



ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ НА ТЕРРИТОРИИ ПОДЗЕМНЫХ ПОЛИГОНОВ УТИЛИЗАЦИИ ВЫСОКОМИНЕРАЛИЗОВАННЫХ ВОД В ЗАПАДНОЙ ЯКУТИИ

Я.Б. Легостаева, М.И. Ксенофонтова, В.Ф. Попов

**Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск,
Научно-исследовательский институт прикладной экологии Севера Северо-Восточного
Федерального университета М.К. Аммосова, г. Якутск,
Северо-Восточный Федеральный университет М.К. Аммосова, г. Якутск**

Безопасное удаление высокоминерализованных стоков при разработке коренных алмазных месторождений в Западной Якутии является важнейшей задачей обеспечения благоприятной геоэкологической обстановки в регионе. На примере большого экспериментального материала, собранного на территории промышленной площадки Удачнинского горно-обогатительного комбината АК "АЛРОСА" (ПАО), проведена оценка геоэкологической ситуации в районе подземных полигонов захоронения дренажных вод. В условиях сложной и динамичной криогидрогеологической обстановки на фоне увеличения объема поступления вод в горные выработки превышение емкостных возможностей резервуаров хранилищ дренажных рассолов может привести к серьезным геоэкологическим проблемам. Маркерами, идентифицирующими воздействие высокоминерализованных вод на основные абиотические компоненты экосистем региона – почвы, донные отложения и поверхностные воды, являются стронций и литий.

Ключевые слова: геоэкология, промышленные отходы, дренажные стоки, криолитозона, многолетнемерзлые породы

Geoecological Monitoring on the Territory of Underground Disposal Sites of Highly Mineralized Waters in Western Yakutia

Ya.B. Legostaeva, M.I. Ksenofontova, V.F. Popov

**Institute of Geology of Diamond and Precious Metals, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 677980 Yakutsk, Russia,
M.K. Ammosov Research Institute of Applied Ecology of the North of the North-Eastern Federal University, 677000 Yakutsk, Russia,
M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 677000 Yakutsk, Russia**

The safe disposal of highly mineralized runoff in the development of indigenous diamond deposits in Western Yakutia is the most important task of ensuring a favorable geo-ecological situation in the region. Using the example of a large experimental material collected at the industrial site of the Udachninsky mining and processing plant, PJSC ALROSA, the geoecological situation in the area of underground drainage water disposal sites was assessed. Under the conditions of a complex and dynamic cryohydrogeological situation on the background of an increase in the volume of water inflow into the mine workings, the excess of the capacitive capabilities of the reservoirs of the storage tanks of the brine can lead to serious geoecological problems. Markers that identify the effects of highly mineralized water on the main abiotic components of the region's ecosystems – soil, bottom sediments and surface water – are strontium and lithium.

Keywords: geoecology, industrial waste, drainage drains, permafrost, permafrost

DOI: 10.18412/1816-0395-2019-04-58-63

Рациональное освоение многих минерально-сырьевых объектов и образование при этом природно-техногенных систем, где сосуществует комплекс природных и техногенных воздействий, в любом регионе сопряжены с последствиями добычи и переработки сырья, складирования и утилизации отходов. Ситуация усугубляется при об-

воднении горных выработок, что наблюдается, например, на территории Лебединского карьера Курской магнитной аномалии, Коршуновского железорудного месторождения, при разработке угольных месторождений в Кузнецком, Подмосковном, Кизеловском, Печорском бассейнах, месторождений Северо-Уральского бокситового района и др. В

условиях криолитозоны, где в настоящее время сконцентрирована основная часть мировых минерально-сырьевых запасов, в том числе и алмазов, хрупкие северные экосистемы с увеличением потенциала горнодобывающих производств испытывают возрастающий техногенный прессинг, приводящий к необратимым экологическим последствиям. При

этом сложность в эксплуатации крупнейших алмазоносных трубок — это, прежде всего, обводненность рассолами из подмерзлотных высоконапорных водоносных комплексов. С подобными проблемами сталкиваются как в России при разработке кимберлитовых трубок Удачная, Мир, Юбилейная, так и в Канаде при разработке Ekati и Diavik [1–4]. Таким образом, подземные воды, их агрессивный состав, объемы притоков к горным выработкам создают проблемы не только для ведения горно-геологических и добычных работ, но и определяют сложность при утилизации и захоронении дренажных рассолов, оказывают воздействие в целом на геоэкологическую ситуацию в районах разработок.

