9 (Засоленные почвы…, 2006).

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

В. А. Ковда (1946) рассматривал Кулундинскую степь как один из центров современного соленакопления, отмечая широкое распространение явлений засоления в разных компонентах ландшафта. Основной гипотезой происхождения солей в южной части Западной Сибири является гипотеза континентального соленакопления (Герасимов и Иванова, 1934; Ульященко, 1935; Ковда, 1937; Кучин, 1940; Базилевич, 1965). Согласно этой гипотезе, источниками солей на изученной территории служили продукты выветривания древнего комплекса пород, и более молодых (третичных и четвертичных) морских и континентальных образований, поступающие с горных сооружений (Алтайская горная система) в области аккумуляции (Базилевич, 1965). В дальнейшем солями обогащались рыхлые континентальные наносы и грунтовые воды.

Накопление солей на юге Западной Сибири происходило на протяжении верхнетретичного и четвертичного периода, достигая своего максимума в периоды сухого климата геологического развития – плиоцен и среднечетвертичное время. В голоцене ведущее значение по сравнению с поступлением солей извне приобрели процессы их перераспределения. В настоящее время Центрально-Кулундинская депрессия является областью аккумуляции поверхностных и грунтовых вод со стороны Приобского плато, которое возвышается над ней на 50–70 м.

Бессточность и слабая дренированность Кулундинской равнины, которая находится на месте крупной синклинальной структуры – мульды, теплый климат и безлесные ландшафты обусловили испарение и концентрирование растворов в грунтовых водах, почвах, многочисленных озерах. В пределах самой депрессии грунтовые воды перемещаются от повышений к понижениям и, в частности, к современным озерным котловинам, которые являются постоянными испарителями (Ковалев и др., 1967).

По условиям залегания и стратиграфической принадлежности в гидрогеологическом строении изученной территории выделяется ряд водоносных комплексов: грунтовые воды средне-верхнечетвертичных отложений, водоносные горизонты миоцен-плиоценовых отложений, водоносные горизонты верхнего и нижнего олигоцена, водоносный комплекс палеоцен-олигоценовых отложений, водоносный комплекс меловых отложений.

Основное влияние на поверхностные гидрохимические условия оказывают грунтовые воды средне-верхнечетвертичных отложений карасукской свиты и современные аллювиальные отложения, которые залегают в непосредственной близости к дневной поверхности и имеют непосредственную гидравлическую связь с

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ACCEPTED MANUSCRIPT

гидрологическими объектами района. Влияние на поверхностные условия оказывают второй и третий от поверхности водоносные горизонты миоцен-плиоценовых отложений таволжанской, павлодарской и кулундинской свит. Эти горизонты имеют напорный характер, и их пьезометрический уровень достигает, а иногда и превышает отметки дневной поверхности.

Грунтовые воды озерных котловин преимущественно солоноватые, иногда соленые, с минерализацией от 1 до 15 г/л (Ковда, 1946), по периферии озер – до 50–70 г/л (Ковалев и др., 1967). Озера Кулунды имеют высокую минерализацию. В ряде озер минерализация достигает уровня рассолов – 300–350 г/л (Ковда, 1937). При этом они характеризуются разнообразием химического состава вод. Даже в расположенных близко друг от друга озерах отмечается различие в составе и минерализации вод. Отсутствие четких корреляций между географической зональностью и зональностью вод позволяет предполагать, что генезис солей в озерах Кулунды определяется главным образом характером грунтовых вод (Lebedeva et al., 2008).

Таким образом, засоление в Кулундинской степи обусловлено составом пород, из которых сложены окружающие ее, приподнятые в результате тектонических движений поверхности. Среди природных факторов развития засоления можно выделить положение в рельефе, слабую дренированность территории и засушливость климата.

2.1.6 Краткая характеристика производства сульфата натрия

Мирабилит ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$) обладает высоким температурным коэффициентом растворимости. В зависимости от сезонных колебаний температуры рапы в осенне-зимний период он выпадает в твердую фазу, а весной и летом растворяется. В результате этих процессов в донных отложениях озера формируется линза мирабилита (на площади около 135 км^2 со средней мощностью около 2.5 м). Сезонный переход сульфата натрия из раствора в твердую фазу определил применение геотехнологического способа разработки месторождения. Он основан на самовосстановлении содержания извлеченных из поверхностной рапы оз. Кучук запасов за счет растворения мирабилита в корневой залежи. Извлечение рапы из озера и её транспортировка осуществляется по питательному каналу в садочный бассейн (рис. 2).

В качестве садочного бассейна мирабилита используется бывшее оз. Селитренное, расположенное в глубокой котловине с выраженными склонами. В садочном бассейне при охлаждении рапы в осенне-зимний период происходит осаждение мирабилита. Обессульфаченная рапа сбрасывается обратно в оз. Кучук.

ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

Основной экологической проблемой производства сульфата натрия является открытая разработка мирабилита в садочном бассейне. В летнее время под действием высоких температур и низкой влажности атмосферного воздуха на поверхности техногенного пласта мирабилита площадью около 6 км^2 происходит его дегидратация с переходом в пылевидный тенардит, который под действием ветра разносится на прилегающие территории, вызывая предпосылки для техногенного засоления почв, поверхностных и подземных вод, а также деградации растительного покрова.

Для уменьшения уровня техногенного засоления компонентов ландшафта на предприятии применяется система пылеподавления, заключающаяся в поливе пласта мирабилита в теплое время года высокохлоридной рапой оз. Кучук. При этом на поверхности пласта мирабилита образуется твердая тенардитовая корочка, сохраняющаяся 10–15 дней при отсутствии дождей и способствующая, таким образом, резкому снижению интенсивности пыления.

2.2 Объекты исследования

Для выявления антропогенного вклада в засоление территорий, прилегающих к границам предприятия «Кучуксульфат», в августе–сентябре 2020 г. и августе 2021 г. было выполнено обследование почв. Почвенные разрезы располагались на участках, относящихся к импактной зоне предприятия (в пределах горного отвода и санитарно-защитной зоны), и на фоновой территории. В импактной зоне разрезы закладывались вдоль векторов господствующего направления ветров: на восточном склоне, спускающемся к садочному бассейну – разрезы КС-20-12, КС-21-18 и на водоразделе между бывшими озерами Селитренное и Кривое (шламонакопитель) – разрез КС-20-13. В качестве фоновых участков использовались земли за контурами объекта, не подвергающиеся техногенному воздействию или испытывающие его в минимальной степени (разрезы КС-20-1, КС-20-2, КС-20-8, КС-20-9, КС-20-15). В качестве условно фоновой почвы рассматривался разрез, заложенный на западном склоне котловины садочного бассейна, в части относящейся к ветровой тени (КС-20-3).

Фоновые участки располагались на разном расстоянии от источника выбросов – от 2 до 10 км, вдоль векторов «розы ветров», содержали достаточное разнообразие естественных биогеоценозов, обладали сходными характеристиками в отношении классификационного положения почв.

Кроме того, в августе 2021 г. вблизи технологических объектов предприятия и на фоновой территории были отобраны пробы выцветов и корочек солей с поверхности почвы. Точки заложения разрезов и отбора проб выцветов солей показаны на рис. 2.

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ACCEPTED MANUSCRIPT

2.3 Методы исследования

Концентрация солей в почвенных образцах определялась стандартными методами в водной вытяжке почвы при соотношении почвы и воды 1:5 (Воробьева, 1998). Величина SO_4^{2-} определялась весовым методом, концентрации Na^+ и K^+ – методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на анализаторе ICPE-9000. По степени засоления почвы классифицировались в зависимости от типа химизма засоления (Базилевич и Панкова, 1972; Засоленные почвы…, 2006).

Различие между содержанием солей в почвах импактной зоны предприятия и фоновой территории оценивалось на основании статистического анализа. Выборки для анализа были составлены из значений содержания солей, определенных по генетическим горизонтам почв. Статистический анализ выполнялся в программе SPSS Statistics.

Содержание органического вещества определяли по методу Тюрина. Содержание CO_2 карбонатов находилось гравиметрическим методом (Растворова и др., 1995). Гранулометрический состав определялся пипет-методом с пирофосфатной обработкой.

Состав обменных оснований находили методом Пфеффера с комплексонометрическим окончанием для Ca^{2+} и Mg^{2+} и пламенно-фотометрическим – для Na^+. Емкость катионного обмена (ЕКО) определялась методом Бобко-Аскинази (Воробьева, 1998).

Определение состава минералов солевых выцветов выполнялось методом рентгенофазового анализа на дифрактометре Rigaku «MiniFlex II» с медным анодом. Анализ полученных дифрактограмм проводился с помощью программы PDXL с использованием международной базы порошковых рентгендифракционных данных ICDD (PDF-2).

3. Результаты исследования

3.1 Химический состав рассола оз. Кучук

Известно, что поверхностные и подземные воды являются важнейшими агентами переноса солей и их накопления в бессточных водоемах конечного стока. Занимая самую пониженную часть Кулундинской депрессии, оз. Кучук относится к водоемам конечного стока, принимая воды естественных поверхностных (рр. Кучук и Солоновка) и искусственных водотоков. Таким образом, оз. Кучук и прилегающую к нему территорию можно рассматривать как базис накопления солей по отношению к окружающим территориям.

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

Запасы солей оз. Кучук сосредоточены в его рапе и донных отложениях. В прил. 10.1[1] приведен химический состав рассола оз. Кучук.

По гидрохимической классификации Курнакова-Валяшко (Валяшко, 1962) рассол озера относится к сульфатному типу. Химический состав рассола определяется содержанием в нем ионов Na^+, Mg^{2+}, Cl^-, SO_4^{2-}, тогда как концентрации ионов HCO_3^- и K^+ не превышают десятых, а Ca^{2+} – сотых долей вес. %.

