

УДК 631.413.3:622.371:551.345
DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4996
Шифр специальности ВАК 1.6.21
Обзорная статья

Засоление почв при разработке коренных месторождений алмазов в криолитозоне (Западная Якутия (Россия))

О.В. Шадринова✉, Я.Б. Легостаева

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Россия, г. Якутск

✉ovshadrinova@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Засоление почв является одним из основных факторов деградации земель, приводящих к изменению микробных и биохимических свойств почвы, потере биоразнообразия, опустыниванию и нарушению функционирования экосистем в целом. В данной статье приведены результаты изучения развития процессов техногенного засоления почвенного покрова в северотаежной ландшафтной провинции в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород на примере территории разработок коренных месторождений алмазов в Западной Якутии в пределах Якутской алмазоносной провинции (Алакит-Мархинское кимберлитовое поле). **Цель.** Изучение процессов засоления почвенного покрова при алмазодобыче в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород и определение причин развития техногенного педогалогенеза. **Методы.** Основные катионы и анионы, pH определялись в водной вытяжке (1:5), органическое вещество почвы определяли фотоэлектрическим колориметрическим методом. Рассчитаны суммы токсичных солей. Статистический анализ проведен в программе Statistica10. Карта-схемы площадного распространения засоления почв и суммы токсичных солей построены с помощью программы Surfer-13 с применением метода интерполяции «kriging». **Результаты и выводы.** Установлено, что процессы техногенного засоления почв в результате алмазодобычи приобрели площадной характер и приурочены к объектам добычи и переработки горно-обогатительного комбината. В зоне воздействия отвалов пустых пород наблюдается развитие преимущественно сульфатного типа засоления с преобладанием таких токсичных солей, как Na_2SO_4 и MgSO_4 и MgCl_2 . Маркером воздействия хвостохранилищ выступает проявление хлоридного типа засоления и токсичные соли Na_2SO_4 , MgSO_4 и MgCl_2 , NaCl . Профиль техногенно засоленных почв характеризуется наличием испарительного, биогенного или надмерзлотного геохимических барьеров, отображающих специфику процессов засоления в криолитозоне.

Ключевые слова: деградация почв, техногенное засоление, токсичные соли, Западная Якутия, Якутская алмазоносная провинция, Алакит-Мархинское кимберлитовое поле

Благодарности: Исследование выполнено по государственному заданию Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН в рамках проекта НИР № FUGG-2024-0007.

Для цитирования: Шадринова О.В., Легостаева Я.Б. Засоление почв при разработке коренных месторождений алмазов в криолитозоне (Западная Якутия (Россия)) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 9. – С. 109–126. DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4996

UDC 631.413.3:622.371:551.345
DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4996
Review article

Soil salinization during the development of primary diamond deposits in the cryolithozone (Western Yakutia (Russia))

O.V. Shadrinova✉, Ya.B. Legostaeva

Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

✉ovshadrinova@mail.ru

Abstract. Relevance. Soil salinization is one of the major contributors to land degradation, which leads to changes in microbial and biochemical properties of soil, loss of biological diversity, desertification and disruption of ecosystem functioning in general. This article presents the results of studying the processes of technogenic salinization of soil cover in the north taiga landscape province within the continuous permafrost zone based on the example of mining area of the primary diamond deposits in Western Yakutia in the Yakutsk diamondiferous province (Alakit-Markha kimberlite field). **Aim.** Study of soil salinization processes in diamond mining within the continuous permafrost zone and identification of the causes for technogenic pedohalogenesis development. **Methods.** Major cations and anions, pH were determined in water extract (1:5), soil organic matter was determined using photoelectric colorimetric method. The total of toxic salts was calculated. Statistical analysis was conducted in Statistica10 program. Map-schemes of area distribution of soil salinization and totals of toxic salts were plotted using Surfer-13 program by kriging interpolation method. **Result and conclusions.** It was established that the processes of technogenic soil salinization due to diamond mining have acquired an areal character, being confined to the mining and processing facilities of the processing plant. In the impact area of waste dumps, predominantly sulfate type of salinization is observed, with the prevalence of toxic salts such as Na_2SO_4 , MgSO_4 and MgCl_2 . A marker of tailing dumps impact includes occurrence of chloride type of salinization and toxic salts, such as Na_2SO_4 , MgSO_4 and MgCl_2 , NaCl . Soil profile of technogenically salinized soils is distinguished by the presence of evaporative, biogenic or permafrost geochemical barriers, which displays the specific nature of salinization processes.

Keywords: soil degradation, technogenic salinization, toxic salts, Western Yakutia, Yakutsk diamondiferous province, Alakit-Markha kimberlite field

Acknowledgements: The research was carried out with the financial support of the implementation of the projects of the State Task of the Ministry of Education of the Russian Federation FUG-2024-0007.

For citation: Shadrinova O.V., Legostaeva Ya.B. Soil salinization during the development of primary diamond deposits in the cryolithozone (Western Yakutia (Russia)). Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2025, vol. 336, no. 9, pp. 109–126. DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4996

Введение

Процессы педогалогенеза являются одним из основных факторов деградации почв, приводящих к нарушению процесса поглощения влаги [1–3] вследствие повышения содержания токсических солей в корнеобитаемом слое, к потере биоразнообразия [4], к развитию локальных процессов опустынивания [5–7], оказывают сильное влияние на микробные и биохимические свойства почвы [8–12] и представляют угрозу для функционирования экосистем [13–15]. Согласно общепринятым в России критериям, к засоленным относятся почвы, содержащие в пределах 2 м легкорастворимые соли в количестве, превышающем пороги токсичности [16]. Как правило, засоление может иметь естественное (первичное) и антропогенное (вторичное) происхождение [17, 18]. Естественное засоление – это процесс накопления легкорастворимых солей в почве в результате воздействия природных факторов (характер почвообразующего субстрата, глубины залегания грунтовых вод, положения почв в рельефе и интенсивности атмосферных осадков). Антропогенное засоление бывает вызвано, как правило, хозяйственной деятельностью человека.

На сегодняшний день изучению процессов техногенного засоления почв посвящено достаточно много исследований. Например, техногенное засоление почв, связанное с применением антигололедных реагентов, представляющих собой смесь песка с хлоридами кальция или натрия, приобретает широкое распространение на урбани-

зированных территориях [19–22]. Выявлены и изучены процессы засоления почв и грунтов на месторождениях каменных калийных и магниевых солей в Предуралье и Сибири [23–26]. Широко освещены вопросы деградации почв на участках нефтегазовых месторождений вследствие загрязнения межпластовыми высокоминерализованными водами в Западной и Восточной Сибири [27–31], Канаде [32], Китае [33]. Есть публикации, где изучается засоление почв на участках угледобычи [34, 35]. При подготовке материалов мы не нашли публикаций, связанных с развитием техногенного засоления почв при разработке коренных месторождений алмазов на территории основных крупных центров алмазодобычи в России, Канаде, Ботсване, Анголе и других странах Африки. В данной статье представлены результаты анализа развития техногенного засоления почв и грунтов на примере территории Алаkit-Мархинского кимберлитового поля в Республике Саха (Якутия), где ведется разработка коренных месторождений алмазов. В истории Якутии изучение процессов засоления почв до сих пор проводилось в пределах агроландшафтов [36, 37]. В результате современных исследований на территории Якутской алмазодобывающей провинции впервые выявлены области с развитием процессов засоления почв на объектах алмазодобычи. Цель работы – изучить процессы засоления почвенного покрова при алмазодобыче в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород и установить причины развития техногенного педогалогенеза.

Природные условия территории исследования

Площадь исследований находится в Средней Сибири (Западная часть Республики Саха (Якутия), Россия) в Якутской алмазонасной провинции (Далдыно-Алаkitский алмазонасный район, Алаkit-Мархинское кимберлитовое поле), на территории промышленной площадки Айхальского горно-обогатительного комбината (АГОК) вблизи поселка городского типа Айхал, расположенного на 65°56' с.ш. и 111°29' в.д. Поселок Айхал – уникальный в своем роде населенный пункт, вокруг него в радиусе до 27 км находятся пять промышленно алмазонасных кимберлитовых трубок «Юбилейная», «Заря», «Айхал», «Сытыканская» и «Комсомольская». Последние два объекта на данный момент являются отработанными, месторождение Айхал с 1997 г. переведено на подземный способ добычи, с него же было начато промышленное освоение территории в 1961 г.

В региональном тектоническом плане территория находится в области сочленения двух крупных структур Сибирской платформы: северо-восточного борта Тунгусской синеклизы с юго-западным крылом Анабарской антеклизы, осложненной системой Далдыно-Оленекской зоны разломов, кимберлитовым и трапповым магматизмом [38]. В геологическом строении архейский кристаллический фундамент покрыт осадочным чехлом мощностью до 3 км, который выполнен венд-нижнепалеозойскими терригенно-карбонатными и верхнепалеозойскими-нижнемезозойскими терригенными породами, представленными в основном известняками и доломитами и их глинистыми, мергелистыми разностями. Залежи соли на территории отсутствуют [39]. Речная сеть района имеет радиальный центробежный рисунок и представлена в основном верховьями реки Мархи с ее левыми притоками – р. Далдын, руч. Сохолох.

Ландшафты исследуемой территории относятся к Верхневилуйской столово-останцевой провинции северотаёжных редкостойных кустарничково-мохово-лишайниковых лиственничников в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых

пород (ММП). Суровость климата определяет низкорослость, небольшую сомкнутость крон, обилие ерников и других кустарников в подлеске, с преобладанием лишайников и моховых группировок в напочвенном покрове [40]. Глубина сезонно-талого слоя с поверхности в вегетационный период колеблется: наименьшей мощности (10–50 см) деятельный слой достигает в условиях плоского рельефа (террасы рек, плоские водоразделы), максимальной мощности (1–2,5 м) – на хорошо дренированных склонах, а также в пойменных аллювиальных песчано-галечных отложениях. Рельеф траппового плато холмисто-пологоувалистый с абсолютными отметками урезов и высот от 299 до 802 м. Отличительной чертой является и очень слабая заболоченность, чему препятствует расчлененность и постоянное омоложение рельефа, которое поддерживается благодаря постоянным восходящим тектоническим движениям, и неглубокое залегание коренных пород [41].

В климатическом отношении территория, расположенная в 70 км южнее от северного полярного круга, относится к субарктическому поясу сибирской области. Снежный покров образуется в начале октября и сходит в мае, его мощность в естественных понижениях рельефа достигает 2–3 м, а на водоразделах – до 1 м. Территория исследования характеризуется крайне-континентальным сильно аридным климатом с отрицательными среднегодовыми температурами и достаточным увлажнением. Отмечается преобладание суммы испаряемости над суммой выпадаемых осадков (табл. 1). Анализ природно-климатических факторов показал отсутствие объективных предпосылок к развитию процессов засоления почв [42], характеристика некоторых климатических показателей АГОК приведена в табл. 1.

Отработка коренных месторождений алмазов осложняется вскрытием водоносных горизонтов высокоминерализованных рассолов [43]. Гидрогеологические условия Алаkit-Мархинского кимберлитового поля определяются его принадлежностью к Тунгусскому криоартезианскому бассейну [44].

Таблица 1. Характеристика некоторых климатических показателей АГОК за период с 1985 по 2019 гг. (min...max/среднее) [42]

Table 1. Characteristics of several climate indicators of Aykhal Mining and Processing Plant (AMPP) from 1985 to 2019 (min...max/average) [42]

Температура воздуха/Air temperature			Осадки/Precipitation		E ₀	КУ	IA
Среднегодовая Average annual	Январь January	Июль July	Среднегодовая Average annual	R (VI–VIII)			
15,3 ... 10,1	–48,9 ... –27,1	11,7 ... 18,3	187,3 ... 431,5	18,2 ... 345,5	262,6 ... 437,7	0,45 ... 1,34	0,17 ... 0,21
12,2	–39,8	15,1	300,1	152,9	346,1	0,88	0,19

Примечание: R – сумма осадков летних месяцев (мм); E – сумма среднегодовой испаряемости (мм); КУ – коэффициент увлажнения; IA – индекс аридности.