Цель настоящей работы — геоэкологический мониторинг основных абиотических компонентов экосистемы (почвы — донные отложения — поверхностные воды) полигонов утилизации дренажных рассолов на территории разработки коренных месторождений алмазов в Западной Якутии на примере месторождения трубки "Удачная".

Методы и объекты исследования

Основой для подготовки статьи явились результаты обобщения фондовых и опубликованных данных по материалам комплексного экологического мониторинга, проводимого сотрудниками НИИ-ПЭС СВФУ на территории междуречья Сытыкан-Далдын-Марха с охватом промышленной площадки Удачинского горно-обогатительного комбината (УГОК) АЛРОСА (ПАО) и селитебной территории г. Удачный [5–8].

Детализация работ на территории промышленной площадки УГОКа и допробование выполнено в 2017 г. в период исследований ИГАБМ СО РАН по теме "Эколого-геохимическая обстановка территории хранилищ горно-обогажительных комбинатов в Западной Якутии и оценка уровня токсичности техногенных массивов на примере Удачинского ГОКа".

Интерпретация полученных результатов и общая оценка геоэкологической ситуации территории исследования проведена по проекту НИР 0381-2019-0003, выполняемому в ИГАБМ СО

РАН в рамках Госзадания на 2018–2020 гг. (№ госрегистрации: АААА-А17-117021310214-9) "Эколого-геохимическое изучение техногенных массивов на территории Якутской алмазоносной провинции".

Химико-аналитические исследования образцов почв, донных отложений, поверхностных вод и дренажных рассолов проведены с соблюдением методологической основы по единым общепринятым методикам в лабораториях физико-химических методов анализа НИИПЭС СВФУ (2013–2017 гг.) и Центра коллективного пользования физико-химических методов анализа ИГАБМ СО РАН (2017 г.).

Экспериментальная часть

Кимберлитовая трубка Удачная — крупнейшее месторождение алмазов, расположена на территории Далдынского кимберлитового поля, которое находится в пределах Далдыно-Алаakitского алмазоносного района Западно-Якутской алмазоносной провинции на правом берегу среднего течения р. Далдын (рис. 1). Далдынское кимберлитовое поле приурочено к области сопряжения юго-западного склона Анабаро-Оленекской антеклизы и северо-восточного борта Тунгусской синеклизы [8].

Территория современного техногенеза в бассейне реки Далдын в основном находится на междуречье его правых притоков — рек Сытыкан и Киенг-Юрях, где расположены карьер, отвалы пустых пород, отстойники, пруды-накопители, хвостохранилища, водохранилище на р. Сытыкан, инженерные коммуникации, объекты инфраструктуры и г. Удачный.

По левому берегу реки Далдын в междуречье левых притоков — рек Улахан-Бысытта и Орто-Бысытта расположены карьер трубки Зарница, полигон Левобережный, коммуникации и могильник подземного ядерного взрыва "Кристалл".

С 1971 г. началась промышленная открытая разработка месторождения алмазов — трубки Удачная. А с июля 1985 г. в карьер систематически поступают подземные минерализованные воды. В это же время в результате геологоразведочных работ была обоснована возможность захоро-