Схожесть результатов анализа проб, отобранных в разных частях озера, говорит об однородности его химического состава в пределах акватории.

3.2 Морфология и классификационное положение почв

Для более объективной оценки вклада техногенного галогенеза сравнению подлежали почвы в пределах одного классификационного типа. Почвы в границах горного отвода Кучуксульфат были представлены солонцами (рис. 3 a–c), поэтому среди всего регионального разнообразия почв в качестве фоновых нами были выбраны также солонцы (рис. 3 d–i). Солонцы в районе исследования развиты на приозерных территориях (склонах террас, перегибах склонов террас), приводораздельной территории и понижениях водораздела.

Нами были изучены солонцы под степной растительностью с элементами галофитной растительности и солеустойчивых видов. Некоторые из разрезов были заложены на участках с древесной и кустарниковой растительностью (разрезы КС-20-2, КС-20-9, КС-20-15). Краткая характеристика исследованных участков приведена в прил. 10.2.

По мощности надсолонцовой толщи, которая не превышала 10 см, изученные почвы в основном относились к виду солонцов мелких (Классификация…, 2004). Одной из особенностей строения всех изученных солонцов являлась морфогенетическая невыраженность в профиле осветленного горизонта EL. Другая особенность состояла в том, что на гранях структурных отдельностей солонцового горизонта BSN отсутствовали темные гумусово-глинистые кутаны, а окраска внутрипедной массы слабо отличалась от окраски граней педов. Вместо натечных кутан на поверхностях педов были различимы темные пропиточные пятна во внутрипедной массе.

[1] Здесь и далее приложения 10.1-10.5 доступны по электронному адресу https://escjournal.spbu.ru/article/view/16108/11585

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ACCEPTED MANUSCRIPT

Горизонт BSN имел значительную плотность в сухом состоянии, присущую солонцовым горизонтам, а его структура характеризовалась как призматическая и столбчатая (рис. 4).

В подсолонцовом горизонте, как и в собственно солонцовом, имелись признаки зоогенной перерытости. Там же отчетливо были видны гумусовые затеки, клинообразные языки и карманы, происхождение которых связано с глубокой промерзаемостью и растрескиванием почв зимой, вследствие чего в образованные трещины просыпается гумусированный мелкозем из верхнего горизонта.

Верхняя часть профилей солонцов выщелочена от карбонатов до аккумулятивно-карбонатного горизонта BCA. В горизонте BCA, бурно вскипающем от действия 10% HCl, карбонаты представлены дисперсно-пропиточными формами – сплошной пропиткой мелкозема в виде полос, карбонатным налетом, мучнистыми пятнами (рис. 5).

3.3 Гранулометрический состав почв

Солонцы импактной зоны предприятия и условно фоновой территории сформированы на озерных отложениях, отличающихся неоднородностью в разных частях котловины. Почвы бортов котловины в восточной и западной частях (разрезы КС-20-12, КС-20-3) сформированы на супесчаных отложениях. Гранулометрический состав этих отложений характеризуется низким содержанием илистой и пылеватой фракций и абсолютным преобладанием песчаной фракции (рис. 6а). Крупнозем содержится в почвенном профиле в количестве от 1 до 3%.

Помимо крупнозема, наследуемого от отложений, на поверхности почв склонов озерной террасы наблюдался навеянный песчаный материал, что свидетельствует о слабой устойчивости структуры гумусовых горизонтов супесчаных почв к дефляции и низкой степени задернованности.

Суммарная доля песчаной фракции составляет около 80% во всех горизонтах, однако соотношение фракций крупного и мелкого песка меняется вниз по профилю. В солонцовом горизонте относительно гумусового существенно повышается доля фракции мелкого песка.

На фоне общего низкого содержания илистой фракции в гранулометрическом составе почв, развитых на легких озерных отложениях, элювиально-иллювиальная дифференциация по илу все же имеет место. Однако увеличение доли ила относительно горизонта AJ заметней не в солонцовом BSN, а в подсолонцовом горизонте BMK (рис. 6а); коэффициент текстурной дифференциации по илу составил более 3.5.

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

В юго-восточной нижней выположенной части котловины почвы сформированы на суглинистых озерных отложениях с более высокой долей пылеватой и илистой фракций (рис. 6b, разрез КС-21-18). При этом доля песчаной фракции в гранулометрическом составе остается доминирующей и составляет более 60% от суммы всех фракций. Крупнозем присутствует только в верхней части профиля в количестве менее 1%. Так же как в почвах на супесчаных отложениях, накопление ила в профиле суглинистых почв выражено лучше в подсолонцовом горизонте.

Почвы фоновой территории сформированы на литологически неоднородных озерных суглинках с более высокой долей фракции крупной пыли (рис. 7, разрезы КС-20-2, КС-20-8), чем в осадках озерной котловины, что вероятно, указывает на присутствие в них переотложенного лессовидного материала.

Количество крупнозема в профилях незначительно, на уровне 1–3%, но в отдельных горизонтах может достигать 10%. Локальное обилие в массе слоистой толщи отложений мелкой гальки и крупнозернистого окатанного песка является характерной особенностью материнских пород Кулунды (Ульященко, 1935).

Различия между почвами импактной зоны и фоновыми в распределении фракций мелкозема объясняются различиями в гранулометрическом составе почвообразующих пород и связаны с особенностями генезиса озерных отложений, определившего их слоистость и разное соотношение фракций крупного и среднего и мелкого песка.

Общими закономерностями в распределении гранулометрических фракций всех изученных почв являются высокая доля песчаной фракции и накопление илистой и пылеватой фракций в подсолонцовой толще как по сравнению с гумусовым горизонтом, так и с почвообразующей породой.

3.4 Результаты анализа водной вытяжки почв

Обобщение данных о профильном распределении солей показало, что максимум соленакопления приурочен к срединной (подсолонцовой) части профиля при слабом или вовсе отсутствующем в надсолонцовом и солонцовом горизонтах (рис. 8). Срединно-аккумулятивный вид вертикального распределения солей в почвах, типичный для солонцов, говорит о наличии двустороннего водно-солевого режима, который заключается в чередовании сезонов с нисходящими и, напротив, восходящими потоками воды и солей. Двусторонний режим обязан перемещению солей с капиллярным подъемом воды вверх и периодическим промыванием поверхностных горизонтов за счет атмосферных осадков (Хитров и Воробьева, 2013). Такой режим увлажнения на фоне

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ACCEPTED MANUSCRIPT

низкого содержания растворимых солей в верхней части почвенного профиля способствует накоплению обменного натрия в почвах (Chizhikova and Khitrov, 2016).

Поскольку восточный склон котловины, в центре которой находится садочный бассейн, расположен на пути господствующего в этом районе направления ветров (З и ЮЗ), то эта часть рассматривалась нами как зона потенциально наиболее интенсивного воздействия.

Разрезы КС-20-12 и КС-21-18 восточной и юго-восточной частей котловины (рис. 8a) были заложены на участках, непосредственно примыкающих к садочному бассейну, и поэтому испытывают наиболее интенсивную техногенную нагрузку. Общее содержание солей в горизонтах их максимального накопления составило 1.06 и 1.26%. По степени засоления почвы относятся к сильнозасоленным.

На более высоких гипсометрических уровнях рельефа (разрез КС-20-13), по мере удаления от открытых источников пыления, но все еще в пределах территории горного отвода предприятия засоление снижалось более чем в 2 раза (рис. 8a). Почва имела среднюю степень засоления.

Почвы западного склона котловины (разрез КС-20-3, рис. 8b) были рассмотрены нами как условно фоновые. С одной стороны, они являются полными аналогами почв восточного склона в отношении почвообразующей породы, с другой стороны, влияние техногенного засоления распространяется на них гораздо в меньшей степени, поскольку эта часть котловины относится к ветровой тени. В почве на западном склоне котловины содержание солей составило 0.31%. Почва классифицировалась как слабозасоленная.

В разрезе КС-20-15 на границе лесополосы из тополевника, удаленном более чем на 2 км от садочного бассейна, содержание солей не превышало 0.1% (рис. 8b), что существенно ниже, чем во всех остальных изученных почвах. Такая почва классифицируется как незасоленная. В почвах на участках, удаленных на еще более значительное расстояние от границ предприятия (5–10 км), содержание солей составило от 0.28 до 0.61% (рис. 8b).

Сравнение данных засоления в почвах, относящихся к импактной зоне предприятия (выборка 1), и в почвах фоновой территории (выборка 2) с помощью статистического анализа показало, что среднее содержание солей, разброс и дисперсия значений в выборке 1 выше, чем в выборке 2 (прил. 10.3).

Оценка различий между выборками 1 и 2 по критерию Манна-Уитни выявила, что различие между ними значимо ($p < 0.05$) (прил. 10.3). Такая же оценка была выполнена отдельно для суглинистых разностей, которые преобладали среди изученных почв.

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

Различие между выборкой 3 (почвы импактной зоны) и выборкой 4 (почвы фоновой территории) по результатам теста Манна-Уитни было оценено как значимое ($p < 0.05$) (прил. 10.3).

Анализ солевых диаграмм (рис. 9) показал, что в подавляющем большинстве почв в составе водорастворимых солей среди анионов преобладали сульфаты, а среди катионов – натрий. Вместе с тем в водной вытяжке фоновых почв становилось заметным участие карбонат- и гидрокарбонат-ионов (разрезы КС-20-1, КС-20-2, КС-20-8, КС-20-9, КС-20-15) вплоть до появления содово-сульфатного и сульфатно-содового химизма засоления. Появление соды в составе солей способствует поддержанию и развитию солонцового процесса.