Note: R – precipitation total of summer months (mm); E – total of average annual evaporation (mm); КУ – humidity factor; IA – aridity index.

На изучаемой территории выделяются надмерзлотные, межмерзлотные (воды нижнего ордовика олдониинской свиты) и подмерзлотные воды – воды верхнекембрийских, среднекембрийских, нижнекембрийских и позднепротерозойских отложений. Надмерзлотные воды, для которых водоупором служат ММП, существуют в пределах сезонно-талого слоя (СТС). Воды СТС питаются преимущественно за счет атмосферных осадков, имеют пресный состав с минерализацией 0,028–0,038 г/л в основном гидрокарбонатно-кальциевого состава [39]. Межмерзлотные воды представлены нижнеордовикским мерзлотным водоносным комплексом и характеризуются малообводненностью и спорадичностью распространения. По химическому составу межмерзлотные воды хлоридные натриево-кальциевые с минерализацией от 27,7 до 130 г/л с pH 7,7. На глубине от 520 м залегает верхнекембрийский подмерзлотный водоносный комплекс, который характеризуется повсеместным распространением, по химическому составу относится к хлоридным натриево-магниевым-кальциевым рассолам с минерализацией, повышающейся с глубиной от 144–166 до 348 г/л [45]. Разгрузок на дневную поверхность межмерзлотных и подмерзлотных вод не зафиксировано.

В процессе горного производства на территории промышленной площадки АГОК сформирован техногенный ландшафт, представляющий собой наземные хранилища – отвалы пустых пород, вещественный состав которых определен вмещающими кимберлитовые трубки породами. Также в отвалы свозятся породы, пропитанные рассолами нижнеордовикского водоносного комплекса, при вскрытии их в процессе отработки трубки [46]. А в результате обогащательного производства формируются наземные (хвостохранилища) и подземные хранилища (полигоны закачки дренажных вод и высокоминерализованных рассолов в ММП). В настоящее время функционируют два узла закачки дренажных вод в ММП: участок «Ноябрьский» – подземное хранилище дренажных рассолов трубки «Айхал», расположенный в 4 км юго-западнее трубки на водоразделе рек Сохолох и Ойюр-Юряге, и участок «Заречный» – находится в бассейне р. Мархи, служит узлом закачки дренажных вод карьера трубки «Юбилейная». Участки эксплуатируются в опытно-промышленном режиме [45]. В подземные хранилища закачиваются рассолы с минерализацией больше 60 г/л, а воды с минерализацией менее 60 г/л складываются в хвостохранилища [47].

Материалы и методы

В основу фактического материала положены полевые и лабораторные исследования, проведенные авторами в 2019–2024 гг. (рис. 1).

Объектами исследований являются почвы и грунты Алакит-Мархинского кимберлитового поля и промышленной площадки Айхальского горно-обогатительного комбината. Полевое опробование проводилось в два этапа: в августе 2019 и 2023 гг. во время максимальной оттайки почвы методом ключевых участков в привязке к промышленным объектам инфраструктуры АГОК со всех почвенных горизонтов до границы сезонно-талого слоя. Общий объем выборки составляет 243 пробы. Отобранные образцы представлены: 1) почвами природных ландшафтов; 2) почвами селитебной территории п. Айхал; 3) почвами и грунтами импактной зоны АГОК, включающими техногенно-поверхностные образования – литостраты и токсилитостраты, почвы под воздействием отвалов (литостратов) и почвы под воздействием хвостохранилищ (токсилитостратов) и грунты. Диагностика типов почв проведена по профилно-диагностическому признаку в соответствии с классификацией почв России [48], диагностика антропогенных горизонтов произведена по [49, 50].

Все анализы проведены в Институте геологии алмаза и благородных металлов СО РАН. Образцы высушены и просеяны через сито диаметром в 1 мм. Анализировался состав ионов CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ и K^+ в водной вытяжке (1:5) (аналитики – А.М. Романова, Н.В. Свинобоева, Д.В. Софронова). pH почвы измеряли в суспензии почва:вода (1:5) при комнатной температуре на pH-метре («Меттлер Толедо, Seven Compact Advanced»). Органическое вещество почвы определяли фотоэлектрическим колориметрическим методом. Оценка степени засоленности почв проведена по содержанию суммы токсичных солей ($S_{\text{токс}}$) [51]. К токсичным относятся соли Na_2CO_3 , MgCO_3 , NaHCO_3 , $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$, Na_2SO_4 , MgSO_4 , NaCl , MgCl_2 и CaCl_2 , нетоксичные соли – $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, CaSO_4 . Связывание катионов и анионов в гипотетические соли произведено в следующей последовательности: анионы – CO_3^{2-} – HCO_3^- – SO_4^{2-} – Cl^- , катионы – Ca^{2+} – Na^+ – Mg^{2+} . После подсчетов гипотетических солей рассчитывалось соотношение токсичных и нетоксичных солей от общей суммы солей в % [52]. Усредненные значения водорастворимого комплекса приведены в среднегеометрических значениях. Обработка результатов, корреляционный анализ непараметрического коэффициента Спирмена ($p < 0,05$) и построение графиков рассеяния проведены с помощью программы STATISTICA10.

Карта-схемы площадного распространения процессов техногенного засоления и суммы токсичных солей выполнено в пакете программ Surfer-13 с применением метода интерполяции «kriging» по результатам содержания солей в 20-ти сантиметровом почвенном слое.

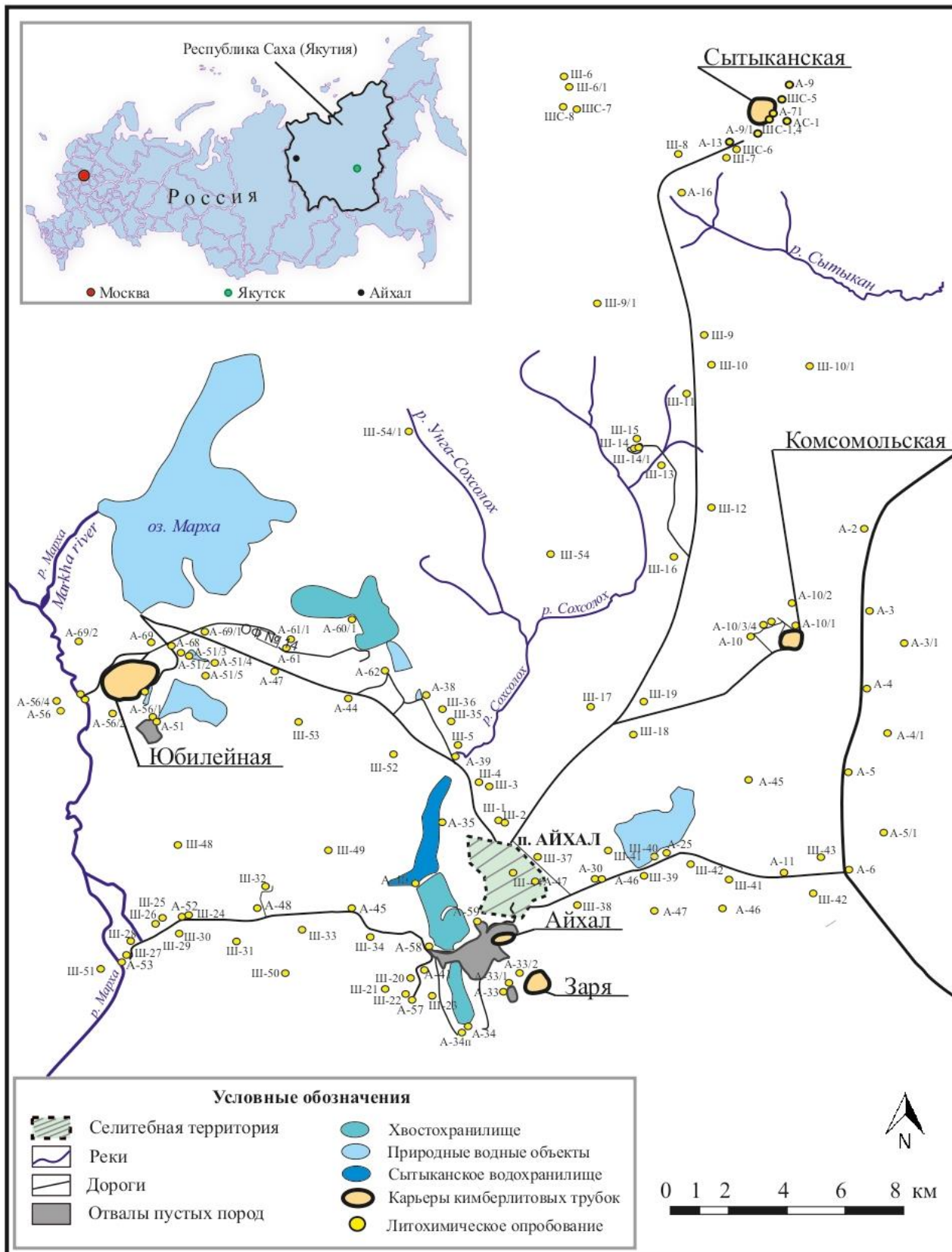


Рис. 1. Схема опробования территории исследования

Fig. 1. Survey area sampling scheme

Почвы природных ландшафтов

Почвенный покров территории Западной Якутии характеризуется пестротой и микрокомплексностью. В почвенном покрове на водораздельном пространстве Марха-Далдынского междуречья доминируют криоземы [53] – почвы с криогенным горизонтом, сформированным мерзлотными перемещениями переувлажненной почвенной массы [48]. Литоземы и карболитоземы – горные примитивные почвы, которые занимают подчиненное положение в структуре почвенного покрова и формируются на верхних частях пологих склонов. Все типы диагностируемых почв относятся к стволу постлитогенных, в которых процесс почвообразования идет на сформировавшейся почвообразующей породе, а аккумуляция свежего материала либо отсутствует, либо незначительна и не отражается на строении профиля [48]. Почвы характеризуются мелкопрофильностью, сильной щебнистостью, тяжелым грансоставом, слабой дифференцируемостью почвенного профиля, мощность которого в среднем достигает 30 см с признаками тиксотропности и криотурбационного перемешивания. В почвенном профиле, как правило, присутствует льдистая или сухая мерзлота. Почвы природных ландшафтов изучаемой территории не засолены, характеризуются нейтральной реакцией среды, невысоким содержанием органического вещества, с относительно однородным распределением водорастворимых ионов по всему почвенному профилю (табл. 2).

Почвы и техногенные почвоподобные отложения

Почвы территории промышленной площадки АГОК представлены в основном криоземами. Литоземы и карболитоземы расположены фрагментарно на флангах исследуемой территории. В целом это почвы, испытывающие техногенную нагрузку, находящиеся непосредственно на территории промышленных объектов, например, карьеров, где происхо-

дит разработка кимберлитовых трубок, но с ненарушенным растительным покровом и неизменным почвенным профилем. Помимо этого, на территории формируются антропогенно-преобразованные почвы – это почвы, «законсервированные» под техногенными насыпями, отвалами или под слоем разлившейся пульпы, в которых полностью сохранен природный облик почвенного профиля, захороненный под одним или несколькими слоями перекрытия. Техногенно-поверхностные образования (ТПО) представлены литостратами и токсилитостратами. Литостраты – это поверхностные образования из дезинтегрированного материала отвалов вскрышных (или пустых) пород, а токсилитостраты – это намывные грунты из кимберлитовой пульпы хвостохранилищ.