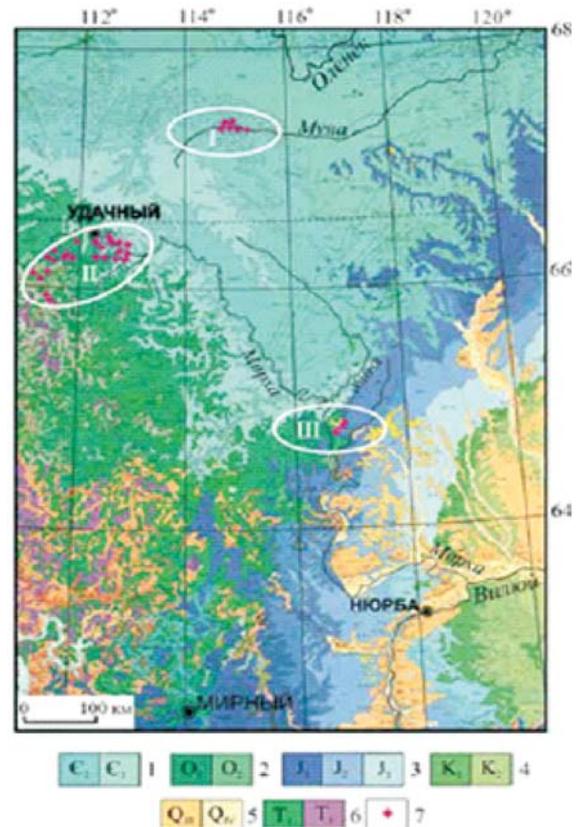


Рис. 1. Местоположение алмазоносных районов Западной Якутии [9]:

I – Верхнемунский; II – Далдыно-Алаakitский; III – Среднемархинский (красные кружки – кимберлитовые трубки); осадочные отложения: 1 – кембрийские; 2 – ордовикские; 3 – юрские; 4 – меловые; 5 – четвертичные; магматические породы: 6 – траппы; 7 – кимберлиты

Fig. 1. Location of diamondiferous regions of Western Yakutia [9]:

I – Verkhneymunsky; II – Dal'dyno-Alakitsky; III – Srednemarkhinsky (red circles – kimberlitic pipes); sedimentary deposits: 1 – Cambrian; 2 – Ordovician; 3 – Jurassic; 4 – Chalky; 5 – Quaternary; magmatic rocks: 6 – traps; 7 – kimberlites

нения первоочередных объемов дренажных рассолов в верхнекембрийском водоносном комплексе на северо-западном фланге Октябрьского разлома и зачатки основных объемов в среднекембрийском водоносном комплексе. Дальнейшие работы позволили разработать способ захоронения дренажных вод в естественные коллекторы многолетнемерзлых пород, расположенные ниже местных базисов эрозии [2]. С 2001 г. дренажные воды карьера и рудника "Удачный" удалялись на "Киенгский" полигон, а в 2013 г. заработал полигон "Левобережный". Режим сброса — безнапорный, с поддержанием уровней воды в массиве на определенных экологически безопасных отметках (+280 м. абс.). Таким образом, Удачинский ГОК АК "АЛРОСА" (ПАО) является первым пред-

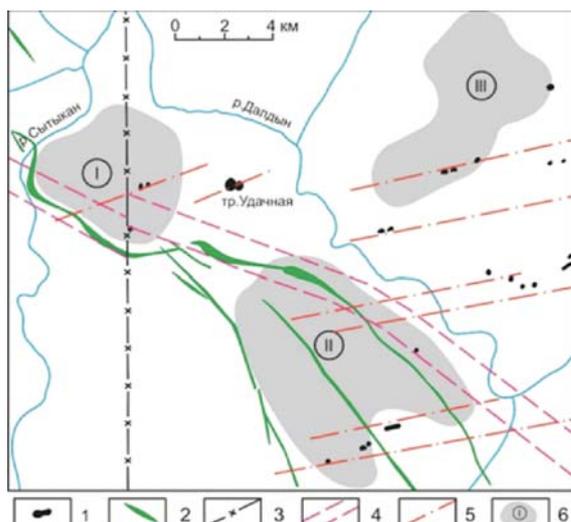


Рис. 2. Схема участков захоронения дренажных рассолов трубки Удачной:

I – Октябрьский, II – Киенгский, III – Левобережный – подземные полигоны захоронения дренажных вод; 1 – кимберлитовая трубка; 2 – дайки долеритов, заполняющие разломы Вилуйско-Котуйской тектонической зоны; 3 – Силигиро-Мархинский разлом фундамента; 4 – зона Октябрьского разлома; 5 – нарушения Далдыно-Оленекской тектонической зоны; 6 – участки закачки стоков

Fig. 2. Scheme of burial sites for drainage brines from the Udachnaya pipe:
I – Oktyabrsky, II – Kiengsky, III – Levoberezhny – underground disposal for drainage water; 1 – kimberlite pipe; 2 – dolerite dikes filling the faults of the Vilyui-Kotui tectonic zone; 3 – Siligi-ro-Markhinsky break of the basement; 4 – zone of the October fault; 5 – violations of the Daldyno-Olenek tectonic zone; 6 – sewage injection sites

приятием в России, где внедрен способ захоронения дренажных рассолов в многолетнемерзлые породы, не имеющий аналогов в отечественной и мировой практике. На сегодняшний день в пределах промышленной площадки УГОКа сформировано три подземных полигона захоронения дренажных вод – "Октябрьский", "Киенгский" и "Левобережный" с общей площадью зоны техногенного воздействия на геокриологические, гидрогеологические и геоэкологические условия территории порядка 20×20 км² (рис. 2).