3.5 Физико-химические показатели почв

Величины pH изученных солонцов демонстрировали нейтральную и слабощелочную реакцию среды (прил. 10.4), типичную для зональных почв степей и сухих степей. Однако в фоновых почвах величины pH достигали более высоких значений, что связано с проявлением содового химизма засоления.

Содержание Сорг в гумусовых горизонтах сильно варьировало, но находилось в пределах диапазонов, характерных для соответствующего типа. Различие в его содержании определялось гранулометрическим составом, положением в рельефе и характером растительности. За счет более высокого содержания Сорг часть солонцов была отнесена к подтипу солонцов темных (Классификация…, 2004).

Стоит отметить, что практически во всех изученных почвах содержание Сорг в солонцовых горизонтах было сравнимо с таковым в гумусовых, а в отдельных случаях даже превышало его (разрезы КС-20-1 и КС-20-9, прил. 10.4). Причин этого может быть несколько. Во-первых, механическое перемещение прогумусированного материала в нижележащие горизонты, которое возможно как в результате деятельности почвенной макрофауны, так и в результате засыпки по трещинам промерзания. Во-вторых, увеличение содержания Сорг в солонцовом горизонте может быть вызвано повышением растворимости гумусовых веществ при насыщении почвенного поглощающего комплекса обменным натрием (Khitrov, 2004).

О высокой доле водорастворимых компонентов в составе органического вещества изученных солонцов косвенно можно было судить по темной окраске фильтрата из горизонта BSN, получаемого при подготовке водной вытяжки. Этим же можно объяснить повышенную разницу между величинами сухого и прокаленного остатка в горизонте BSN. Такое предположение согласуется и с наличием бурых пропиточных

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ACCEPTED MANUSCRIPT

пятен во внутрипедной массе отдельностей горизонта BSN, что указывает на высокую подвижность органического вещества.

В подсолонцовой части исследованные почвы обогащены карбонатами, их содержание в горизонте BCA составляет от 6 до 16%. Форма карбонатного профиля с внутрипрофильным максимумом относится к элювиально-иллювиально-испарительному типу. Основным процессом, образующим такой профиль, является процесс перераспределения, характерный для почв семигумидных и аридных областей (каштановые почвы, черноземы южные и обыкновенные, бурые полупустынные почвы) (Ковда и Хохлова, 2015). О специфике водного режима, связанной с восходящей и нисходящей миграцией почвенных растворов, говорят и дисперсно-пропиточные формы карбонатных новообразований.

Анализ величин ЕКО в верхней части профиля (прил. 10.4) показал преимущественно невысокую поглотительную способность рассмотренных почв, что обусловлено низким содержанием гумуса и в ряде случаев легким гранулометрическим составом. Более высокие значения ЕКО обязаны утяжелению гранулометрического состава и увеличению содержания гумуса. Вместе с тем даже на фоне низких значений ЕКО отмечалось увеличение этого показателя в горизонте BSN, что диагностирует его как горизонт иллювиирования.

Почвенный поглощающий комплекс насыщен основаниями, среди которых преобладает натрий. Доля обменного натрия от ЕКО в солонцовом горизонте во всех случаях превышает 40% (прил. 10.3) и, тем самым, относит почвы к виду солонцов многонатриевых (Классификация…, 2004).

Двусторонний водный режим обеспечивает перемещение солей вверх с капиллярным подъемом воды и, наоборот, вниз с периодическим промыванием поверхностных горизонтов за счет атмосферных осадков (Хитров и Воробьева, 2013). Такой режим увлажнения на фоне низкого содержания солей в верхней части профиля способствует накоплению обменного натрия в почвах (Chizhikova and Khitrov, 2016). В то же время высокая доля обменного натрия в солонцах не говорит о техногенной природе его происхождения. Например, солонцы с долей обменного натрия свыше 80% встречены и в соседних районах (Макарычев, 2019).

При насыщении почвенного поглощающего комплекса обменным натрием повышается растворимость органического вещества и появляется ряд неблагоприятных водно-физических свойств (Richards, 1954; Szabolcs, 1989; Khitrov, 2004). Повышение дисперсности органической и минеральной части вызывает резкое уплотнение

ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

почвенных горизонтов. Причем дисперсия глинистых частиц происходит достаточно эффективно и при низком содержании глины в гранулометрическом составе почв (Shainberg and Letey, 1984), как это наблюдается и в нашем случае.

Обменный магний в исследованных солонцах содержится в количестве от 10 до 35% от ЕКО (прил. 10.3). Присутствие обменного магния в таком количестве способно еще более усиливать пептизирующее действие натрия (Khitrov, 2004). В результате формируется столбчатая структура, усиливается подвижность и потечность гумуса с вымыванием его из верхней части. Такие почвы обладают низким плодородием и тяжело поддаются мелиорации. Все эти признаки, свойственные солонцам, отмечены нами на макроморфологическом уровне при полевом обследовании почв.

3.6 Рентгенофазовый анализ солевых корочек и выцветов солей

Результаты рентгенофазового анализа проб солевых корочек и выцветов в окрестностях садочного бассейна и питательного канала предприятия (рис. 2) показали, что среди солевых минералов присутствовал преимущественно тенардит (прил. 10.5). Лишь в отдельных точках, относящихся к импактной зоне разработки месторождения, помимо тенардита были обнаружены гипс (точка 1), натрон (точка 9) и кальцит (точка 11).

На участках, значительно удаленных от источников техногенного засоления (точки 3, 10, 12), кроме тенардита были обнаружены другие солевые минералы, типичные для зон эвапоритовой седиментации, – галит, мирабилит, кальцит, доломит (прил. 10.5). Такой же набор минералов обнаруживается в солевых корочках прибрежных солончаков многих других озер Центральной Кулунды (Lebedeva et al., 2008).

В дельте р. Кучук (точка 10 на рис. 2) выцветы солей содержали редкий для почв минерал коньяит ($Na_2Mg(SO_4)_2 \cdot 5H_2O$). Коньяит образуется при высоких летних температурах в виде солевых выцветов на морских и озерных отложениях (Leduc et al., 2009). В составе солевых выцветов почвы минерал может сформироваться в результате геохимической эволюции грунтовых вод преимущественно магниево-натриевого сульфатного состава (Timpson et al.,1986). При подтягивании грунтовых вод к поверхности соли карбонатов осаждаются в профиле почвы, тогда как коньяит кристаллизуется на поверхности. Однако в состоянии такой сухой корки минерал считается метастабильным (Van Doesburg et al., 1982).

В пробе корки солей с пятна, лишенного растительности (рис. 10), расположенного на участке под косимой залежью (точка 3 на рис. 2), был определен

ACCEPTED MANUSCRIPT

уэделлит. Уэделлит – минерал, представляющий биогенную форму карбонатов, которая встречается в организмах животных, продуцируется растениями и грибами (Verrecchia et al., 2006). Кроме того, он может быть результатом реакции выветривания карбонатных пород с щавелевой кислотой, образуя «оксалатные» фитолиты (Manning, 2000; Durand et al., 2010). Однако минерал отличается неустойчивостью и обычно легко трансформируются в кальцит (Blanco and Stoops, 2007).

Таким образом, по данным рентгенофазового анализа можно судить о различии в генезисе выцветов солей почв импактной зоны и фоновых. Если в первых среди солевых минералов за редким исключением был обнаружен только тенардит, который является продуктом эолового переноса дегидратированного мирабилита, то в последних выцветы являются результатом испарительного концентрирования и капиллярного подтягивания растворов почвенно-грунтовых вод к поверхности. В таком случае в их минералогии находит отражение химический состав грунтовых вод (Eugster and Hardie, 1978) и диагностируются продукты естественной биогеохимической трансформации (например, уэделлит).

4. Обсуждение

Озеро Кучук занимает в геосистеме Центральной Кулунды важнейшее место, поскольку является водоемом конечного стока для рек Кучук и Солоновки, а опосредованно через озеро Кулундинское – и для рек Кулунды и Суетки. Кроме того, оно служит региональной дреной грунтового стока и части стока подземных вод. Следует отметить исключительную роль озера в солевом режиме территории Кучукского месторождения как источника поступления солей в различные компоненты природной среды при их дефляции с поверхности рапы озера и окружающих его побережья солончаков (рис. 11).

Бывшее оз. Селитренное, используемое в настоящее время в качестве садочного бассейна, является потенциальным объектом негативного воздействия за счет поступления сульфата натрия эоловым путем на водосборы с последующим стоком растворенного вещества в поверхностные водные объекты, инфильтрацией в грунтовые воды и засолением почв.

Вместе с тем техногенный режим работы садочного бассейна весьма сходен с его прежним режимом функционирования как природного объекта. Так, до промышленного освоения озеро представляло собой мелководный – глубиной до 0.5 м – водоем с высокоминерализованной рапой, систематически пересыхающий в летнее время и

ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

покрывающийся солевой коркой. Низкие побережья озера представляли собой полосу солончаков шириной в 200–250 м от уреза воды, растительность которых была представлена галофитными сообществами. В таком состоянии соленые озера выступают мощными источниками солесодержащей пыли, что приводит к засолению прилегающих ландшафтов в результате импульверизации (Mees and Singer, 2006), усиливающейся за счет пыльных бурь.

Таким образом, современное место садочного бассейна в экосистеме как источника выбросов сульфата натрия в значительной степени определяется природными условиями и сформировалось под их действием задолго до промышленного освоения данного района. Использование озера в качестве садочного бассейна мирабилита как техногенно преобразованного объекта лишь интенсифицировало динамику воздушных выбросов сульфата натрия за счет увеличения продолжительности безводного периода, в течение которого происходит пыление с поверхности.