Основные показатели водорастворимого комплекса почвенного покрова промышленной площадки отражены в табл. 2, где для сравнения основных характеристик в почвах природных ландшафтов и в почвах импактной зоны представлена выборка для разных типов криоземов. Почвы, находящиеся под воздействием отвалов пустых пород, характеризуются слабой степенью сульфатного, хлоридно-сульфатного засоления (засолены 94 % образцов). По сравнению с почвами природных ландшафтов наблюдается увеличение содержания HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} и $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, особенно сульфатов и натрия, при этом pH близко к значениям природных аналогов.

Почвы, находящиеся под воздействием хвостохранилищ (расположенные на территории обогатительных фабрик вокруг пляжа хвостохранилища с внешними признаками воздействия в виде наносов кимберлитового песка и без них) (рис. 2) характеризуются слабощелочной pH и резким увеличением всех ионов, отличаются высоким содержанием хлоридов, преимущественно сульфатно-хлоридным, хлоридным, реже хлоридно-сульфатным типом засоления от слабой до очень сильной степени (засолены 95 % образцов).

Таблица 2. Характеристика водорастворимого комплекса почвенного покрова промышленной площадки АГОК

Table 2. Characteristics of soil cover water soluble complex at the industrial site of AMPP

Показатель Index	Почвы природных ландшафтов Soils of nature landscapes, n=18	Почвы в зоне воздействия Soils in the affected area		ТПО/Technosols	
		отвалов by waste rock dumps, n=17	хвостохранилищ by tailing dumps, n=19	Литостраты Litostrats, n=25	Токсилитостраты Toxilitostrats n=15
± SD					
C _{орг} , %	7,2±6,80	5,87±8,36	4,00±6,04	2,06±3,41	0,88±0,54
pH _{H2O}	6,7±0,4	6,6±0,9	7,7±0,4	7,1±0,7	8,4±0,6
HCO ₃ ⁻	0,28±0,10	0,48±0,31	0,75±0,35	0,43±0,22	0,52±0,16
Cl ⁻	0,54±0,12	0,47±0,24	1,11±2,45	0,37±0,13	0,78±0,57
SO ₄ ²⁻	0,12±0,12	1,96±0,58	2,31±1,04	2,47±1,46	2,71±0,85
Ca ²⁺	0,44±0,12	0,76±0,46	1,66±0,85	1,35±0,84	1,66±0,50
Mg ²⁺	0,28±0,11	0,56±0,12	0,95±0,42	0,71±0,31	0,84±0,18
Na ⁺ +K ⁺	0,24±0,08	1,60±0,46	2,06±1,75	1,24±0,56	1,65±0,58
S _{ТОКС} , %	0,03±0,01	0,14±0,03	0,18±0,12	0,13±0,05	0,16±0,04

Примечание: SD – стандартное отклонение; значения всех ионов приведены в смоль(экв)/кг.

Note: SD – standard deviation; values of all ions are given in cmol(eq)/kg.

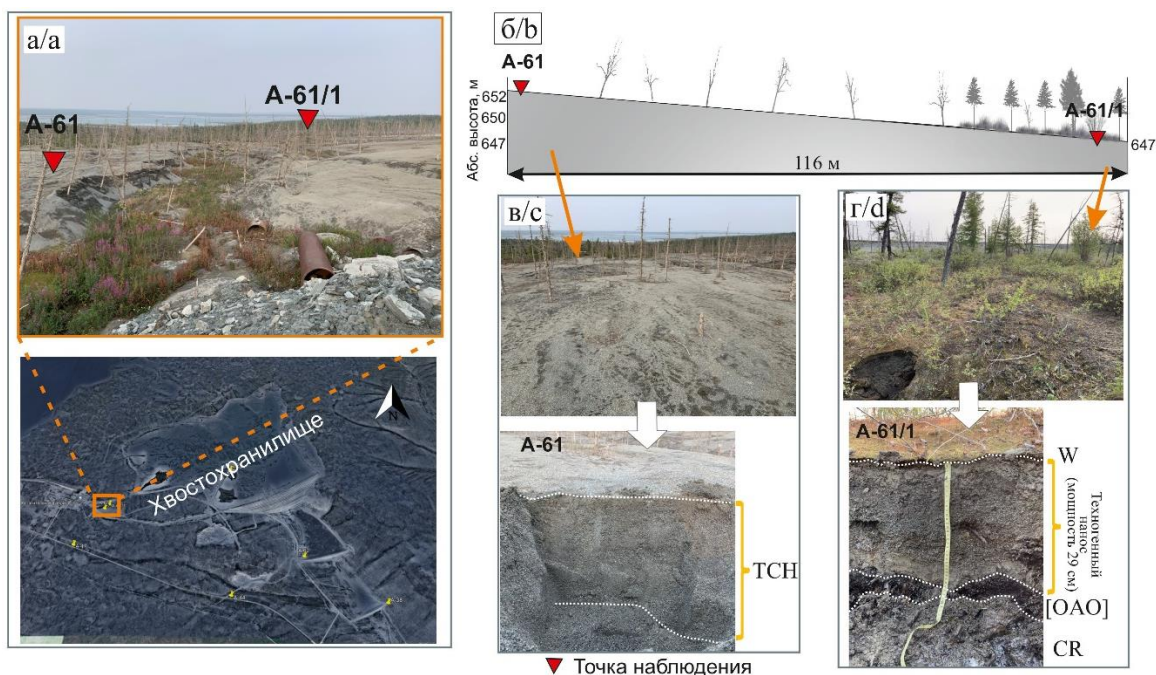


Рис. 2. Почвенный покров в зоне воздействия хвостохранилищ АГОК: (а) космоснимок с общим видом хвостохранилища ОФ № 14 и выделенным участком опробования по линии А-61–А61/1; (б) геоморфологический профиль участка по линии А-61–А61/1; (в) фото участка опробования т.н. А-61 – «свежий» нанос кимберлитового песка в результате аварийного разрыва пульповода и вертикальный профиль разреза; (г) участок опробования в т.н. А61/1 – «старый» нанос с признаками начальной стадии восстановления напочвенного покрова и вертикальный профиль разреза

Fig. 2. Soil cover in the impact area of the AMPP tailings dumps: (a) satellite image of a general view of the tailings storage facility of ore-processing plant no. 14; (b) geomorphological profile of the area along the A-61–А61/1 line; (c) image of the A-61 observation point – “fresh” kimberlite sand overburden resulting from an emergency rupture of the slurry pipeline, with a vertical section profile; (d) sampling site at the A-61/1 observation point – “old” sediment, showing signs of the initial restoration of the soil cover, with a vertical section profile

Литостраты на территории исследований представлены рыхлым, преимущественно супесчаным хорошо выветрелым материалом, в профиле отмечаются признаки первичного почвообразования в виде тонкого (до 1 см) темноокрашенного органического горизонта и наличием рудеральной растительности на поверхности. В водорастворимом комплексе наблюдается резкое увеличение ионов кальция, сульфатов и суммы натрия и калия. Литостраты, как правило, характеризуются сульфатным, хлоридно-сульфатным типом засоления слабой степени – 68 % образцов от общей выборки литостратов засолены.

Токсилитостраты состоят из крупнозернистого кимберлитового песка отработанной пульпы, выявлено присутствие органического вещества, характеризуются щелочным pH, увеличением содержания всех ионов, в особенности сульфатов, кальция, натрия и калия. Засолены 93 % образцов, преобладает хлоридно-сульфатное, реже сульфатно-хлоридное и хлоридное засоление от слабой до средней степени.

Солевой профиль почв промышленной площадки резко отличается от профиля почв природных ландшафтов (рис. 3). В почвах промышленной

площадки наблюдается несколько горизонтов аккумуляции солей – в поверхностном горизонте, погребенных органогенных горизонтах (в случае их наличия) и в надмерзлотном. Солевой профиль – это динамичная система, аккумуляция солей зависит главным образом от атмосферных осадков, их количества и продолжительности засушливых промежутков. Соли мигрируют в нижние горизонты вместе с нисходящими токами влаги и подтягиваются к верхним в период засухи.

Анализ токсичных солей

Анализ качественного содержания солей показал, что соли Na_2SO_4 и MgCl_2 присутствуют во всех засоленных образцах рассматриваемых почв и грунтов, но наибольшая концентрация Na_2SO_4 наблюдается в почвах под воздействием отвалов, а солей MgCl_2 – в токсилитостратах и почвах под воздействием хвостохранилищ (табл. 3). Примечательно, что значения общей концентрации солей в источниках воздействия и почвах под их воздействием («литостраты–почвы под воздействием отвалов» и «токсилитостраты–почвы под воздействием хвостохранилищ») практически равнотенны.

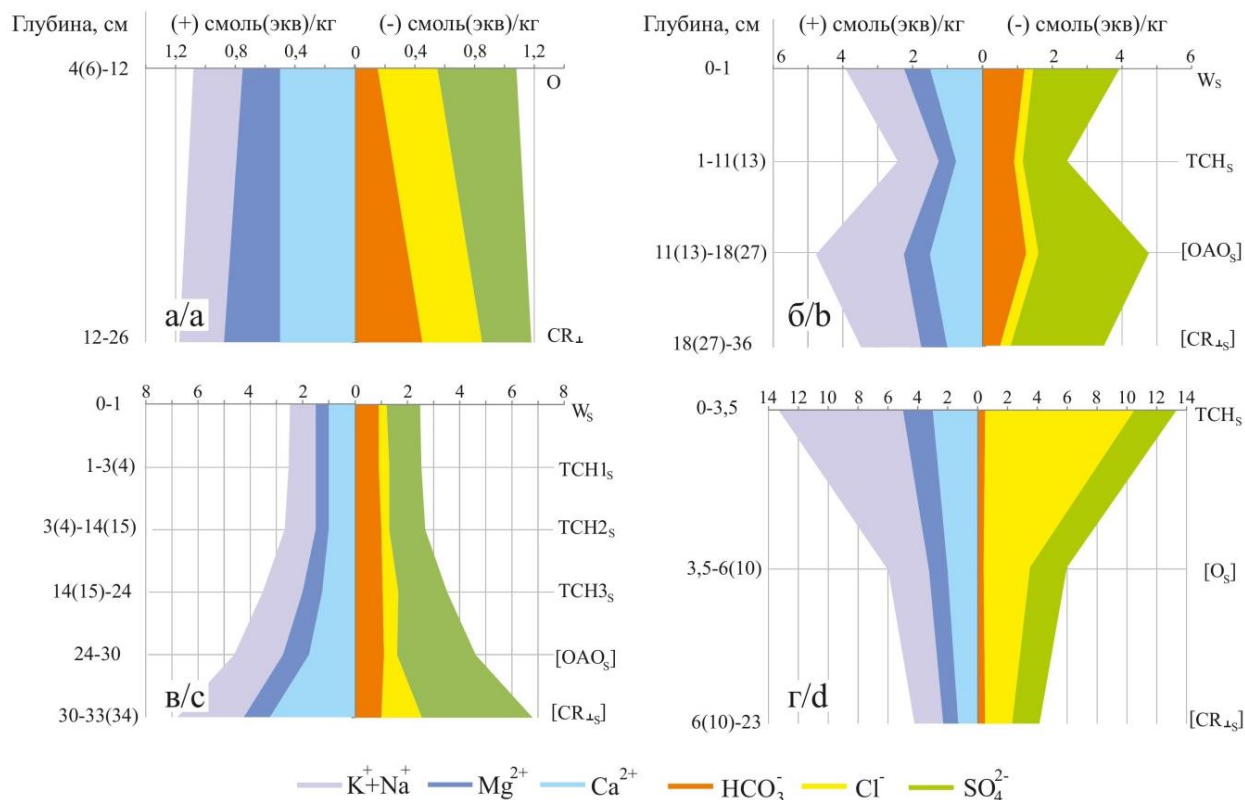


Рис. 3. Солевые профили почв промышленной площадки АГОК (а – фоновая почва; б–г – антропогенно-преобразованные почвы): а) не засоленный; б) сульфатный тип средней степени засоления; в) хлоридно-сульфатный тип средней степени засоления; г) хлоридный тип засоления с вариациями от очень сильной степени с поверхности до средней и слабой – в нижних горизонтах

Fig. 3. Salt profiles of soils of the AMPP industrial site (a – background soil; b–g – anthropogenically transformed soils): a) nonsaline soil; b) sulfate type of medium degree of salinity; c) chloride-sulfate type of medium salinity; d) chloride type of salinization with variations from a very strong degree on the surface to medium and slight – in the lower horizons

Максимальная концентрация солей NaCl отмечается в почвах под воздействием хвостохранилищ и в токсилитостратах. Концентрация солей $MgSO_4$ и их встречаемость имеют практически одинаковое значение во всех рассматриваемых типах почв, но в литостратах сульфаты магния встречаются в два раза чаще, чем в других образцах (94,1 %). Соли

$NaHCO_3$ проявляются единично, $CaCl_2$ в рассматриваемых почвах промплощадки отсутствует.