Дренажные рассолы, захороненные в массив многолетнемерзлых пород (ММП) на трубке Удачной, являются конечным продуктом комплексной системы осушения месторождения. Они включают следующие элементы стока: атмосферные осадки, разного рода пресные поверхностные воды, слабые рассолы верхнекембрийского водоносного комплекса, крепкие и весьма крепкие рассолы средне- и нижнекембрийского водоносных комплексов, обводненных зон трубки Удачной. Минерализация межмерзлотных и подмерзлотных вод вблизи месторождения изменяется от 22 до 424 г/дм³ и более. Общая модель удаления стоков на упомянутых эксплуатируемых полигонах определяется естественной порово-трещинной емкостью мерзлых массивов. На перспективных участках, приуроченных к местам повышенных тектонических дислокаций, мерзлая часть криолитозоны разбита на отдельные блоки, сдвинутые относительно друг друга в вертикальной плоскости. Межблоковое пространство заполнено разрушенным материалом материнских пород, сцементированным льдом [5]. К трещинно-жильным коллекторам тектонических нарушений, имеющих наибольшую открытость, приурочена свободная емкость толщ, полости которой заполнены газо-воздушной смесью, их объем составляет меньше 10 % всего объема потенциального резервуара. Внутри блоки также разбиты многочисленными трещинами, но в них существуют локальные глинистые водоупоры. Крупные блоки ММП по всему массиву обладают большей льдистостью или потен-

циальной пустотностью по сравнению с межблоковыми пространствами. Их льдистость достигает 30 % при средних величинах 5–10 % [3]. Принятые схемы удаления минерализованных стоков ориентированы на изменение состояния криогидрогеологической структуры за счет воздействия высококонцентрированных рассолов на подземные льды, вызывающего их плавление и замещение.

Тектонические зоны нарушений создают благоприятные условия для активной миграции высокоминерализованных вод и определяют области их разгрузки на дневную поверхность при превышении пьезометрических уровней подземных вод отметок, превышающих местные базисы эрозии, в этом случае подъем высокоподвижных химических элементов к дневной поверхности становится более интенсивным и захороняемые рассолы могут высачиваться на склоны или в пойме речных долин. Так, в ноябре 2012 г. в бассейне р. Далдын в районе устья руч. Киенг-Юрхя на периферии "Киенгского" полигона был обнаружен выход высокоминерализованных вод. В целом, сложившаяся ситуация в районе трубки Удачная свидетельствует о том, что помимо совершенствования методических аспектов способа захоронения рассолов в ММП и введения в эксплуатацию новых полигонов необходимо проводить постоянный и детальный мониторинг геоэкологической ситуации основных абиотических компонентов экосистемы междуречья Далдын – Сытыкан для своевременного реагирования на аварийные и предаварийные ситуации.

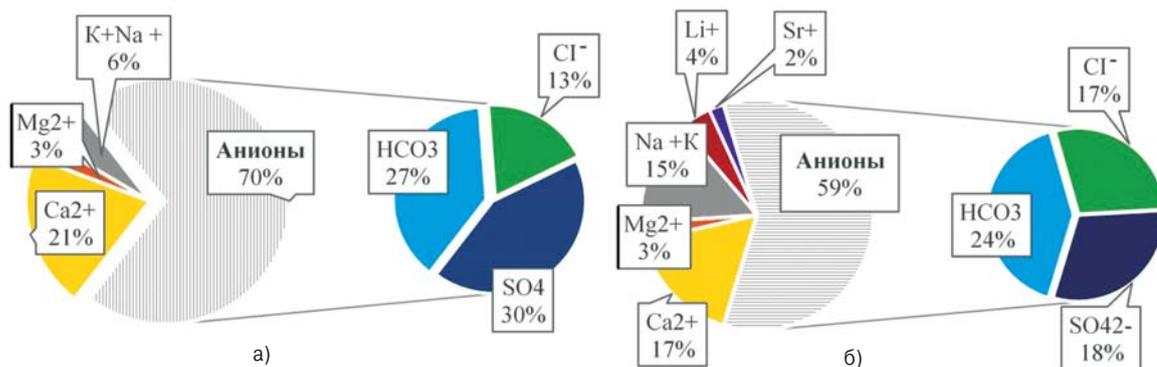


Рис. 3. Усредненная модель катионно-анионного состава почв (а) и грунтов (б) полигонов "Октябрьский" и "Киенгский"