Летом под действием высоких температур и низкой влажности воздуха мирабилит дегидратируется, переходя в безводный сульфат натрия – тенардит, который в виде тонкой пыли покрывает дно садочного бассейна и разносится ветром на прилегающие территории. Устойчивость солевой корки тенардита к ветровой эрозии невысока, поскольку во многом зависит от габитуса кристаллов солей. Сульфатные соли, представленные игольчатыми или призматическими формами, по сравнению с карбонатными и хлоридными солями более податливы ветру из-за меньшей силы сцепления кристаллов (Buck et al., 2011).

Результатами рентгенофазового анализа подтверждается, что в составе корочек солей с поверхности почвы на участках в непосредственной близости от объектов предприятия (садочного бассейна, отвала и питательного канала) среди солевых минералов за редким исключением был обнаружен только тенардит, который образуется в результате дегидратации техногенного пласта мирабилита, переносится эоловым путем и оседает на поверхности почвы вблизи садочного бассейна.

Для выявления индивидуальных факторов почвообразования, включая техногенный, нами было использовано сочетание данных морфологического и физико-химического анализа полных почвенных профилей. По результатам макроморфологического изучения существенных различий в пределах одного классификационного типа между почвами фоновых территорий и импактной зоны предприятия выявлено не было. На более низком таксономическом уровне различие в глубинах залегания солевых и карбонатных горизонтов, мощности гумусового и

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ACCEPTED MANUSCRIPT

солонцового горизонта определялось положением в рельефе (катенарная дифференциация), характером растительности, особенностями литологии.

Положение садочного бассейна в центре глубокой межгривной котловины, которая со всех сторон окружена возвышенностями с превышениями над поверхностью бассейна до 25–30 м, делает склоны этих возвышенностей естественным экраном на пути распространения солей путем дефляции. При этом на восточную и юго-восточную части котловины приходится большая часть эоловых выпадений, поскольку они располагаются с наветренной стороны относительно открытых источников аэротехногенного поступления солей.

Содержание водорастворимых солей в этих почвах оказалось самым высоким (разрезы КС-21-18 и КС-20-12, рис. 12а). На более высоких гипсометрических позициях, по мере удаления от техногенных источников выбросов пыли сульфата натрия содержание солей значительно снижалось (КС-20-13, рис. 12а), однако еще сохранялось на высоком уровне. Уровни засоления почв, относящихся к импактной зоне влияния источника распространения пыли сульфата натрия, и почв фоновой территорий достоверно различались по критерию Манна-Уитни. Среднее содержание солей в почвах импактной зоны в два раза превышало таковое в почвах фоновой территории (прил. 10.3).

Помимо общего содержания солей почвы природного и техногенного засоления различались спецификой катионно-анионного состава. Если в составе водной вытяжки почв импактной зоны абсолютно доминировали сульфаты и натрий, определяя сульфатный натриевый химизм засоления, то в почвах, расположенных на значительном удалении от предприятия, увеличивалось присутствие других анионов и катионов в составе солей (рис. 9). Особенно заметной в составе анионов становилась доля карбонат- и гидрокарбонат-ионов, что меняло химизм засоления с нейтрального сульфатного на щелочной – хлоридно-сульфатный с участием соды, содово-сульфатный и сульфатно-содовый и сказывалось на увеличении pH. Участие соды в химизме засоления является характерным для южных районов Западносибирской области, которая относится к провинции сульфатно-содового засоления по схеме В.А. Ковды (1946), и говорит о преобладающем влиянии естественных факторов развития территории на засоление фоновых участков.

Почвы, расположенные на значительном удалении от источников техногенного воздействия предприятия, представляли собой солонцы солончаковые и солончаковатые

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

средней и сильной степени засоления, что свидетельствует о повышенном солевом фоне территории, обусловленном природными процессами.

Можно было предположить, что аэротехногенное поступление пыли сульфата натрия на поверхность почвы с последующим перемещением вглубь профиля в составе растворов сказывается на активизации внедрения Na в почвенно-поглощающий комплекс в результате катионного обмена. Действительно, по сравнению с условно фоновой почвой западного склона (разрез КС-20-3) доля обменного натрия в солонцовом горизонте почв восточной и юго-восточной части котловины (разрезы КС-20-12, КС-21-18, КС-20-13) возрастала в 1.5 раза (рис. 12b). Однако, сопоставление доли обменного натрия в почвах импактной зоны и почв, значительно удаленных от объектов предприятия (рис. 12b), показало, что в последних доля натрия в почвенно-поглощающем комплексе была такой же, как в почвах импактной зоны, и даже выше, – на уровне 60–70%. Причиной этого может служить специфика химизма засоления фоновых почв с выраженным подсолонцовым засолением содово-сульфатными солями. Такое засоление обусловливает активное внедрение натрия в поглощающий комплекс солонцов и поддерживает его высокую солонцеватость (Базилевич, 1965).

К биотическим факторам, способным воздействовать на интенсивность засоления, относится характер растительности. При наличии древесной и кустарниковой растительности общее содержание солей в почвах снижалось по сравнению с почвами открытых степных участков. На это четко указывало более низкое содержание солей в разрезах КС-20-2 и КС-20-15, расположенных в первом случае под лоховником, во втором – на границе с тополевником. В разрезе КС-20-9, заложенном на участке под степной растительностью, зарастающем вязом, снижения солей по сравнению с почвой открытого участка степи (разрез КС-20-8) не произошло. Однако было выявлено заметное понижение глубины залегания солей (рис. 8 и 9).

Влияние древесно-кустарниковой растительности на солевой профиль почв, по-видимому, связано с дополнительным поступлением влаги и уменьшением периода их пересыхания. В зимний период растительность способствует накоплению снега и уменьшению глубины промерзания, а во время весеннего снеготаяния – препятствует развитию поверхностного смыва (Шульгин, 1972). В результате происходит пополнение запасов продуктивной влаги, так что вся талая вода просачивается в почвенную толщу, способствуя выносу легкорастворимых солей на бóльшую глубину.

Таким образом, для увеличения запасов влаги в почве, сдерживания дефляции и сокращения площадного распространения засоления на прилегающей к разработке

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ACCEPTED MANUSCRIPT

месторождения территории может быть рекомендовано создание лесомелиоративных насаждений.

5. Выводы

Оценка почв импактной зоны предприятия и фоновой территории на макроморфологическом уровне не выявила между ними заметных различий. Помимо характерных для таксономического типа все рассмотренные солонцы были объединены рядом регионально-специфических признаков: пропиточные формы карбонатов, слабая выраженность элювиальной части, потечность органического вещества, морфологически представленная не в виде кутан, а в виде прогумусированных зон во внутрипедной массе. Обе группы почв существенно не различались между собой по содержанию обменного натрия и были отнесены к виду солонцов многонатриевых.

Сравнение результатов водной вытяжки почв в пределах горного отвода предприятия с почвами фоновых территорий показало, что первые отличались более высоким содержанием солей во всем профиле, в том числе в гумусовом и солонцовом горизонте. Наиболее засоленные варианты почв располагались в восточной и юго-восточной части бывшей озерной котловины. Засоление именно этой части котловины связано с преобладающим направлением ветра на исследуемой территории. При этом резкое снижение засоления на более высоких гипсометрических уровнях по мере удаления от открытых объектов предприятия позволяет предположить, что склоны котловины играют роль экрана на пути дефляции солей, так что техногенное солевое загрязнение в значительной мере ограничивается ее пределами.

В катионно-анионном составе водной вытяжки почв импактной зоны разработки месторождения доминировали ионы Na^+ и SO_4^{2-}, а в составе минералов солевых корок и выцветов солей вблизи технологических объектов предприятия чаще всего встречался только тенардит, представляющий продукт дегидратации мирабилита. В водной вытяжке фоновых почв была выше доля других анионов и катионов и более заметно участие соды, что является природной галогеохимической особенностью территории Кулунды. В поверхностных корочках на фоновой территории отмечено большее разнообразие минералов, среди которых присутствовали типичные минералы эвапоритовой ассоциации и редкие неустойчивые виды.

При наличии древесно-кустарниковой растительности на участках отмечено снижение степени засоления и изменение солевого профиля по сравнению с открытыми участками степи.

ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

Работа выполнена при финансовой поддержке ОАО «Кучуксульфат» с использованием оборудования ресурсных центров СПбГУ «Методы анализа состава вещества» и «Рентген-дифракционные методы исследования».

Литература

Базилевич, Н.И. (1965). *Геохимия почв содового засоления*. Москва: Наука.

Базилевич, Н.И., Панкова, Е.И. (1972). Опыт классификации почв по содержанию токсичных солей и ионов. *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева,* 5, 36–40.

Булатов, В.И., Ротанова, И.Н., Черных, Д.В. (2005). Ландшафтно-экологический и картографический анализ озерно-бассейновых систем юга Западной Сибири (озера Чаны и Кулундинское). *Сибирский экологический журнал*, 2, 175–182.

Валяшко, М.Г. (1962). *Геохимические закономерности формирования месторождений калийных солей.* Москва: Изд-во Моск. ун-та.

Воробьева, Л. А. (1998). *Химический анализ почв.* Москва: Изд. Моск. Ун-та.

Герасимов, И.П., Иванова, Е.Н. (1934). Процессы континентального соленакопления в почвах, породах, подземных водах и озерах Кулундинской степи. *Труды Почвенного института им. В.В. Докучаева,* 9, 103–136.

Засоленные почвы России. (2006). Москва: ИКЦ «Академкнига».

Казанцев, В.А. (1998). *Проблемы педогалогенеза: на примере Барабинской равнины.* Новосибирск: Наука.

Классификация и диагностика почв России. (2004). Смоленск: Ойкумена.

Ковалев, Р.В., Панин, П.С., Панфилов, В.П., Селяков, С.Н. (1967). *Почвы Кулундинской степи.* Новосибирск: Наука.

Ковда, В.А. (1937). *Солончаки и солонцы.* Москва-Ленинград: АН СССР.