По значениям суммы токсичных солей ($S_{токс.}$, %) типы почв располагаются в порядке убывания: почвы под воздействием хвостохранилищ > токсилитостраты > почвы под воздействием отвалов > литостраты > почвы природных ландшафтов.

Таблица 3. Среднее содержание токсичных солей в почвенном покрове промышленной площадки АГОК

Table 3. Average content of toxic salts in the soil cover of the AMPP industrial site

Объект/Object	$NaHCO_3$	Na_2SO_4	$NaCl$	$MgSO_4$	$MgCl_2$	Доля т.с., % Proportion of t.s., %	$S_{токс.}$, %
Почвы под воздействием отвалов Soils affected by waste rock dumps, n=17	0,17* (11,8)	3,04 (100)	0,53 (29,4)	0,43 (52,9)	0,82 (100)	72,3	0,14
Литостраты/Litostrats, n=25	0 (0)	2,66 (100)	0,1 (5,9)	0,68 (94,1)	0,80 (100)	58,9	0,13
Почвы под воздействием хвостохранилищ Soils affected by tailing dumps, n=19	0,8 (5,3)	2,15 (100)	2,43 (52,6)	0,54 (47,4)	1,54 (100)	64,1	0,18
Токсилитостраты Toxilitostrats, n=15	0 (0)	2,88 (100)	1,01 (40,0)	0,53 (53,3)	1,33 (100)	59,9	0,16

Примечание: содержание солей в смоль(экв)/кг; в скобках – коэффициент встречаемости (Hi) в засоленных образцах, %; т.с. – токсичные соли.

Note: salt content in cmol(eq)/kg; in brackets – frequency index (Hi) in salinized samples, %; t.s. – toxic salts.

Рассматривая источники воздействия в виде отвалов и хвостохранилищ, отмечается следующая закономерность: в почвах в зоне воздействия объектов алмазодобычи содержание $S_{\text{токс}}$ выше, чем в техногенно-поверхностных образованиях в виде литостратов и токсилитостратов. Что, на наш взгляд, можно объяснить более высокой сорбционной способностью почвенного материала, чем ТПО, более высоким содержанием почвенного органического вещества.

Степень зависимости между $S_{\text{токс}}$ и вариациями токсичных ионов в разных типах почв рассмотрены с помощью корреляционного анализа с применением непараметрического коэффициента Спирмена. Сильная положительная корреляционная связь в почвах, находящихся под воздействием отвалов, с $S_{\text{токс}}$ наблюдается у токсичных ионов SO_4^{2-} ($\rho=0,93$) и Na^+ ($\rho=0,92$). В литостратах достоверная корреляция $S_{\text{токс}}$ наблюдается у токсичных ионов SO_4^{2-} ($\rho=0,97$), Mg^{2+} ($\rho=0,83$) и Na^+ ($\rho=0,97$). Эти же ионы имеют положительную корреляцию со степенью засоления в литостратах (коэффициент корреляции равен 0,65, 0,71 и 0,70 соответственно). Корреляция хлоридов в литостратах со степенью засоления отсутствует ($\rho=0,1$). В почвах под воздействием хвостохранилищ $S_{\text{токс}}$ коррелирует со значениями токсичных ионов Mg^{2+} ($\rho=0,91$), Na^+ ($\rho=0,98$) и Cl^- ($\rho=0,85$). Эти же ионы имеют высокую корреляцию со степенью засоления ($\rho=0,82$, 0,76 и 0,89 соответственно). В токсилитостратах наблюдается корреляция $S_{\text{токс}}$ с SO_4^{2-} ($\rho=0,57$) и Na^+ ($\rho=0,93$). Но со степенью засоления положительную корреляцию имеют ионы токсичного натрия ($\rho=0,57$) и хлориды ($\rho=0,73$).

Общая диаграмма рассеяния суммы токсичных солей относительно токсичных катионов Na^+ , Mg^{2+} и анионов SO_4^{2-} и Cl^- приведена для каждого выделенного типа почв (рис. 4).

В целом источником засоления почв выступают наземные хранилища. В почвах под воздействием хвостохранилищ с увеличением токсичных ионов магния, натрия и хлора растет сумма токсичных солей и степень засоления. В токсилитостратах с увеличением ионов натрия и токсичных сульфатов растет сумма токсичных солей, но только с увеличением хлоридов увеличивается степень засоления. Это связано с тем, что хлориды имеют низкий порог токсичности. При расчетах в количественном значении хлориды могут быть незначительны в составе суммы токсичных солей, но за счет своей токсичности они вызывают рост общей степени засоления. Повышение содержания токсичных хлоридов преимущественно в зоне воздействия

хвостохранилищ обусловлено утилизацией высокоминерализованных рассолов в хвостохранилища.

Увеличение суммы токсичных солей в почвах под воздействием отвалов, как и в литостратах, связано с увеличением содержания ионов натрия и сульфатов. С увеличением токсичных ионов SO_4^{2-} и Na^+ растет и степень засоления. Первичный вещественный состав отвалов промышленной площадки АГОК разнообразен и отражает геологию слагающих пород, представленных глинистыми и алевролитистыми доломитами кембрия, оолитовыми и псевдооолитовыми доломитами, водорослевыми известняками, песчаниками и мергелями с гипсом ордовика, детритовыми и органо-детритовыми известняками силура, и пермь-триасовыми долеритовыми силлами.

Как любая природная система стремится к равновесию, так и минералы и горные породы в отвалах, которые изначально сформированы в других условиях и на протяжении длительного времени находились на глубине несколько сотен метров, при попадании на земную поверхность – в зону гипергенеза – становятся неустойчивыми и под воздействием экзогенных факторов выщелачиваются, и с поверхностными, фильтрационными стоками и воздушными потоками мигрируют в подчиненные формы рельефа, просачиваясь в почвы, являющиеся депонирующей средой, тем самым образуя новые соединения и трансформируя естественный почвенный водорастворимый комплекс.

Для сравнения отобраны и проанализированы образцы дезинтегрированных пород с отвалов трубки «Юбилейная», представляющие собой промежуточную стадию от исходной твердой породы к материалу, впоследствии являющемуся основой состава литостратов с признаками первичного почвообразования: образец 922 (рис. 5, а) – коричнево-бурый, рассыпчатый, мелкозернистой структуры; 923 (рис. 5, б) – серо-коричневый, рассыпчатый пластинчатой структуры и 924 (рис. 5, в) – сизовато-серый, пылеватый.

Катионно-анионный состав пород представлен в табл. 4. Образцы характеризуются от кислой до сильнощелочной pH, большим количеством магния, натрия и сульфатов по отношению к почвам природных ландшафтов и слабой, средней степенью сульфатного, хлоридно-сульфатного засоления. В образцах присутствуют такие токсичные соли, как Na_2SO_4 , MgSO_4 и MgCl_2 . Концентрация солей сульфатов выше средних содержаний их в литостратах и почвах, находящихся под воздействием отвалов пустых пород, содержание MgCl_2 равно средней их концентрации. Соли NaCl в трех образцах отсутствуют.

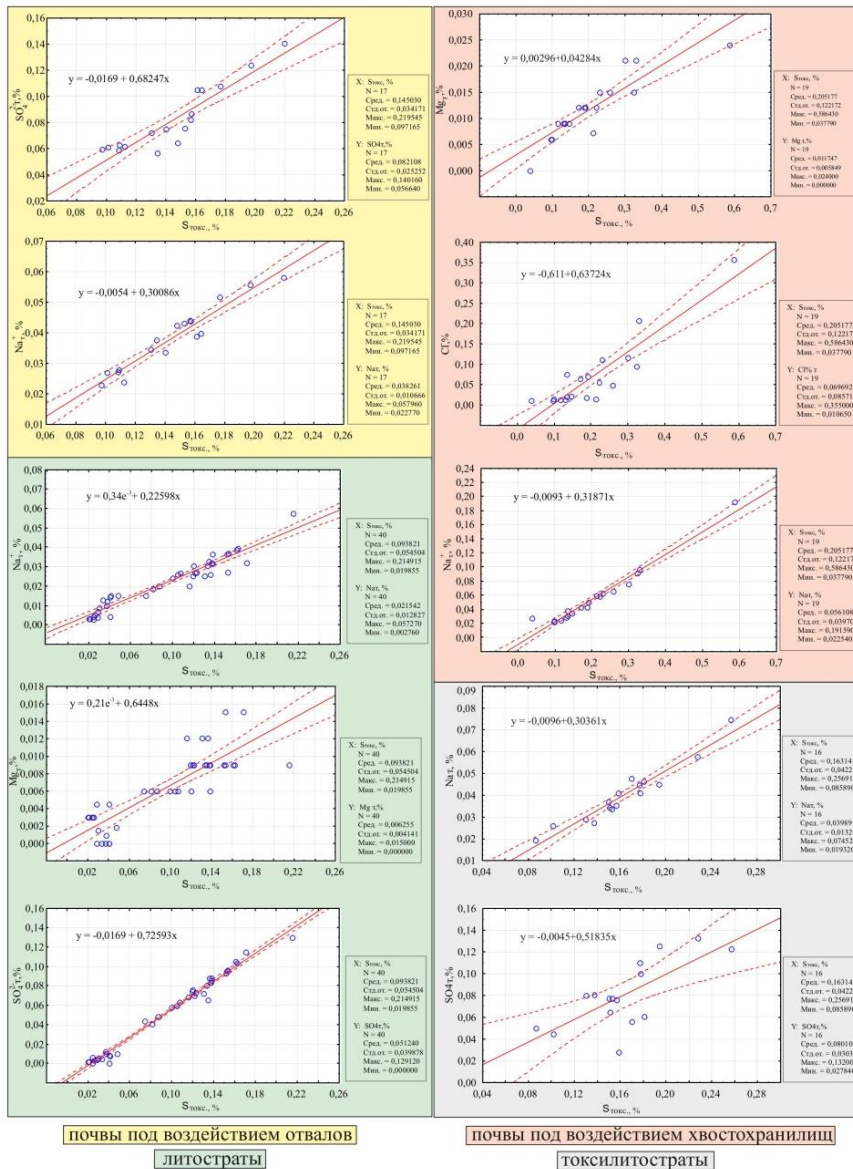


Рис. 4. Диаграмма рассеяния значений суммы токсичных солей ($S_{токс}$) относительно токсичных ионов
Fig. 4. Scatter diagram of the values of the toxic salts total (S_{tox}) relatively to toxic ions