Fig. 3. Averaged model of cation-anion composition of soils (a) and soils (b) of the Oktyabrsky and Kieng polygons

Обсуждение и анализ полученных результатов

Полигоны захоронения дренажных рассолов, с одной стороны, являются достаточно прогрессивным методом утилизации высокоминерализованных вод. С другой стороны, это постоянный и долговременный источник вторичного загрязнения основных абиотических компонентов экосистемы Сытыкан-Далдынского междуречья. Вещественный состав почв и грунтов промышленной площадки УГОКа изучается с 1994 г. [6]. Почвенный покров на территории полигонов захоронения дренажных и высокоминерализованных вод "Октябрьский" и "Киенгский" — это комплекс почв природных ландшафтов и грунтов площадок скважин, который в целом характеризуется достаточно широким элементным спектром (табл. 1). В грунтах отмечено развитие процессов хлоридного поверхностного засоления с увеличением доли Cl-Na-K составляющей (рис. 3). На общем региональном фоне пространственное распределение микроэлементного состава почв и грунтов на полигонах характеризуется повышенными концентрациями Li, Zn, Mn, Co, Sr и V. Элементы, являющиеся индикаторами кимберлитового магматизма и в больших количествах присутствующие в породах ордовика и кембрия в зоне экзоконтакта с кимберлитами тр. Удачная — Ni, Co и Sr, в почвах на полигонах находятся в подчиненном состоянии с $K_k = 0,8 \div 1,4$. В микроэлементном составе грунтов увеличивается концентрация Li, Sr, Pb, Ni, Cu, Y и Sn.

По содержанию как валовых, так и подвижных форм влияние всей промышленной площадки Удачинского ГОКа на почвенный покров с эпицентром техногенного воздействия от бортов карьера тр. Удачная, отвалов пустых пород и территории хвостохранилищ выражается в формировании техногенной полиэлементной аномалии. В составе подвижных форм в грунтах на полигонах доминируют Mn, Cu и Pb (рис. 4).

По классификации О.А. Алекина, ионный состав воды р. Далдын преимущественно хлоридно-гидрокарбонатно-магниево-каль-

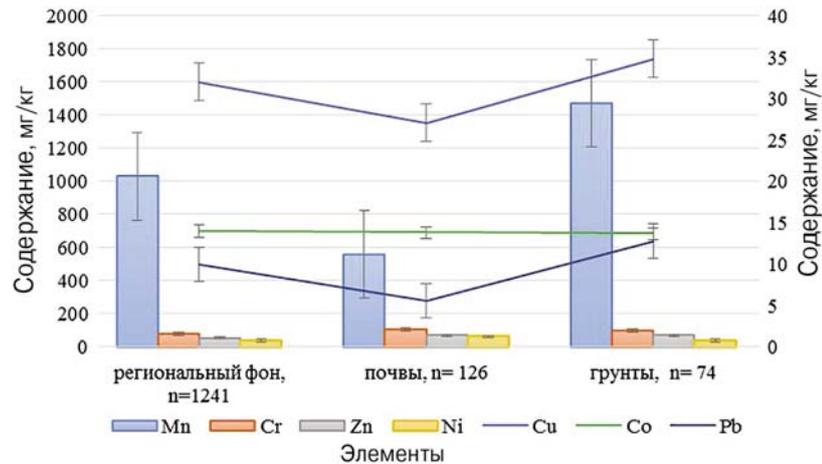


Рис. 4. Содержание подвижных форм микроэлементов в почвенном покрове

Fig. 4. The content of mobile forms of trace elements in soil cover

Таблица 1. Микроэлементы в почвах и грунтах на территории полигонов закачки высокоминерализованных вод и дренажных рассолов промышленной площадки Удачинского ГОКа

Table 1. Trace elements in soils and soil on the territory of highly mineralized water injection sites and drainage brines of the industrial site of the Udachninsky mining and processing plant