Ковда, В.А. (1946). *Происхождение и режим засоленных почв. Т. 1*. М.–Л.: Изд-во АН СССР.

Ковда, И.В., Хохлова, О.С. (2015). Карбонатный профиль почв. В: И.В., Иванов, В.Н., Кудеяров, под ред., *Эволюция почв и почвенного покрова. Теория, разнообразие природной эволюции и антропогенных трансформаций почв.* Москва: ГЕОС, 140–158.

Кучин, М.И. (1940). Генезис солей Кулундинской степи. В: *Труды научной конференции по изучению и освоению производительных сил Сибири. Т. 2: Проблема: минерально-сырьевая база Сибири.* Томск: Изд-во «Красное знамя», 516–525.

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ACCEPTED MANUSCRIPT

Леонова, Г.А., Богуш, А.А., Бобров, В.А., Бычинский, В.А., Трофимова, Л.Б., Маликов, Ю.И. (2007). Эколого-геохимическая оценка соляных озер Алтайского края. *География и природные ресурсы*, 1, 51–59.

Макарычев, С.В. (2019). Солонцы засушливой степи, их свойства и возможность мелиорации. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета,* 5(175), 64–70.

Мартынов, В.А. (1957). Основные черты геоморфологии Кулундинской степи. *Вестник Западно-Сибирского геологического управления*, 1(1), 73–84.

Растворова, О.Г., Андреев, Д.П., Гагарина, Э.И., Касаткина, Г.А., Федорова, Н.Н. (1995). *Химический анализ почв.* Санкт-Петербург: Изд-во С.-Петербургского ун-та.

Ульященко, Ф.Н. (1935). Почвы Кулундинской степи (в связи с ее орошением). *Труды Томского государственного университета им. В.В. Куйбышева,* 88, 156–207.

Урусевская, И.С., Алябина, И.О., Шоба, С.А. (2020). *Карта почвенно-экологического районирования Российской Федерации. Масштаб 1:8 000 000. Пояснительный текст и легенда к карте: Учебное пособие.* Москва: МАКС Пресс.

Хитров, Н.Б., Воробьева, Л.А. (2013). Оценка засоленности почв. В: А.Л., Иванов, под ред., *Научные основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий России и формирования систем воспроизводства их плодородия в адаптивно-ландшафтном земледелии. Т. 1. Теоретические и методические основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий.* Москва: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 426–441.

Шульгин, А.М. (1972). *Климат почв и его регулирование,* 2-е изд. Ленинград: Гидрометеоиздат.

Baddock, M.C., Bullard, J.E., Bryant, R.G. (2009). Dust source identification using MODIS: a comparison of techniques applied to the Lake Eyre Basin, Australia. *Remote Sensing of Environment,* 113 (7), 1511–1528.

Blanco, M.D.C., Stoops, G. (2007). Genesis of pedons with discontinuous argillic horizons in the Holocene loess mantle of the southern Pampean landscape, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences,* 23(1), 30–45. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.08.007

Buck, B.J., King, J., Etyemezian, V. (2011). Effects of salt mineralogy on dust emissions, Salton Sea, California. *Soil Science Society of America Journal*, 75(5), 1971–1985. https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0049.

Chappell, A., Strong, C., McTainsh, G., Leys, J. (2007). Detecting induced in situ erodibility of a dust-producing playa in Australia using a bi-directional soil spectral reflectance

ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

model. *Remote Sensing of Environment*, 106(4), 508–524. https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.009

Chizhikova, N.P., Khitrov, N.B. (2016). Diversity of clay minerals in soils of solonetzic complexes in the southeast of Western Siberia. *Eurasian Soil Science*, 49, 1419–1431. https://doi.org/10.1134/S106422931612005X

Climate data (2022). *Climate data for cities worldwide.* [online]. Available at: https://en.climate-data.org/ [Accessed 01.10.2022].

Durand, N., Monger, H.C., Canti, M.G. (2010). Calcium carbonate features. In: G., Stoops, V., Marselino, F., Mees, ed., *Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths*, 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 149–194.

Eugster, H.P., Hardie, L.A. (1978). Saline Lakes. In: A., Lerman, ed., *Lakes*. New York, NY: Springer.

Goldstein, H.L., Breit, G.N., Reynolds, R.L. (2017). Controls on the chemical composition of saline surface crusts and emitted dust from a wet playa in the Mojave Desert (USA). *Journal of Arid Environments*, *140*, 50–66. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.01.010

IUSS Working Group WRB. (2022). *World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition.* International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria.

Khitrov, N.B. (2004). The choice of diagnostic criteria to judge the development of the solonetzic process in soils. *Eurasian Soil Science*, 37(1), 12–23.

Lebedeva, M.P., Lopukhina, O.V., Kalinina, N.V. (2008). Specificity of the chemical and mineralogical composition of salts in solonchak playas and lakes of the Kulunda steppe. *Eurasian Soil Science*, 41, 416–428. https://doi.org/10.1134/S106422930804008X

Leduc, E.M.S., Peterson, R.C., Wang, R. (2009). The crystal structure and hydrogen bonding of synthetic konyaite, Na2Mg(SO4)2·5H2O. *American Mineralogist*, 94(7), 1005–1011. https://doi.org/10.2138/am.2009.3132

Manning, D.A.C. (2000). Carbonates and oxalates in sediments and landfill: monitors of death and decay in natural and artificial systems. *Journal of the Geological Society*, 157(1), 229–238. https://doi.org/10.1144/jgs.157.1.229

Mees, F., Singer, A. (2006). Surface crusts on soils/sediments of the southern Aral Sea basin, Uzbekistan. *Geoderma*, 136, 152–159. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.03.019

Meyer, B.C., Schreiner, V., Smolentseva, E.N., Smolentsev, B.A. (2008). Indicators of desertification in the Kulunda Steppe in the south of Western Siberia. *Archives of Agronomy*

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ACCEPTED MANUSCRIPT

and Soil Science, 54(6), 585–603.

Novoselov, A., Konstantinov, A., Konstantinova, E., Barbashev, A., Dudnikova, T., Lobzenko, I. (2022). Micromorphological and mineralogical features of saline playa surface sediments from two large Trans-Uralian lakes. *Eurasian Journal of Soil Science*, 11(2), 93–101.

Richards, L. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agricultural handbook, No. 60*. Washington, DC, USA: US Department of Agriculture.

Shainberg, I., Letey, J. (1984). Response of soils to sodic and saline conditions. *Hilgardia*, 52(2), 1–57.

Szabolcs, I. (1989). *Salt affected soils.* Florida: CRC Press Inc.

Timpson, M.E., Richardson, J.L., Keller, L.P., McCarthy, G.J. (1986). Evaporite mineralogy associated with saline seeps in southwestern North Dakota. *Soil Science Society of America Journal*, 50(2), 490–493. https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000020048x

Van Doesburg, J.D., Vergouwen, L., Van der Plas, L. (1982). Konyaite, Na2Mg(SO4)2·5H2O, a new mineral from the great Konya Basin, Turkey. *American Mineralogist*, 67(9–10), 1035–1038.

Verrecchia, E.P., Braissant, O., Cailleau, G. (2006). The oxalate-carbonate pathway in soil carbon storage: the role of fungi and oxalotrophic bacteria. In: G.M., Gadd, ed., *Fungi in biogeochemical cycles*. New York: Cambridge University Press, 289–310.

Wiggs, G.F.S., O'hara, S.L., Wegerdt, J., Meer, J.V.D., Small, I., Hubbard, R. (2003). The dynamics and characteristics of aeolian dust in dryland Central Asia: possible impacts on human exposure and respiratory health in the Aral Sea basin. *Geographical Journal*, 169(2), 142–157. https://doi.org/10.1111/1475-4959.04976

Wood, W.W., Sanford, W.E. (1995). Eolian transport, saline lake basins, and groundwater solutes. *Water Resources Research*, 31, 3121–3129. https://doi.org/10.1029/95WR02572

ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

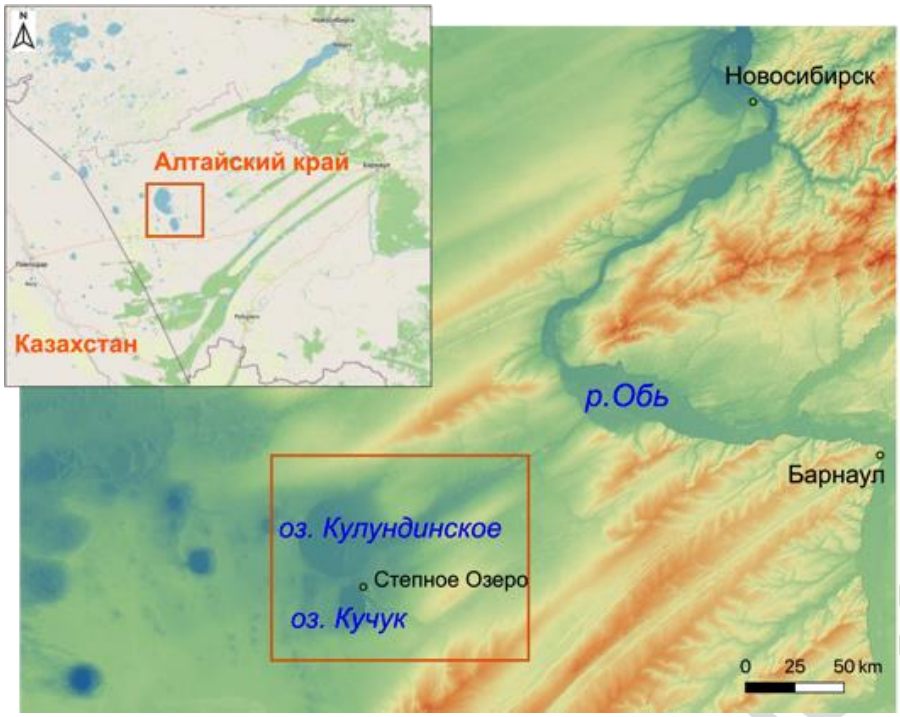

Рис. 1. Расположение участка исследования. Использован снимок с ресурса OpenStreetMap. Цифровая модель рельефа построена в QGIS 3.22.9 с подложкой из космоснимков высокого разрешения