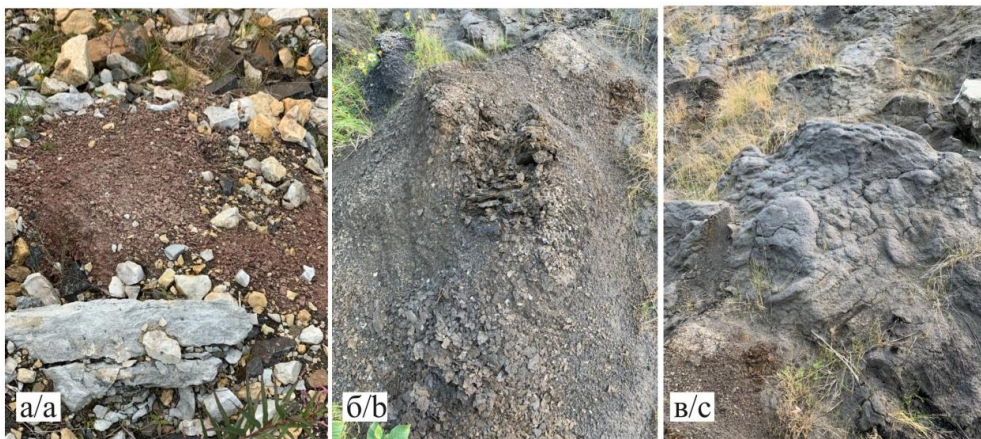


Рис. 5. Дезинтегрированные породы отвалов трубки «Юбилейная»: а) образец 922; б) образец 923; в) образец 924
Fig. 5. Disintegrated rocks from the «Yubileinaya» pipe dumps: а) sample 922; б) sample 923; в) sample 924

Таблица 4. Катионно-анионный состав осадочных пород, претерпевших изменения

Table 4. Cationic-anion composition of altered sedimentary rocks

Образец Sample	pH _{H2O}	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	MgCl ₂	S _{токс.}	Доля т.с. Proportion of t.s.
		смоль(экв)/кг / cmol(eq)/kg										%
922	8,9	0,6	0,40	2,2	1,0	0,75	1,43	2,86	0,70	0,8	0,14	68,6
923	8,9	0,25	0,40	13,8	8,0	2,75	3,73	7,46	4,70	0,8	0,42	44,8
924	4,0	0,3	0,45	9,1	5,25	2,0	2,63	5,26	3,10	0,9	0,30	46,9

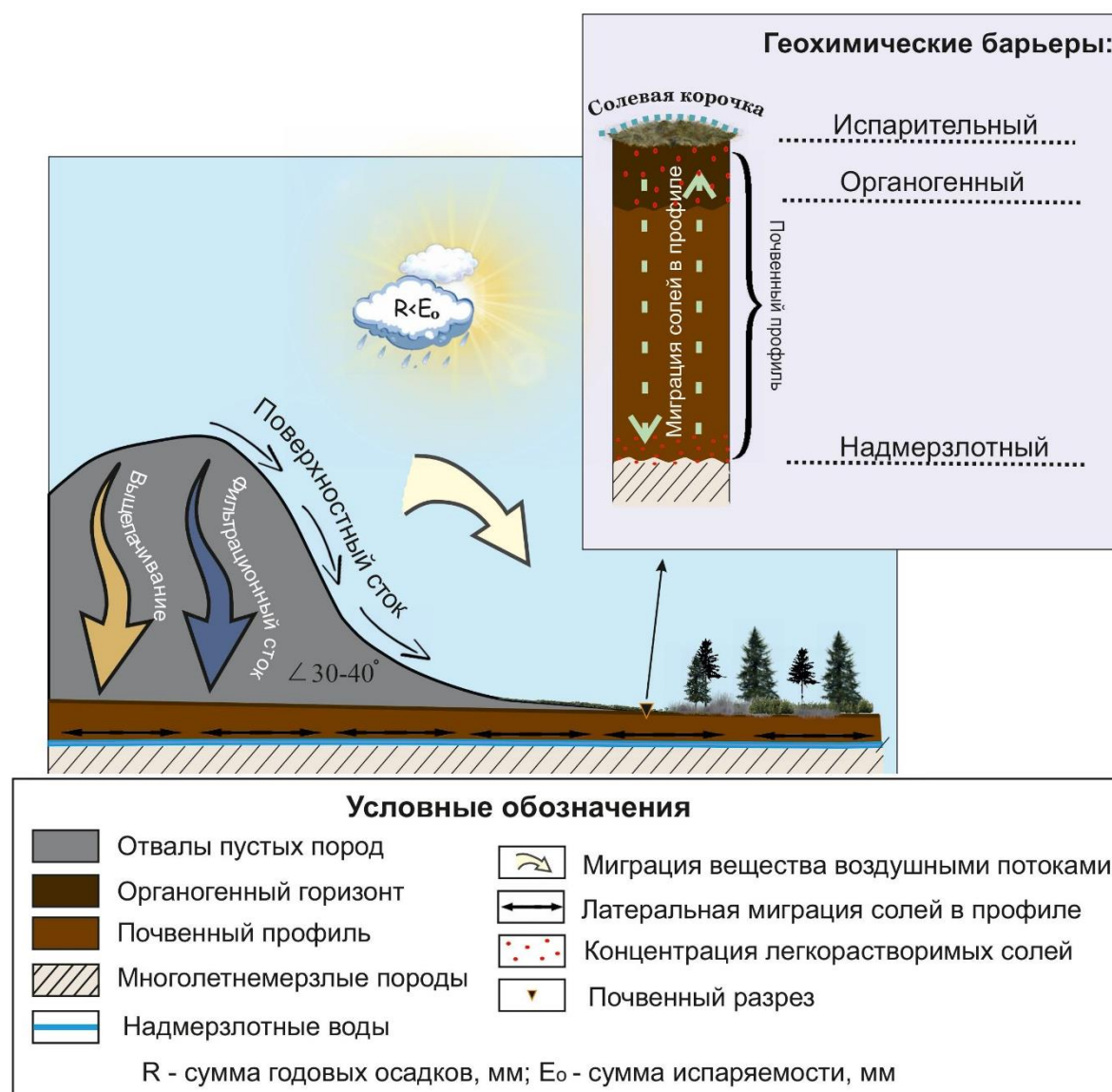


Рис. 6. Схема миграции солей в зоне воздействия отвалов пустых пород

Fig. 6. Scheme of salts migration in the impact zone of waste rock dumps

Следовательно, содержание токсичных солей в литостратах идентично катионно-анионному составу пород отвалов, что в целом приводит к мысли о преимущественном влиянии отвалов пустых пород на содержание и состав S_{токс.}

Схема миграции солей в зоне воздействия отвалов пустых пород на территории промышленной

площадки представлена на рис. 6. С фильтрационными и поверхностными стоками в почвы с ненарушенным профилем из отвалов попадают водорастворимые соли, которые мигрируют вниз по почвенному профилю до водоупора в виде мерзлоты.

Далее в засушливые периоды с восходящими токами соли мигрируют вверх по профилю. При

этом наблюдается аккумуляция солей в верхнем горизонте, который служит испарительным барьером, и в гумусовом, являющимся органогенным барьером. В случае формирования антропогенно-преобразованных почв, в результате погребения и эволюции почв во времени, в почвенном профиле могут образовываться несколько гумусовых горизонтов, каждый из которых будет выступать в качестве биогенного барьера.

При воздействии хвостохранилищ схема аналогична за исключением того, что хвостохранилища, как правило, в отличие от отвалов, располагаются в пониженных формах рельефа и тем самым исключают погребение близлежащих почв, но, как мы видим на примере разреза А-61/1 (рис. 2), погребение также возможно при аварийных прорывах трубопроводов.

Таким образом, на территории исследования в почвах импактной зоны формируются три геохимических барьера, характеризующих аккумуляцию солей: испарительный, органогенный и надмерзлотный.

Формирование засоленных почв отмечается и в пониженных элементах рельефа. Так, на берегу рек Марха и Сохсолох происходит аккумуляция солей с выходом солевых корочек на поверхности почв. Проявление солей обусловлено воздействием промышленных объектов ГОК, откуда соли выщелачиваются в почвы отрицательных форм рельефа сопредельных ландшафтов. Вектор миграции имеет латеральную направленность по поверхности почв и в надмерзлотном горизонте.

В почвах низин с признаками техногенного воздействия в условиях бугорковато-западинного микрорельефа атмосферные осадки накапливаются в понижениях, способствуя более сильному увлажнению почв в западинках, что, как правило, сопровождается вымыванием солей из верхних горизонтов почв. А на повышенных участках микрорельефа – бугорках – почвы иссушаются с поверхности и соли подтягиваются в верхние горизонты. Подобная модель поведения солей наблюдается на участ-

ках с четко выраженными признаками внешнего воздействия, например, в автомобильной колее при подъезде к речному берегу (рис. 7). Почвы на таких участках характеризуются сульфатным, хлоридно-сульфатным и сульфатно-хлоридным типом от слабой до средней степени засоления.

Отмеченное засоление является результатом совокупного воздействия вышеописанного механизма аккумуляции и периодических сбросов сточных и дренажных вод с маневровой емкости хвостохранилища I–II очереди обогатительной фабрики № 8 АГОК [54–56] в р. Сохсолох, где в водах р. Сохсолох, согласно последнему Госдокладу о состоянии и охране окружающей среды РС (Я), фиксируется повышенное до 5 раз относительно ПДК рыбохозяйственных объектов содержание сульфат-ионов. Все проведенные исследования позволяют сделать вывод, что пространственное распределение повышенных значений $S_{\text{токс}}$ в почвах промышленной площадки (рис. 8, б) и степень засоления (рис. 8, а) почв характеризуются площадным распространением. При этом можно отметить общие очаги возникновения – это отвалы пустых пород и хвостохранилища.

В почвенном покрове вблизи отвалов пустых пород фиксируется преимущественно сульфатное засоление, а в почвах около хвостохранилищ появляется хлоридное, сульфатно-хлоридное засоление. Отвалы пустых пород имеют разнообразный состав, но основная их масса представлена доломитами, доломитизированными известняками, песчаниками, туфами и туфопесчаниками, которые под воздействием окружающей среды разрушаются, и в результате выветривания со стоками в почвы сопряженных территорий из отвалов попадают водорастворимые соли. Помимо этого, в отвалы пустых пород выгружаются и породы, пропитанные высокоминерализованными межмерзлотными водами. Следовательно отвалы пустых пород являются одним из источников засоления, а основными токсичными солями, вызывающими засоление почв в зоне воздействия отвалов, выступают Na_2SO_4 , MgSO_4 и MgCl_2 .