Тип почвы	Микроэлементный ряд
Глеезем перегнойный Oh-G-CG	Sc _{1,4} →Mn _{1,3} →Yb _{1,2} →Ti(Ag) _{1,1} →Ge _{1,0}
Криозем глееватый O-CRg-Cg	Sc _{1,3} →Ti(Ge-Y- Yb) _{1,2} →Mn(Nb-Sn) _{1,1} →Ni(Zn) _{1,0}
Криозем типичный O-CR-C	Sc _{1,4} →Ge(Y-Yb) _{1,2} →Be(Ti-Sn) _{1,1}
Криозем тиксотропный O-CR-C	Ge _{1,6} →Ni (Zn) _{1,3} →Sn _{1,2} →Li(Y) _{1,1}
Карбопетрозем гумусовый O-Rca	Sc(Ti) _{1,4} →Y _{1,2} →Ge(Yb) _{1,1} →P _{1,0}
Мерзлотные аллювиальные почвы W-C	Ni _{1,4} →Ge _{1,3} →Mn(Ag-Sn) _{1,1} →Mo(Sc) _{1,0}
Грунт*	Li _{1,9} >Sr _{7,6} >Mn _{3,5} >V _{3,4} >Ag(Pb) _{2,7} > Sn _{2,1} >Cu _{1,7} >Ga(Y) _{1,6}
Грунт**	Li _{10,4} >Mn _{3,9} >Sr _{3,3} >Sn _{2,1} >Pb _{2,0} >Ga _{1,9} >B(Sc,Zn-Ag-Co) _{1,6}

*Место опробования — полигон "Киенгский"; **место опробования — полигон "Октябрьский".

циевый (рис. 5). В зоне воздействия полигона "Киенгский" на р. Далдын, в частности на отрезке выхода высокоминерализованных вод, отмечаются высокие относительно регионального фона концентрации основных катионов и анионов, среди которых наиболее значительны превышения хлоридов (рис. 6, а), лития, стронция (рис. 6, б), бария, а также поступающих с поверхностным стоком марганца, меди и железа.

Введение в 2013 г. в эксплуатацию нового полигона "Левобережный" несколько сняло геоэкологическую напряженность, что сразу отразилось на гидрохимическом составе поверхностных вод р. Далдын, в частности на значении величины минерализации. На фоновых участках минерализация поверхностных вод в р. Далдын стабильна и находится в пределах 215–203 мг/дм³ и в среднем составляет в 2013 г. 394,9 мг/дм³, а в 2017 г. — 339 мг/дм³.

В районе выхода высокоминерализованных вод на поверхность отмечается повышение минерализации вод в р. Далдын в 2013 г. до 2,2 г/дм³, а в 2017 г. — до 1,04 г/дм³.

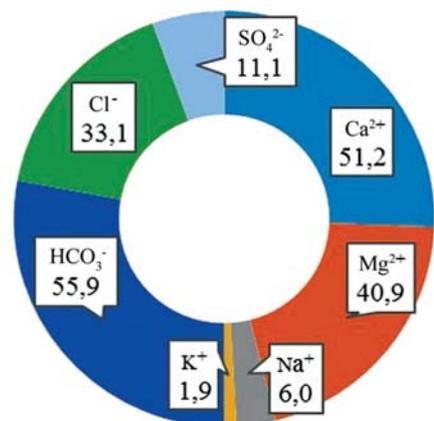


Рис. 5. Усредненный ионный состав воды р. Далдын по данным 2017 г. (общий объем выборки n = 24), мг/дм³

Fig. 5. The average ionic composition of water of the river Daldyn according to 2017 data (total sample size n = 24), mg/dm³