Рис. 2. Карта-схема размещения объектов предприятия «Кучуксульфат», почвенных разрезов и точек отбора проб солевых выцветов на рентгенофазовый анализ

ACCEPTED MANUSCRIPT

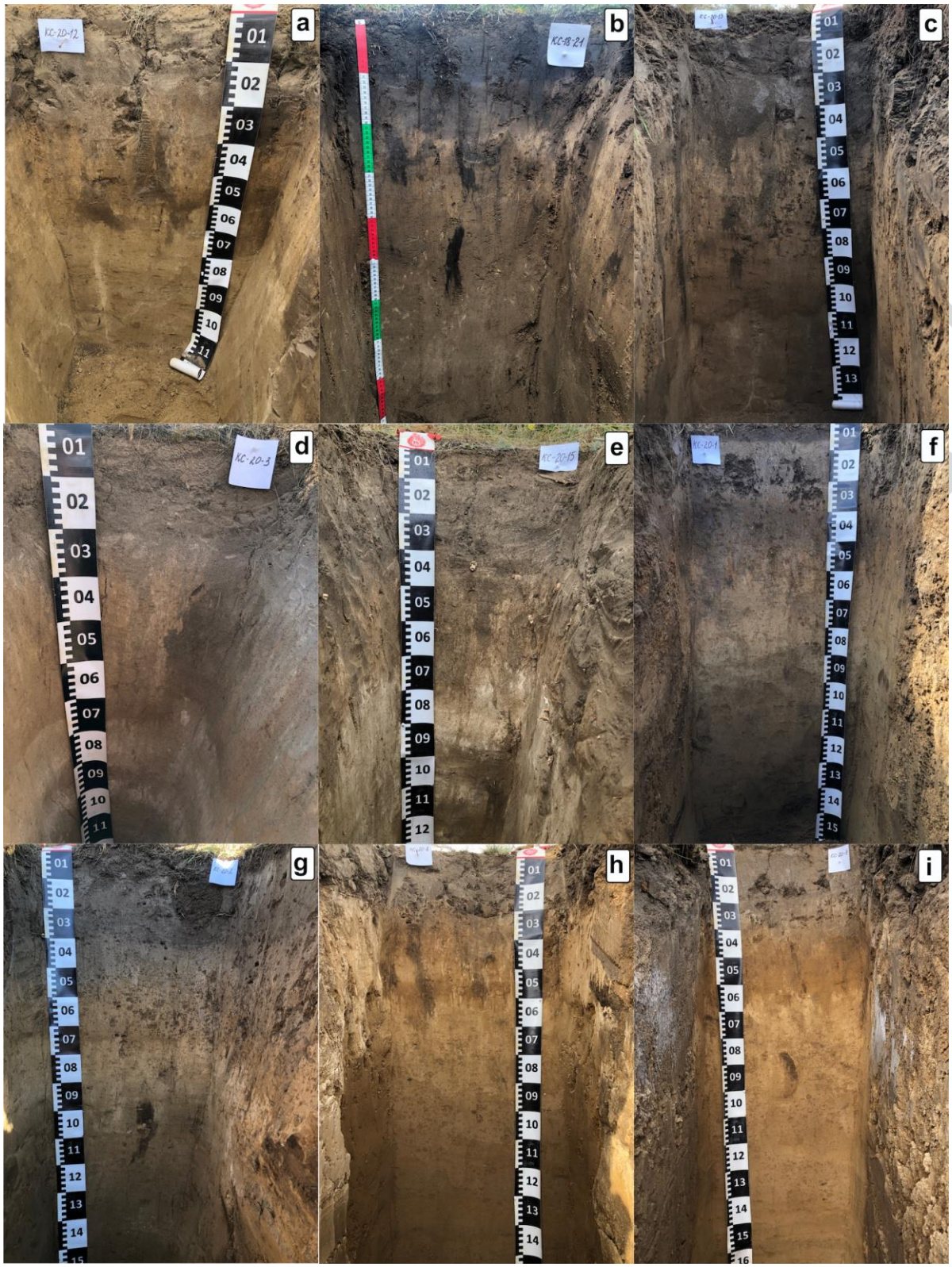

Рис. 3. Почвенные профили солонцов в импактной зоне предприятия (a–c) и на фоновой территории (d–i)

ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

Рис. 4. Структура солонцовых горизонтов изученных почв на суглинистых (слева) и супесчаных отложениях (справа)

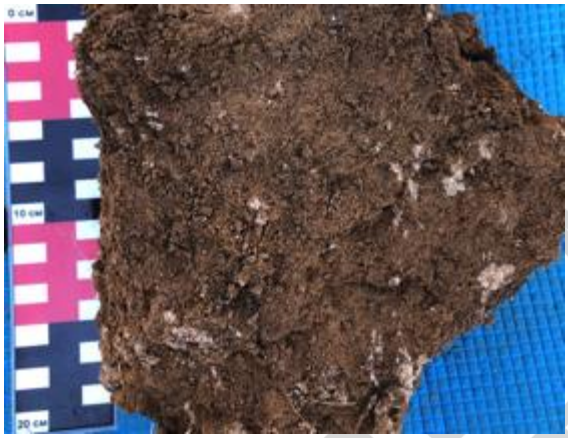

Рис. 5. Рыхлые мучнистые карбонатные выделения в аккумулятивно-карбонатных горизонтах

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ACCEPTED MANUSCRIPT

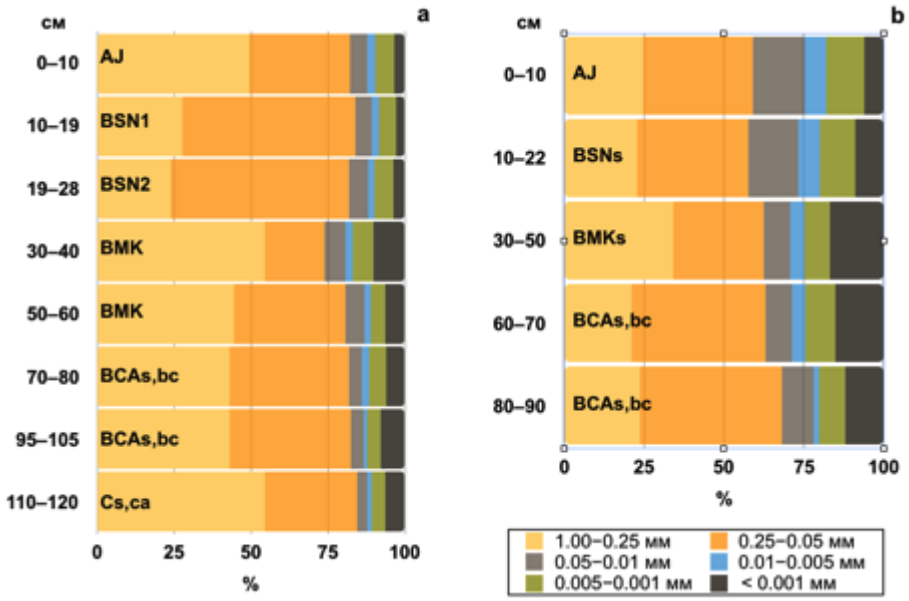

Рис. 6. Гранулометрический состав почв западной (a) и юго-восточной (b) части котловины

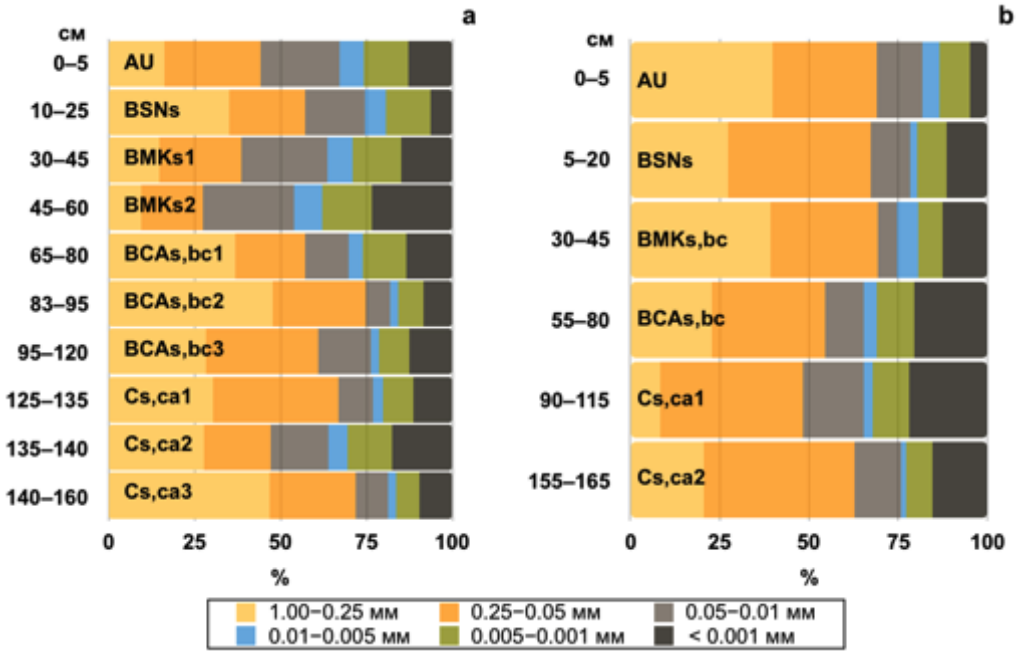

Рис. 7. Гранулометрический состав солонцов фоновой территории: разрез КС-20-2 (a) и разрез КС-20-8 (b)

ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

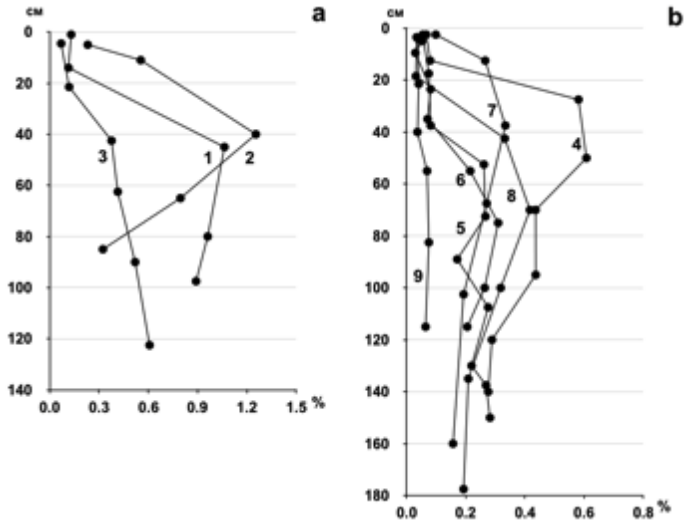

Рис. 8. Распределение содержания солей по профилю: a) в разрезах почв импактной зоны предприятия: 1 – КС-20-12, 2 – КС-21-18, 3 – КС-20-13; b) в разрезах почв условно фоновой и фоновой территории: 4 – КС-20-1, 5 – КС-20-2, 6 – КС-20-3, 7 – КС-20-8, 8 – КС-20-9, 9 – КС-20-15

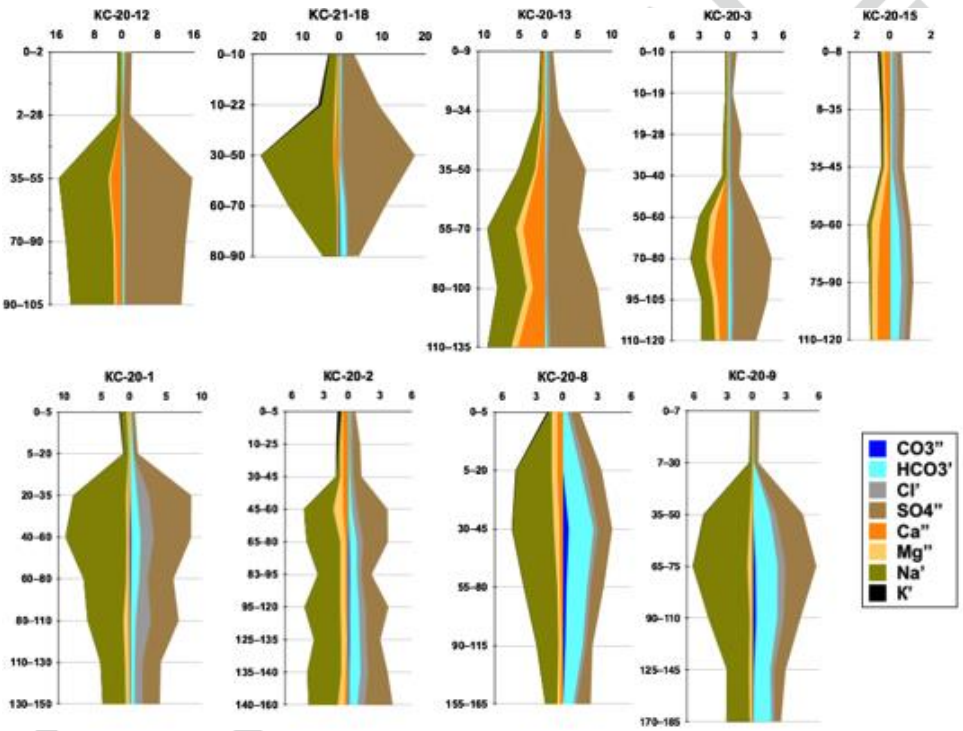

Рис. 9. Катионно-анионный состав водной вытяжки почв (смоль(+/–)/кг). По оси Y – глубины отбора проб, см

ACCEPTED MANUSCRIPT

Рис. 10. Место отбора проб солевых выцветов на фоновой территории

Рис. 11. Прибрежные солончаки оз. Кучук

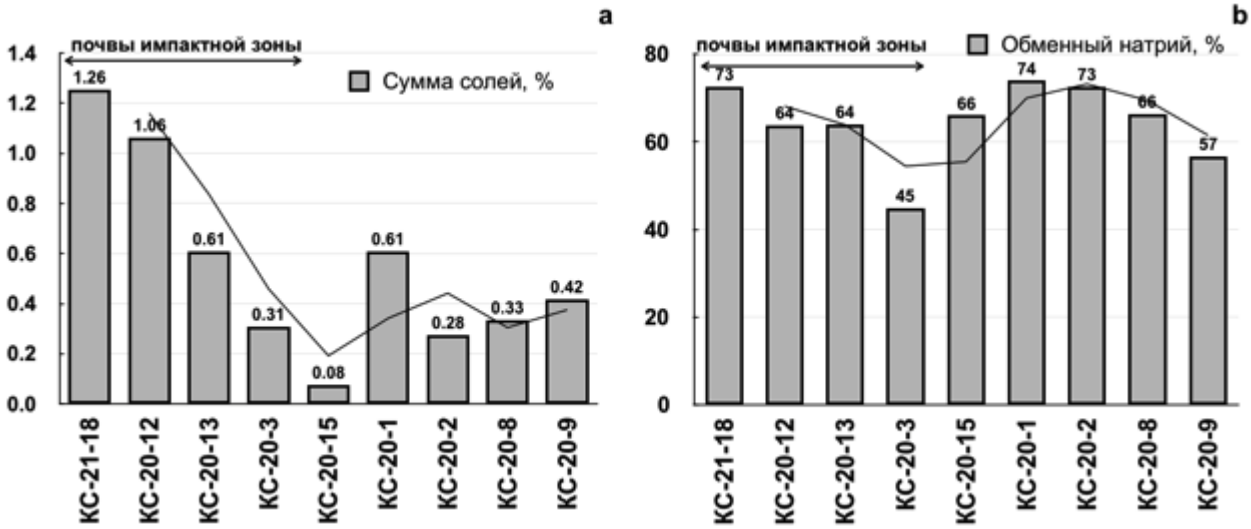

Рис. 12. Содержание солей (a) и обменного натрия (b) в горизонтах их максимума почв импактной зоны и фоновой территории. Линия тренда – скользящие средние

ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

Soil-geochemical assessment of salinization of the territory adjacent to the Kuchuk salt deposit (Altai Krai)

Simonova Yulia Vladimirovna[1], Zhunusova Oksana Radikovna[1], Charykova Marina Valentinovna[1], Kasatkina Galina Alekseevna[2]

[1]Saint Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya nab., Saint Petersburg, 199034, Russian Federation

[2]Dokuchaev Central Soil Science Museum, Branch of the Dokuchaev Soil Science Institute, 6, Birzhevoy proezd, Saint Petersburg, 199034, Russian Federation

Simonova Yu.V.: uvsim@yandex.ru;
Zhunusova O.R.: zhun.oksana@gmail.com
Charykova M.V.: m-char@yandex.ru;
Kasatkina G.A.: kasatkina-galina@mail.ru

Abstract

A soil geochemical analysis was conducted to assess the impact of the exploitation of the Lake Kuchuk salt deposit on the salinization of the soils in the adjacent areas. The specific characteristic of the soil forming in the Kulunda steppe is the wide distribution of salinization processes. Solonetzes soils are distributed in the impact zone of the deposit exploitation; therefore, as background soils, we considered also Solonetzes. Background soils are located at a considerable distance (2–10 km) from industrial facilities. The results of the chemical analysis of the soil-water extracts showed that the area of the most intense salinization is concentrated in the eastern and southeastern parts of the depression of the former lake. Nowadays, a salt evaporation pond and an open salt storage, which are the main industrial sources of sodium sulfate dust, occupy the bottom of the lake. The maximum salt content (over 1%) was found in these parts of the basin and is associated with the prevailing wind direction in the study area. With an increase in the hypsometric level of the surfaces and the distance from the open technological sources of dust, as well as on the opposite slope of the basin, there was a sharp (2–3 times) decrease in the salt content. The total salt content in the background soils ranged from 0.3 to 0.6%. The specificity of the chemistry of soil salinization in the impact zone was the dominance of sulfates and sodium in the composition of the soil-water extract, and thenardite, which is a dehydration product of mirabilite, in the composition of salt crust minerals

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ACCEPTED MANUSCRIPT

and salt efflorescences. In the background Solonetzes, the participation of soda in the chemical composition became more noticeable, which is a natural halogen geochemical feature of the Kulunda steppe. In the surface salt crusts in the background areas, a greater variety of minerals were noted, among which there were typical minerals of the evaporite association (gypsum, halite, calcite, dolomite, mirabilite) and their rare species (konyaite, wedellit).

Keywords: Lake Kuchuk, mirabilite, Western Siberia, salt-affected soils, salt deposit, technogenic halogenesis, salt background

References

Baddock, M.C., Bullard, J.E., Bryant, R.G. (2009). Dust source identification using MODIS: a comparison of techniques applied to the Lake Eyre Basin, Australia. *Remote Sensing of Environment,* 113 (7), 1511–1528.