Рис. 7. Выступы солей на берегах рек: а) р. Марха; б) р. Сохсолох
Fig. 7. Salt outcrops on river banks: а) Markha River; б) Sokhsolokh River

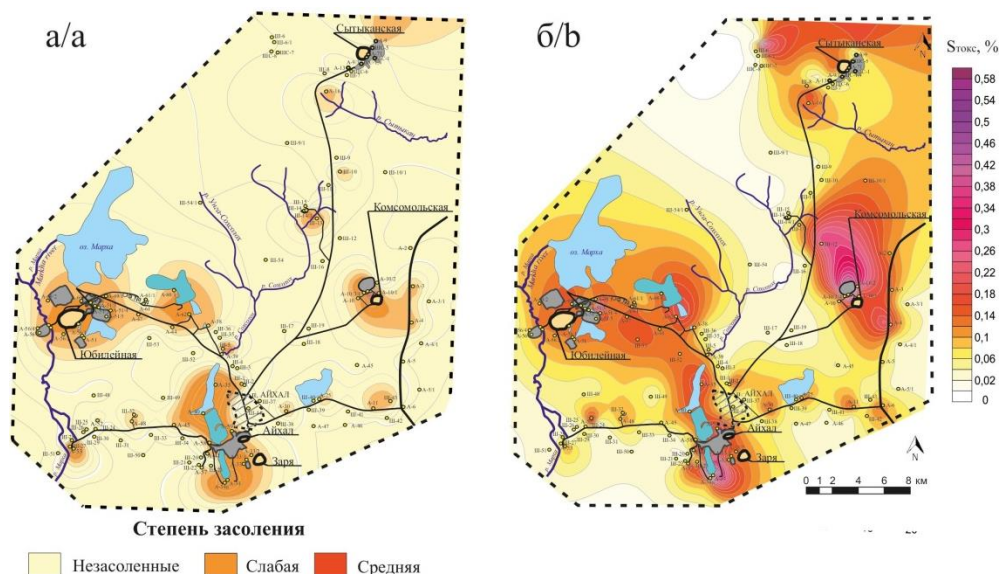


Рис. 8. Схема пространственного распространения засоления (а) и суммы токсичных солей (б) в почвах промышленной площадки АГОК

Fig. 8. Spatial distribution of salinization (a) and toxic salts totals (b) in soils of the AMPP industrial site

Хвостохранилища исследуемой территории относятся к гидротехническим сооружениям I (чрезвычайно высокий), II (высокий) класса опасности [57]. В зоне воздействия хвостохранилищ и при аварийных разливах на пульповодах на территории промышленной площадки формируется хлоридное, сульфатно-хлоридное засоление. В результате алмазодобычи в хвостохранилища складировать отработанную кимберлитовую пульпу, помимо которой в хвостохранилища также поступают рассолы с минерализацией до 60 г/л [58]. Поэтому хвостохранилища также являются источником хлоридов в почвах. В зоне воздействия хвостохранилищ в почвах образуются Na_2SO_4 , NaCl , MgSO_4 и MgCl_2 . Концентрация и встречаемость хлоридов натрия и магния в хвостохранилищах и почвах под их воздействием в два раза выше, чем в литостратах и почвах под воздействием отвалов.

Дальнейшие работы на территории Алакит-Мархинского кимберлитового поля связаны с увеличением глубины отработки трубки «Айхал» до 1100 м, для трубки «Юбилейная» – до 1500 м (при переходе на подземную отработку) и до 900 м (при комбинированной отработке), что непосредственно будет сопровождаться увеличением вскрышных пород и вскрытием межмерзлотных и подмерзлотных вод. Это повлечет увеличение притока высокоминерализованных рассолов с текущих 120–150 до 430 м³/сут на трубке «Айхал» и с 10–20 до 1000 м³/сут на трубке «Юбилейная» [44]. Согласно прогнозам в ближайшие 10 лет суммарный объем слабоминерализованных вод с минерализацией 4–15 г/л на АГОК составит ≈13 млн м³ [47]. При сохранении нынешней тенденции суммы токсич-

ных солей в почвах импактной зоны АГОК и общего соленакопления произойдет увеличение как площади, так и степени засоления почв. А специфика природных условий в виде наличия ММП, препятствующей вымыванию солей из почвенного профиля, и прогрессирующая аридизация климата приведут к увеличению концентрации суммы токсичных солей и площади почв, затронутых процессами техногенного засоления.

Выводы

В результате распределения вещества в пространстве в геохимически подчиненных формах рельефа накапливаются токсичные соли и формируются засоленные почвы. Наличие многолетне-мерзлых пород, которые служат водоупором, препятствует вымыванию солей из почвенного профиля, а повышение аридизации климата способствует аккумуляции солей преимущественно в верхних горизонтах почв.

В результате алмазодобычи в зонах воздействия промышленных объектов в условиях северотаежных ландшафтов формируются засоленные почвы, и этот процесс приобретает масштабный характер. В зоне воздействия отвалов пустых пород преобладает сульфатное засоление, вызванное токсичными солями Na_2SO_4 , MgSO_4 и MgCl_2 . В зоне воздействия хвостохранилищ увеличивается доля хлоридного засоления, в почвах помимо солей Na_2SO_4 , MgSO_4 и MgCl_2 появляется NaCl . Различие в составе токсичных солей отражает характер техногенного воздействия.

Почвенный профиль техногенно засоленных почв характеризуется наличием 1, 2 или 3 геохими-

ческих барьеров, что отображает специфику процессов засоления на территории исследования.

Таким образом, в условиях северотаежных ландшафтов на территории сплошного распространения многолетнемерзлых пород в Западной Якутии

в результате техногенного воздействия в условиях изменения климата происходит накопление токсичных солей без выноса из профиля, что требует специального подхода в решении вопросов дальнейшей эксплуатации и подбора способов ремедиации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Munns R. Comparative physiology of salt and water stress // *Plant, Cell & Environment*. – 2002. – Vol. 25 (2). – P. 239–250. DOI: 10.1046/j.0016-8025.2001.00808.x.
2. Chu L., Kang Y., Wan S. Effect of different water application intensity and irrigation amount treatments of microirrigation on soil-leaching coastal saline soils of North China // *Journal of Integrative Agriculture*. – 2016. – Vol. 15 (9). – P. 2123–2131. DOI: 10.1016/S2095-3119(15)61263-1.
3. Salt-affected soils of the coastal plains in Rio Grande do Sul, Brazil / L.G.D.O. Denardin, F.D.C. Carmona, T. Tiecher, A.P. Martins, L.A. Alves, E.J. Weber, I. Anghinoni // *Geoderma regional*. – 2018. – Vol. 14. – P. e00186. DOI: 10.1016/j.geodrs.2018.e00186.
4. Composition, seasonal variation, and salinization characteristics of soil salinity in the Chenier Island of the Yellow River Delta / Zh. Fu, P. Wang, J. Sun, Zh. Lu, H. Yang, J. Liu, J. Xia, T. Li // *Global Ecology and Conservation*. – 2020. – Vol. 24. – P. e01318. DOI: 10.1016/j.gecco.2020.e01318.
5. Global desertification: drivers and feedbacks / P. D'Odorico, A. Bhattachan, K.F. Davis, S. Ravi, C.W. Runyan // *Advances in Water Resources*. – 2013. – Vol. 51. – P. 326–344. DOI: 10.1016/j.advwatres.2012.01.013.
6. Salvati L., Ferrara C. The local-scale impact of soil salinization on the socioeconomic context: an exploratory analysis in Italy // *Catena*. – 2015. – Vol. 127. – P. 312–322. DOI: 10.1016/j.catena.2015.01.008.
7. River basin salinization as a form of aridity / S. Perri, S. Suweis, A. Holmes, P.R. Marpu, D. Entekhabi, A. Molini // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2020. – Vol. 117 (30). – P. 17635–17642. DOI: 10.1073/pnas.2005925117.
8. Yan N., Marschner P. Microbial activity and biomass recover rapidly after leaching of saline soils // *Biology and Fertility of Soils*. – 2013. – Vol. 49. – P. 367–371. DOI: 10.1007/s00374-012-0733-y.
9. Changes in biological and chemical properties of saline soil amended with municipal solid waste compost and chemical fertilizers in a mustard-pearl millet cropping system / M.D. Meena, P.K. Joshi, H.S. Jat., A.R. Chinchmalatpure, B. Narjary, P. Sheoran, D.K. Sharma // *Catena*. – 2016. – Vol. 140. – P. 1–8. DOI: 10.1016/j.catena.2016.01.009.
10. Soil salinity, not plant genotype or geographical distance, shapes soil microbial community of a reed wetland at a fine scale in the yellow river delta / L. Liu, Y. Wu, M. Yin, X. Ma, X. Yu, X. Guo, N. Du, F. Eller, W. Guo // *Science of the Total Environment*. – 2023. – Vol. 856. – P. 159136. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159136.
11. Salinity decreases the contribution of microbial necromass to soil organic carbon pool in arid regions / B. Jia, H. Mao, Y. Liang, J. Chen, L. Jia, M. Zhang, X. Gang Li // *Science of The Total Environment*. – 2024. – Vol. 930. – P. 172786. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.172786.
12. Бактериальные сообщества почв в зоне воздействия солеотвала города Соликамска, Пермский край / А.В. Назаров, Ю.И. Нечаева, Е.С. Корсакова, А.А. Пьянкова, Е.Г. Плотникова // *Почвоведение*. – 2024. – № 8. – С. 1114–1124. DOI: 10.31857/S0032180X24080066.
13. Contrasting effects of aridity and seasonality on global salinization / S. Perri, A. Molini, L.O. Hedin, A. Porporato // *Nature Geoscience*. – 2022. – Vol. 15. – P. 375–381. DOI: 10.1038/s41561-022-00931-4.
14. Shorki N., Hassani A., Sahimi M. Multi-scale soil salinization dynamics from global to pore scale: a review // *Reviews of Geophysics*. – 2024. – Vol. 62 (4). – e2023RG000804. DOI: 10.1029/2023RG000804.
15. Multiple stressors affecting microbial decomposer and litter decomposition in restored urban streams: Assessing effects of salinization, increased temperature, and reduced flow velocity in a field mesocosm experiment / G.M. David, I.M. Pimente, Ph.M. Rehsen, A.-M. Vermiert, F. Leese, M.O. Gessner // *Science of The Total Environment*. – 2024. – Vol. 943. – P. 173669. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173669.
16. Панкова Е.И., Горохова И.Н. Анализ сведений о площади засоленных почв России на конец XX и начало XXI веков // *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева*. – 2020. – № 103. – С. 5–33. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-5-33.
17. Castro F.C., Araújo J.F., Dos Santos A.M. Susceptibility to soil salinization in the quilombola community of Cupira – Santa Maria da Boa Vista – Pernambuco – Brazil // *Catena*. – 2019. – Vol. 179. – P. 175–183. DOI: 10.1016/j.catena.2019.04.005.
18. Ramos T.B., Gonçalves M.C., Van Genuchten M.Th. Soil salinization in Portugal: an in-depth exploration of impact, advancements, and future considerations // *Vadose Zone Journal*. – 2024. – Vol. 23 (4). – E20314. DOI: 10.1002/vzj2.20314.
19. Борисочкина Т.И., Когут Б.М., Хаматнуров Ш.А. Эколого-геохимическое состояние почв и грунтов зеленых насаждений Москвы (аналитический обзор) // *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева*. – 2021. – № 109. – С. 129–164. DOI: 10.19047/0136-1694-2021-109-129-164.
20. Барсуков П.А., Русалимова О.А. Влияние противогололёдных реагентов на свойства почв придорожных газонов г. Новосибирска // *Почвы и окружающая среда*. – 2024. – Т. 7. – № 2. DOI: 10.31251/pos.v7i2.265.
21. Baraza T., Cassidy K.J., Hasenmuer E.A. Road salt applications mobilize trace elements from roadside soil to shallow groundwater // *Science of The Total Environment*. – 2024. – Vol. 942. – P. 173435. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173435.
22. Spatial, temporal, and biological factors influencing plant responses to deicing salt in roadside bioinfiltration basins / J.S. Caplan, A.B. Salisbury, E.R. McKenzie, A. Behbahani, S.W. Eisenman // *Journal of Environmental Management*. – 2024. – Vol. 359. – P. 120761. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120761.
23. Хайрулина Е.А. Техногенная трансформация ландшафтно-геохимических процессов в районе добычи калийно-магниевых солей // *Теоретическая и прикладная экология*. – 2014. – № 3. – С. 41–45.