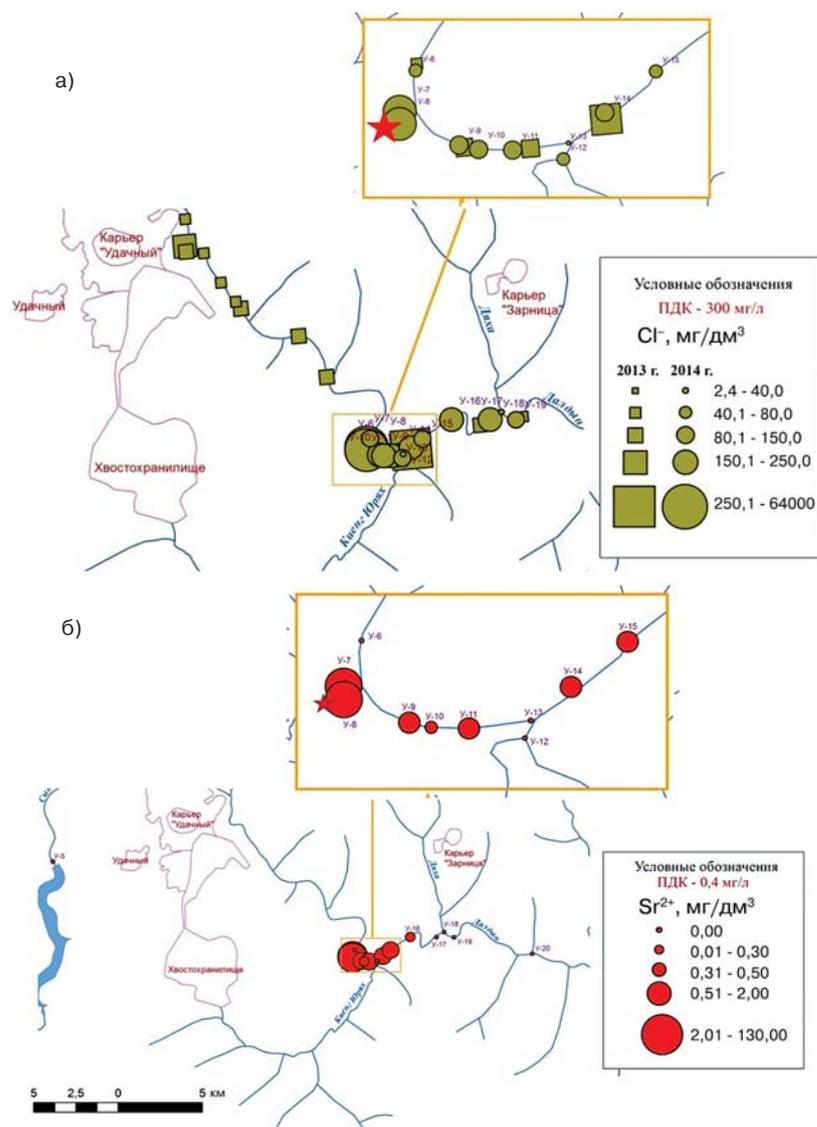


Рис.6. Содержание ионов хлора (а) и стронция (б) в поверхностных водах р. Далдын в зоне выхода источника минерализованных вод
Fig. 6. The content of chlorine ions (a) and strontium (b) in the surface waters of the river Dal'dyn in the exit zone of the mineralized source

Воды основных водотоков относятся к категории "загрязненных" и "очень загрязненных" по значению удельного комбинаторного индекса загрязненности. На территории промышленной площадки УГОКа выделены точки повышенной экологической

Таблица 2. Микроэлементный спектр компонентов экосистемы в зоне воздействия полигонов закачки высокоминерализованных вод и дренажных рассолов промышленной площадки Удачинского ГОКа

Table 2. The trace element spectrum of ecosystem components in the zone of impact of highly mineralized water injection sites and drainage brines at the industrial site of Udachninsky MPP

Компонент экосистемы	Место опробования	Суммарный коэффициент загрязнения Zc	Zc-образующие элементы	Коэффициент встречаемости Ni, %
Почвы	Полигон Киенгский	1,23–16,4	Mn, Cu, Pb, Co, Zn, Ni, Cr	50–33
	Полигон Октябрьский	4,3–18,1		
Грунты	Полигон Киенгский	13,6–28,8	Co, Cu, Ni, Zn, Mn, Pb, Cr	98–5
	Полигон Октябрьский	12,9–21,4		
Донные отложения	р. Далдын	7,8–29,8	Cu, Co, Ni, Pb, Cr, Cd, Zn, As, Mn	100–30
	р. Правый Киенг	1,5–5,8		
Природные воды	р. Далдын	7,5–11,4	Cu, Mn, Sr	100–36
	р. Правый Киенг	7,1–8,5		

опасности, которые имеют прямой выход на акваторию р. Далдын, которая на этом участке характеризуется умеренным и опасным загрязнением почвенного покрова по содержанию подвижных форм микроэлементов.