Bazilevich, N.I. (1965). *Geochemistry of soils with sodic salinization*. Moscow: Nauka Publ. (In Russian)

Bazilevich, N.I., Pankova, E.I. (1972). Soil classification by the content of soluble salts and ions. *Bulletin of V.V. Dokuchaev Soil Science Institute*, 5, 36–40. (In Russian)

Blanco, M.D.C., Stoops, G. (2007). Genesis of pedons with discontinuous argillic horizons in the Holocene loess mantle of the southern Pampean landscape, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 23(1), 30–45. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.08.007

Buck, B. J., King, J., Etyemezian, V. (2011). Effects of salt mineralogy on dust emissions, Salton Sea, California. *Soil Science Society of America Journal*, 75(5), 1971–1985. https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0049.

Bulatov, V.I., Rotanova, I.N., Chernyh, D.V. (2005). Landscape-Ecological and Cartographic Analysys of Lake Basin Systems of the South of West Siberia (Lakes Chany and Kulunda). *Sibirskij jekologicheskij zhurnal*, 2, 175–182. (In Russian).

Chappell, A., Strong, C., McTainsh, G., Leys, J. (2007). Detecting induced in situ erodibility of a dust-producing playa in Australia using a bi-directional soil spectral reflectance model. *Remote Sensing of Environment*, 106(4), 508–524. https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.009

Chizhikova, N.P., Khitrov, N.B. (2016). Diversity of clay minerals in soils of solonetzic complexes in the southeast of Western Siberia. *Eurasian Soil Science*, 49, 1419–1431. https://doi.org/10.1134/S106422931612005X

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

Classification and Diagnostics of Soils of Russia. (2004). Smolensk: Oikumena Publ. (In Russian)

Climate data (2022). *Climate data for cities worldwide.* [online] Available at: https://en.climate-data.org/ [Accessed 01.10.2022].

Durand, N., Monger, H.C., Canti, M.G. (2010). Calcium carbonate features. In: G., Stoops, V., Marselino, F., Mees, ed., *Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths*, 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 149–194.

Eugster, H.P., Hardie, L.A. (1978). Saline Lakes. In: A., Lerman, ed., *Lakes*. New York, NY: Springer.

Gerasimov, I.P., Ivanova, E.N. (1934). Processes of continental salt accumulation in soils, rocks, underground waters and lakes of the Kulunda steppe. *Trudy Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*, 9, 103–136. (In Russian)

Goldstein, H.L., Breit, G.N., Reynolds, R.L. (2017). Controls on the chemical composition of saline surface crusts and emitted dust from a wet playa in the Mojave Desert (USA). *Journal of Arid Environments, 140*, 50–66. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.01.010

IUSS Working Group WRB. (2022). *World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition.* International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria.

Kazancev, V.A. (1998). *Problems of pedohalogenesis: on the example of the Baraba Plain*. Novosibirsk: Nauka Publ. (In Russian)

Khitrov, N.B. (2004). The choice of diagnostic criteria to judge the development of the solonetzic process in soils. *Eurasian Soil Science,* 37(1), 12–23.

Khitrov, N.B., Vorobyeva, L.A. (2013). Soil salinity assessment. In: Ivanov, A.L. (Ed.), *Scientific Basis for Prevention of Soil (Land) Degradation of Agricultural Lands in Russia and Formation of Systems for Reproduction of Their Fertility in Adaptive Agriculture Landscapes*, Vol. 1. Moscow: Soil Institute of V.V. Dokuchaev, 426–441. (In Russian)

Kovalev, R.V., Panin, P.S., Panfilov, V.P., Selyakov, S.N. (1967). *Soils of the Kulunda steppe*. Novosibirsk: Nauka Publ. (In Russian)

Kovda, V.A. (1937). *Solonchaks and Solonetzes.* Moscow-Leningrad: Akademija nauk SSSR Publ. (In Russian)

Kovda, V.A. (1946). *Origin and regime of saline soils. Vol.1.* Moscow-Leningrad: Akademija nauk SSSR Publ. (In Russian)

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ACCEPTED MANUSCRIPT

Kovda, I.V., Khokhlova, O.S. (2015). Carbonate profile of soils. In: I.V., Ivanov, V.N. Kudeyarov, ed., *Theory, Diversity of Natural Evolution and Anthropogenic Transformations of Soils.* Moscow: GEOS, 140–158. (In Russian)

Kuchin, M.I. (1940). Genesis of salts in the Kulunda steppe. *Trudy nauchnoj konferencii po izucheniju i osvoeniju proizvoditel'nyh sil Sibiri. Vol. 2: Problema: mineral'no-syr'evaja baza Sibiri.* Tomsk: izdatel'stvo "Krasnoe znamja", 516–525. (In Russian)

Lebedeva, M.P., Lopukhina, O.V., Kalinina, N.V. (2008). Specificity of the chemical and mineralogical composition of salts in solonchak playas and lakes of the Kulunda steppe. *Eurasian Soil Science*, 41, 416–428. https://doi.org/10.1134/S106422930804008X

Leduc, E. M. S., Peterson, R. C., Wang, R. (2009). The crystal structure and hydrogen bonding of synthetic konyaite, Na2Mg(SO4)2·5H2O. *American Mineralogist*, 94(7), 1005–1011. https://doi.org/10.2138/am.2009.3132

Leonova, G.A., Bogush, A.A., Bobrov, V.A., Bychinsky, V.A., Trofimova, L.B., Malikov, Yu.I. (2007). Ecological and geochemical assessment of salt lakes in the Altai Kray. *Geography and natural recourses*, 1, 51–59. (In Russian)

Manning, D.A.C. (2000). Carbonates and oxalates in sediments and landfill: monitors of death and decay in natural and artificial systems. *Journal of the Geological Society*, 157(1), 229–238. https://doi.org/10.1144/jgs.157.1.229

Makarychev, S.V. (2019). Solonetz soils of arid steppe, their properties and possibility of land reclamation. *Bulletin of Altay state agricultural university*, 5(175), 64–70.

Martynov, V.A. (1957). Main features of the geomorphology of the Kulunda steppe. *Vestnik Zapadno-Sibirskogo geologicheskogo upravleniya*, 1(1), 73–84. (In Russian)

Mees, F., Singer, A. (2006). Surface crusts on soils/sediments of the southern Aral Sea basin, Uzbekistan. *Geoderma*, 136, 152–159. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.03.019

Meyer, B.C., Schreiner, V., Smolentseva, E.N., Smolentsev, B.A. (2008). Indicators of desertification in the Kulunda Steppe in the south of Western Siberia. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 54(6), 585–603.

Novoselov, A., Konstantinov, A., Konstantinova, E., Barbashev, A., Dudnikova, T., Lobzenko, I. (2022). Micromorphological and mineralogical features of saline playa surface sediments from two large Trans-Uralian lakes. *Eurasian Journal of Soil Science*, 11(2), 93–101.

Rastvorova, O.G., Andreev, D.P., Gagarina, E.I., Kasatkina, G.A., Fedorova, N.N. (1995). *Chemical analysis of soils: Textbook.* Saint Petersburg: Saint Petersburg University Press.

ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

Richards, L. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agricultural handbook, No. 60*. Washington, DC, USA: US Department of Agriculture.

Salt-affected soils of Russia. (2006). Moscow: IKC Akademkniga Publ. (In Russian)

Shainberg, I., Letey, J. (1984). Response of soils to sodic and saline conditions. *Hilgardia*, 52(2), 1–57.

Shulgin, A.M. (1972). *Soil climate and its regulation*, 2nd ed. Leningrad: Gidrometeoizdat.

Szabolcs, I. (1989). *Salt affected soils.* Florida: CRC Press Inc.

Timpson, M.E., Richardson, J.L., Keller, L.P., McCarthy, G.J. (1986). Evaporite mineralogy associated with saline seeps in southwestern North Dakota. *Soil Science Society of America Journal*, 50(2), 490–493. https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000020048x

Ulyashchenko, F.N. (1935). Soils of the Kulunda steppe (in connection with its irrigation). *Trudy Tomskogo gosudarstvennogo universiteta im. V.V. Kujbysheva*, 88, 156–207. (In Russian)

Urusevskaja, I.S., Aljabina, I.O., Shoba, S.A. (2020). *Map of soil-ecological zoning of the Russian Federation. Scale 1:8 000 000. Explanatory text and legend for the map: Tutorial.* Moscow: MAKS Press. (In Russian)

Valyashko, M.G. (1962). *Geochemical regularities of formation potash deposits*. Moscow: Moscow University Press. (In Russian).

Van Doesburg, J.D., Vergouwen, L., Van der Plas, L. (1982). Konyaite, Na2Mg(SO4)2·5H2O, a new mineral from the great Konya Basin, Turkey. *American Mineralogist*, 67(9–10), 1035–1038.

Verrecchia, E.P., Braissant, O., Cailleau, G. (2006). The oxalate-carbonate pathway in soil carbon storage: the role of fungi and oxalotrophic bacteria. In: G.M., Gadd, ed., *Fungi in biogeochemical cycles*. New York: Cambridge University Press, 289–310.

Vorobyova, L.A. (1998). *Chemical analysis of soils: Textbook.* Moscow: Moscow University Press.

Wiggs, G.F.S., O'hara, S.L., Wegerdt, J., Meer, J.V.D., Small, I., Hubbard, R. (2003). The dynamics and characteristics of aeolian dust in dryland Central Asia: possible impacts on human exposure and respiratory health in the Aral Sea basin. *Geographical Journal*, 169(2), 142–157. https://doi.org/10.1111/1475-4959.04976

Wood, W.W., Sanford, W.E. (1995). Eolian transport, saline lake basins, and groundwater solutes. *Water Resources Research*, 31, 3121–3129. https://doi.org/10.1029/95WR02572

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