24. Environmental aspects of potash mining: a case study of the Verkhnekamskoe Potash Deposit / E. Ushakova, A. Perevoshchikova, E. Menshikova, E. Khayrulina, R. Perevoshchikov, P. Belkin // Mining. – 2023. – Vol. 3. – P. 176–204. DOI: 10.3390/mining3020011.
25. Управление отходами калийных горнодобывающих предприятий / А.А. Перевощикова, Р.Д. Перевощиков, Е.Е. Малышкина, Н.В. Митракова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 1. – С. 19–35. DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4387.
26. Почвенно-геохимическая оценка территории, прилегающей к Кучукскому месторождению солей (Алтайский край) / Ю.В. Симонова, О.Р. Жунусова, М.В. Чарыкова, Г.А. Касаткина // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. – 2024. – Т. 69. – Вып. 1. – С. 185–212. DOI: 10.21638/spbu07.2024.110.
27. Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. – 376 с.
28. Современное состояние земель, загрязненных нефтью при аварийных разливах, на территории Иркутской области / Т.Е. Афонина, В.Ю. Гребенщиков, А.Ю. Пузырева, М.А. Оширова, С.Л. Белопухов // Природообустройство. – 2015. – № 5. – С. 88–94.
29. Белозерцева И.А. Интегральная оценка экологического состояния почвенного покрова при добыче газа в Среднем Приангарье // Почвоведение. – 2020. – № 2. – С. 244–258. DOI: 10.31857/S0032180X20020021.
30. Двуреченская Е.Б. Техногенный галогенез в торфяных болотных верховых почвах средней тайги Западной Сибири // Географический вестник. – 2020. – № 3 (54). – С. 148–158. DOI: 10.17072/2079-7877-2020-3-148-158.
31. Хотяновская Ю.В., Бузмаков С.А., Кучин Л.С. Геоэкологические закономерности трансформации природной среды при эксплуатации нефтяного месторождения в карстовом районе // Географический вестник. – 2023. – № 1 (64). – С. 127–138. DOI: 10.17072/2079-7877-2023-1-127-138.
32. Cook S.V., Chu A., Goodman R.H. Leachability and toxicity of hydrocarbons, metals and salt contamination from flare pit soil // Water, Air and Soil Pollution. – 2002. – Vol. 133. – P. 297–314.
33. Integrated assessment of soil quality and contaminant risks in salinized farmland adjacent to an oil-exploitation zone: insights from the Yellow River Delta / X. Xie, J. Cai, X. Yang, H. Qiu, Y. Liu, Y. Zhang // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – 29369. DOI: 10.1038/s41598-024-80314-4.
34. Geochemical assessments and classification of coal mine spoils for better understanding of potential salinity issues at closure / J.H. Park, X. Li, M. Edraki, T. Baumgartl, B. Kirsch // Environmental Science. Processes & impacts. – 2013. – Vol. 15. – P. 1235–1244. DOI: 10.1039/c3em30672k.
35. Физические и химические свойства почв и техногенных поверхностных образований породных отвалов территорий угледобычи Ростовской области / И.В. Замулина, Т.М. Минкина, Е.Ю. Константинова, Д.Г. Невидомская, Ю.А. Литвинов, С.С. Манджиева, Т.В. Бауэр // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. – 2024. – Т. 79. – № 4. – С. 157–169. DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-4-157-169.
36. Почвы бассейна Вилюя и их использование / В.Г. Зольников, Л.Г. Еловская, Л.В. Тетерина, Е.И. Черняк / под ред. Н.П. Ремезова – Якутск: Изд-во АН СССР, 1962. – 203 с.
37. Еловская Л.Г., Коноровский А.К., Саввинов Д.Д. Мерзлотные засоленные почвы Центральной Якутии / под ред. Л.Г. Еловской. – М.: Наука, 1966. – 275 с.
38. Иванов Д.В., Толстов А.В., Иванов В.В. Структурно-тектонические критерии поисков кимберлитовых тел в Алакит-Мархинском поле // Руды и металлы. – 2019. – № 2. – С. 55–60. DOI: 10.24411/0869-5997-2019-10014.
39. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. Серия Верхневилуйская. Лист Q-49-XXI, XXII (Айхал). Объяснительная записка / под ред. В.С. Гриненко. – М.: МФ. ВСЕГЕИ, 2013. – 284 с.
40. Ландшафты Якутии / Ю.Г. Данилов, А.Н. Федоров, Ж.Ф. Дегтева, А.Н. Горехов, С.П. Варламов, Ю.А. Мурзин / под ред. Ю.Г. Данилова – Якутск: Изд-во СВФУ, 2016. – 75 с.
41. Лукичева А.Н. Растительность Северо-Запада Якутии и ее связь с геологическим строением местности / под ред. Л.Н. Тюлиной – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 166 с.
42. Шадринова О.В. Анализ климатических факторов в аспекте развития процессов засоления в почвах северотаежных ландшафтов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. – 2024. – № 2. – С. 90–99. DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2024/2/90-99.
43. Янников А.М., Зырянов И.В., Корепанов А.Ю. Гидрогеологическое сопровождение горных работ при отработке кимберлитовых месторождений криолитозоны Западной Якутии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 7. – С. 169–179. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_7_0_169.
44. Дроздов А.В., Мельников А.И. Роль разрывных дислокаций в обводнении алмазодобывающих рудников Якутии // Известия Сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2014. – № 2 – С. 71–81.
45. Янников А.М., Стручкова А.С., Овчинникова М.Ю. Перспективы использования силурийских карбонатных толщ Алакит-Мархинского кимберлитового поля для закачки дренажных вод // Вестник Пермского университета. Геология. – 2023. – Т. 22. – № 2. – С. 107–120. DOI: 10.17072/psu.geol.21.2.107.
46. Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. – Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2008. – 507 с.
47. Перспективы использования глубокозалегающих водоносных горизонтов для закачки слабоминерализованных вод / А.М. Янников, С.А. Янникова, И.В. Зырянов, А.Ю. Корепанов // Горная промышленность. – 2022. – № 1. – С. 76–81. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1-76-81.
48. Классификация и диагностика почв России / Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. – Смоленск: Ойкумена, 2004. – 342 с.
49. Иванников Ф.А., Прокофьева Т.В. Техногенные почвоподобные тела речной долины и их трансформация в условиях города (на примере долины р. Москвы) // Вестник Московского Университета. Серия 17. Почвоведение. – 2010. – № 4. – С. 10–15.
50. Антропогенные почвы / М.И. Герасимова, М.Н. Строганова, Н.В. Можарова, Т.В. Прокофьева. 2-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во Юрайт, 2019. – 237 с.

51. 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. Коллективная монография / под. ред. Э.Н. Молчанова. – М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2013. – 756 с.
52. Воробьева Г.А., Киселева Н.Д. Морфоаналитическая диагностика почв. Имитационно-обучающий тренинг по интерпретации результатов исследования почв. – Иркутск: Иркутский государственный университет, 2023. – 145 с.
53. Легостаева Я.Б., Гололобова А.Г. Особенности распределения микроэлементов в почвах фоновых и импактных зон на участках алмазодобычи на северо-западе Сибирской платформы // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 9. – С. 142–153. DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3364.
54. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2021. – Якутск, 2022. – 776 с.
55. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2022. – Якутск, 2023. – 889 с.
56. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2023. – Якутск, 2024. – 966 с.
57. Отчет об устойчивом развитии АЛРОСА. 2023. 170 с. URL: https://www.alrosa.ru/upload/iblock/ee8/ijto4klawmyewhajwfp3u4pni8bthx2/ALROSA_Sustainability%20Report_2023.pdf (дата обращения 14.01.2025).
58. Дроздов А.В. Природные и техногенные резервуары промышленных стоков в криолитозоне (на примере Якутской части Сибирской платформы): монография / под. ред. В.В. Шепелева – Якутск. Издательско-полиграфический комплекс СВФУ, 2011. – 416 с.

Информация об авторах

Олеса Владимировна Шадринова, младший научный сотрудник лаборатории геоэкологии и биогеохимии Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 677000, г. Якутск, пр. Ленина, 39; ovshadrinova@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4541-412X>

Яна Борисовна Легостаева, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геоэкологии и биогеохимии Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 677000, г. Якутск, пр. Ленина, 39; ylego@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1556-9182>

Поступила в редакцию: 11.02.2025

Поступила после рецензирования: 04.03.2025

Принята к публикации: 27.06.2025

REFERENCES

1. Munns R. Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, Cell & Environment*, 2002, vol. 25 (2), pp. 239–250. DOI: 10.1046/j.0016-8025.2001.00808.x.
2. Chu L., Kang Y., Wan S. Effect of different water application intensity and irrigation amount treatments of microirrigation on soil-leaching coastal saline soils of North China. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, vol. 15 (9), pp. 2123–2131. DOI: 10.1016/S2095-3119(15)61263-1.
3. Denardin L.G.D.O., Carmona F.D.C., Tiecher T., Martins A.P., Alves L.A., Weber E.J., Anghinoni I. Salt-affected soils of the coastal plains in Rio Grande do Sul, Brazil. *Geoderma regional*, 2018, vol. 14, e00186. DOI: 10.1016/j.geodrs.2018.e00186.
4. Fu Zh., Wang P., Sun J., Lu Zh., Yang H., Liu J., Xia J., Li T. Composition, seasonal variation, and salinization characteristics of soil salinity in the Chenier Island of the Yellow River Delta. *Global Ecology and Conservation*, 2020, vol. 24, e01318 DOI: 10.1016/j.gecco.2020.e01318.
5. D’Odorico P., Bhattachan A., Davis K.F., Ravi S., Runyan C.W. Global desertification: Drivers and feedbacks. *Advances in Water Resources*, 2013, vol. 51, pp. 326–344. DOI: 10.1016/j.advwatres.2012.01.013.
6. Salvati L., Ferrara C. The local-scale impact of soil salinization on the socioeconomic context: An exploratory analysis in Italy. *Catena*, 2015, vol. 127, pp. 312–322. DOI: 10.1016/j.catena.2015.01.008.
7. Perri S., Suweis S., Holmes A., Marpu P.R., Entekhabi D., Molini A. River basin salinization as a form of aridity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, vol. 117 (30), pp. 17635–17642. DOI: 10.1073/pnas.2005925117.
8. Yan N., Marschner P. Microbial activity and biomass recover rapidly after leaching of saline soils. *Biology and Fertility of Soils*. 2013, vol. 49, pp. 367–371. DOI: 10.1007/s00374-012-0733-y.
9. Meena M.D., Joshi P.K., Jat H.S., Chinchmalatpure A.R., Narjary B., Sheoran P., Sharma D.K. Changes in biological and chemical properties of saline soil amended with municipal solid waste compost and chemical fertilizers in a mustard-pearl millet cropping system. *Catena*, 2016, vol. 140, pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.catena.2016.01.009.
10. Liu L., Wu Y., Yin M., Ma X., Yu X., Guo X., Du N., Eller F., Guo W. Soil salinity, not plant genotype or geographical distance, shapes soil microbial community of a reed wetland at a fine scale in the yellow river delta. *Science of the Total Environment*, 2023, vol. 856, 159136. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159136.
11. Jia B., Mao H., Liang Y., Chen J., Jia L., Zhang M., Li X. Gang. Salinity decreases the contribution of microbial necromass to soil organic carbon pool in arid regions. *Science of The Total Environment*, 2024, vol. 930, 172786. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.172786.
12. Nazarov A.V., Nechaeva Yu.I., Korsakova E.S., Pyankova A.A., Plotnikova E.E. Soil Bacterial Communities in the Zone of Influence of Salt Dump (Solikamsk, Perm Krai). *Eurasian Soil Science*, 2024, vol. 57, no. 8, pp. 1353–1361. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0032180X24080066.
13. Perri S., Molini A., Hedin L.O., Porporato A. Contrasting effects of aridity and seasonality on global salinization. *Nature Geoscience*, 2022, vol. 15, pp. 375–381. DOI: 10.1038/s41561-022-00931-4.

14. Shorki N., Hassani A., Sahimi M. Multi-scale soil salinization dynamics from global to pore scale: a review. *Reviews of Geophysics*, 2024, vol. 62 (4). DOI: 10.1029/2023RG000804.
15. David G.M., Pimente I.M., Rehsen Ph.M., Vermiert A.-M., Leese F., Gessner M.O. Multiple stressors affecting microbial decomposer and litter decomposition in restored urban streams: assessing effects of salinization, increased temperature, and reduced flow velocity in a field mesocosm experiment. *Science of The Total Environment*, 2024, vol. 943, 173669. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173669.
16. Pankova E.I., Gorokhova I.N. Analysis of information about the alkaline soil areas in Russia at the end of the XX and beginning of the XXI centuries. *Byulleten Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva*, 2020, no. 103, pp. 5–33. (In Russ.) DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-5-33.
17. Castro F.C., Araújo J.F., Dos Santos A.M. Susceptibility to soil salinization in the quilombola community of Cupira – Santa Maria da Boa Vista – Pernambuco – Brazil. *Catena*, 2019, vol. 179, pp. 175–183. DOI: 10.1016/j.catena.2019.04.005.
18. Ramos T.B., Gonçalves M.C., Van Genuchten M.Th. Soil salinization in Portugal: an in-depth exploration of impact, advancements, and future considerations. *Vadose Zone Journal*, vol. 23 (4), E20314. DOI: 10.1002/vzj2.20314.
19. Borisochkina T.I., Kogut B.M., Khamanturov Sh.A. Ecological and geochemical state of soils and grounds of Moscow green spaces (analytical review). *Byulleten Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva*, 2021, no. 109, pp. 129–164. (In Russ.) DOI: 10.19047/0136-1694-2021-109-129-164.
20. Barsukov P.A., Rusalimova O.A. The effect of deicing reagents on soil properties of the roadside lawns in Novosibirsk. *The Journal of Soils and Environment*, 2024, vol. 7, no. 2. (In Russ.) DOI: 10.31251/pos.v7i2.265.
21. Baraza T., Cassidy K.J., Hasenmuer E.A. Road salt applications mobilize trace elements from roadside soil to shallow groundwater. *Science of The Total Environment*, 2024, vol. 942, 173435. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173435.
22. Caplan J.S., Salisbury A.B., McKenzie E.R., Behbahani A., Eisenman S.W. Spatial, temporal, and biological factors influencing plant responses to deicing salt in roadside bioinfiltration basins. *Journal of Environmental Management*, 2024, vol. 359, 120761. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120761.
23. Khairulina E.A. Technogenic transformation of landscape-geochemical processes in the area of potassium and magnesium salts mining. *Theoretical and applied ecology*, 2014, no. 3, pp. 41–45. (In Russ.)
24. Ushakova E., Perevoshchikova A., Menshikova E., Khayrulina E., Perevoshchikov R., Belkin P. Environmental aspects of potash mining: a case study of the Verkhnekamskoe Potash Deposit. *Mining*, 2023, vol. 3, pp. 176–204. DOI: 10.3390/mining3020011.
25. Perevoshchikova A.A., Perevoshchikov R.D., Malysheva E.E., Mitrakova N.V. Waste management in potash mining companies. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 1, pp. 19–35. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4387.
26. Simonova Yu.V., Zhunusova O.R., Charykova M.V., Kasatkina G.A. Soil-geochemical assessment of salinization of the territory adjacent to the Kuchuk salt deposit (Altai krai). *Vestnik of Saint-Petersburg University. Earth Sciences*, 2024, vol. 69, no. 1, pp. 185–212. (In Russ.) DOI: 10.21638/spbu07.2024.110.
27. Solntseva N.P. *Oil production and geochemistry represent landscapes*. Moscow, Moscow University Publ., 1998. 376 p. (In Russ.)
28. Afonina T.E., Grebenshchekov V.Yu., Puzyreva A.Yu., Oshirova M.A., Belopukhov S.L. Current state of the lands contaminated with oil in case of accidental spills on the territory of the Irkutsk region. *Prirodoobustroystvo*, 2015, no. 5, pp. 88–94. (In Russ.)
29. Belozertseva I.A. Integral assessment of the soil cover state in gas production area in the middle reaches of the Angara river. *Eurasian Soil Science*, 2020, vol. 53, no. 2, pp. 253–265. DOI: 10.31857/S0032180X20020021.
30. Dvurechenskaya E.B. Halogenesis in oligotrophic soils of the middle taiga of Western Siberia. *Geographical Bulletin*, 2020, no. 3 (54), pp. 148–158. (In Russ.) DOI: 10.17072/2079-7877-2020-3-148-158.
31. Khotyanovskaya Yu.V., Buzmakov S.A., Kuchin L.S. Geoeological regularities of the natural environment transformation during the exploitation of an oil field in a Karst region. *Geographical Bulletin*, 2023, no. 1 (64), pp. 127–138. (In Russ.) DOI: 10.17072/2079-7877-2023-1-127-138.
32. Cook S.V., Chu A., Goodman R.H. Leachability and toxicity of hydrocarbons, metals and salt contamination from flare pit soil. *Water, Air and Soil Pollution*, 2002, vol. 133, pp. 297–314.
33. Xie X., Cai J., Yang X., Qiu H., Liu Y., Zhang Y. Integrated assessment of soil quality and contaminant risks in salinized farmland adjacent to an oil-exploitation zone: insights from the Yellow River Delta. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, 29369. DOI: 10.1038/s41598-024-80314-4.
34. Park J.H., Li X., Edraki M., Baumgartl T., Kirsch B. Geochemical assessments and classification of coal mine spoils for better understanding of potential salinity issues at closure. *Environmental Science. Processes & impacts*, 2013, vol. 15, pp. 1235–1244. DOI: 10.1039/c3em30672k.
35. Zamulina I.V., Minkina T.M., Konstantinova E.Yu., Nevidomskaya D.G., Litvinov Yu.A., Mandzhieva S.S., Bauer T.V. Physical and chemical properties of soils and technogenic surface rock formations in dumps of coal mines in Rostov oblast. *Moscow University Bulletin. Series 17. Soil science*, 2024, vol. 79, no. 4, pp. 157–169. (In Russ.) DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-4-157-169.
36. Zolnikov L.G., Elovskaya L.G., Teterina L.V., Chernyak E.I. *Soils of the Vilyuya basin and their use*. Yakutsk, Academy of Sciences of the USSR Publ., 1962. 203 p. (In Russ.)
37. Elovskaya L.G., Konorovskiy A.K., Savvinov D.D. *Permafrost saline territories of Central Yakutia*. Moscow, Nauka Publ., 1966. 275 p. (In Russ.)
38. Ivanov D.V., Tolstov A.V., Ivanov V.V. Structural and tectonic criteria of search for kimberlite bodies in Alakit-Markha field. *Ores and Metals*, 2019, no. 2, pp. 55–60. (In Russ.) DOI: 10.24411/0869-5997-2019-10014.
39. *State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200000. Verkhnevilyuiskaya series. Sheet Q-49-XXI, XXII (Aikhal). Explanatory note*. Ed. by V.S. Grinenko. Moscow, MF. VSEGEI Publ., 2013. 284 p. (In Russ.)
40. Danilov Yu.G., Fedorov A.N., Degteva Zh.F., Gorokhov A.N., Varlamov S.P., Murzin U.A. *Landscapes of Yakutia*. Yakutsk, NEFU Publ., 2016. 76 p. (In Russ.)

41. Lukicheva A.N. *Vegetation of the North-West of Yakutia and its connection with the geological structure of the area*. Moscow, Academy of Sciences of the USSR Publ., 1963. 166 p. (In Russ.)
42. Shadrinova O.V. Analysis of climatic factors in the aspect of development of salinization processes in soils of the Northern taiga landscapes. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*, 2024, no. 2, pp. 90–99. (In Russ.) DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2024/2/90-99.
43. Yannikov A.M., Zyryanov I.V., Korepanov A.Yu. Hydrogeological supervision of kimberlite mining in permafrost zone in Western Yakutia. *Mining informational and analytical bulletin*, 2024, no. 7, pp. 169–179. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236_1493_2024_7_0_169.
44. Drozdov A.V., Melnikov A.I. Rupture dislocation role in diamond mine water encroachment in Yakutia. *Proceedings of the Siberian Department of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits*, 2014, no. 2, pp. 71–81. (In Russ.)
45. Yannikov A.M., Struchkova A.S., Ovchinnikova M.Yu. Prospects for the use of the silurian carbonate sequences of the Alakit-Markhinskiy kimberlite field for drainage water injection. *Bulletin of Perm University. Geology*, 2023, vol. 22, no. 2, pp. 107–120. (In Russ.) DOI: 10.17072/psu.geol.21.2.107.
46. Drozdov A.V., Iost N.A., Lobanov V.V. *Cryohydrogeology of diamond deposits in Western Yakutia*. Irkutsk, IGTU Publ., 2008. 507 p. (In Russ.)
47. Yannikov A.M., Yannikova S.A., Zyryanov I.V., Korepanov A.Y. Prospects of using deep-lying aquifers for injection of low-mineralized waters. *Russian mining industrial journal*, 2022, no. 1, pp. 76–81. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1-76-81.
48. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. *Classification and diagnostics of soils in Russia*. Smolensk, Oykumena Publ., 2004. 342 p. (In Russ.)
49. Ivannikov F.A., Prokofieva T.V. Properties and evolution of artificial soil-like bodies of moscow-river valley in the urban environment. *Moscow University Bulletin. Series 17. Soil science*, 2010, no. 4, pp. 10–15. (In Russ.)
50. Gerasimova M.I., Stroganova M.N., Mozharova N.V., Prokofeva T.V. *Antropogenic soils [Anthrosol]*. Moscow, Urait Publ., 2020. 237 p. (In Russ.)
51. *Scientific foundations for preventing degradation of soils (lands) of agricultural lands in Russia and the formation of a system for reproducing their fertility in adaptive landscape agriculture. Vol. 1. Theoretical and methodological foundations for preventing degradation of soils (lands) of agricultural lands. Collective monograph*. Moscow, Soil Institute named after V.V. Dokuchaev Russian Agricultural Academy Publ., 2013. 756 p. (In Russ.)
52. Vorobyeva G.A., Kiseleva N.D. *Morphoanalytical diagnostics of soils. Simulation and educational training on interpretation of soil research results*. Irkutsk, Irkutsk State University Publ., 2023. 145 p. (In Russ.)
53. Legostaeva Ya.B., Gololobova A.G. Features of distribution of trace elements in soils of background and impact zones in diamond mining areas in the Northwest of the Siberian platform. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 9, pp. 142–153. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3364.
54. *State report on the state and protection of the environment of the Republic of Sakha (Yakutia) in 2021*. Yakutsk, 2022. 776 p. (In Russ.)
55. *State report on the state and protection of the environment of the Republic of Sakha (Yakutia) in 2022*. Yakutsk, 2023. 889 p. (In Russ.)
56. *State report on the state and protection of the environment of the Republic of Sakha (Yakutia) in 2023*. Yakutsk, 2024. 966 p. (In Russ.)
57. *ALROSA Sustainable Development Report*. 2023. 170 p. Available at: https://www.alrosa.ru/upload/iblock/ee8/ijto4k1atwmyewhajwfp3u4pni8bthx2/ALROSA_Sustainability%20Report_2023.pdf (accessed 14 January 2025).
58. Drozdov A.V. *Natural and man-made reservoirs of industrial wastewater in the permafrost zone (using the example of the Yakut part of the Siberian platform): monograph*. Yakutsk, NEFU Publ., 2011. 416 p. (In Russ.)

Information about the authors

Olesya V. Shadrinova, Junior Researcher, Institute of Geology of Diamond and Precious Metals, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 39, Lenin avenue, Yakutsk, 677000, Russian Federation; ovshadrinova@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4541-412X>

Yana B. Legostaeva, Cand. Sc., Leading Researcher, Institute of Geology of Diamond and Precious Metals, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 39, Lenin avenue, Yakutsk, 677000, Russian Federation; ylego@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1556-9182>

Received: 11.02.2025

Revised: 04.03.2025

Accepted: 27.06.2025