Полигон "Левобережный" имеет расчётную ёмкость порядка 11–13 млн м³, это обеспечивает возможность захоронения рассолов с дебитами от 270 до 350 м³/ч в течение 5, а может быть и 6 лет. При превышении ёмкостных возможностей полигона "Левобережный" имеются опасения радиоактивного загрязнения дренажных вод под саркофагом мирного ядерного взрыва "Кристалл" и дальнейшего их распространения по участкам захоронения и далее [10].

В целом, при изучении взаимосвязи в системе "почвы — донные отложения — поверхностные воды" выявлены определенные тенденции в распределении и накоплении подвижных форм некоторых микроэлементов (табл. 2). Например, характер микроэлементных спектров очень схож по составу в почвах на полигонах и в донных отложениях р. Далдын (в зоне воздействия полигонов), а также близок по значениям коэффициентов встречаемости аномалообразующих элементов с явным преобладанием марганца и меди.

В почвах, грунтах и донных отложениях р. Далдын выявлены достаточно высокие концентрации подвижных форм свинца. Микроэлементный состав грунтов на полигонах и донных отложений на руч. Правый Киенг также обнаруживают сходство по доминированию марганца, меди и хрома со значительным увеличением коэффициента встречаемости Zc-образующих элементов. На момент исследований 2017 г. в почвах, грунтах и природных водах зафиксировано превышение установленных нормативов ПДК для Mn и Cu.

В целом, эколого-геохимическая ситуация в зоне воздействия полигонов закачки высокоминерализованных вод и дренажных рассолов промышленной площадки Удачинского ГОКа отражают совокупное действие существующих полиэлементных аномалий природного и техногенного характера. Вся тер-

ритория модельного полигона с выходом на р. Далдын находится в ареале умеренной и опасной категории загрязнения.

Заключение

Подземное захоронение дренажных рассолов в толщи многолетнемерзлых пород обеспечивает возможность эксплуатации алмазонасных трубок и является уникальным и оправданным воздействием на подземную криогидросферу в самом широком смысле этого понятия. Однако сложная гидрогеологическая обстановка требует значительных усилий по его контролю, прогнозу и своевременной коррекции возникающих осложнений, связан-

ных с вопросами безопасности, в том числе и экологического характера. Маркером воздействия выходов минерализованных вод на почвы являются высокие концентрации Li, Sr, Ga по всему почвенному профилю, а на поверхностные воды р. Далдын — ураганные значения Cl⁻, Li, Sr, Ba. На территории полигона "Октябрьский" в грунтах отмечено развитие процессов хлоридного поверхностного засоления. Вся территория полигонов "Октябрьский" и "Киенгский" с выходом на р. Далдын находится в ареале умеренной и опасной категории загрязнения. Геоэкологическая ситуация на полигонах утилизации дренажных рассолов и высокоминерализованных вод является следствием совокупного действия существующих полиэлементных аномалий как техногенного, так и природного характера.

Оценка степени воздействия, разработка программы минимизации наносимого ущерба окружающей среде — это задачи геоэкологических исследований, в этом смысле территория промышленной площадки Удачинского ГОКа в Западной Якутии представляет собой модельный полигон для отработки алгоритма оценки геоэкологической безопасности техногенных отложений на примере полигонов подземной закачки дренажных вод и высокоминерализованных рассолов.

Литература

1. Дроздов А.В., Попов В.Ф., Поморцев О.А. Удаление высокоминерализованных вод алмазодобывающих предприятий в многолетнемерзлые породы криолитозоны (на примере Удачинского ГОКа). Отечественная геология. 2011. № 6. С. 64–71.
2. Атрошенко Ф.Г. Оценка гидрогеологических условий подземной разработки месторождения трубки "Удачная". Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2012. № 5. С. 414–421.
3. Алексеев С.В. Криогидрогеологические системы Якутской алмазонасной провинции. Новосибирск, Академическое изд-во "Geo", 2009. 319 с.
4. Evangelou V.P., Zhang Y.L. A Review: Pyrite Oxidation Mechanisms and Acid Mine Drainage Prevention. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2005. № 25(2). P. 141–199.
5. Дроздов А.В., Попов В.Ф. Захоронение дренажных рассолов трубки Удачной в многолетнюю мерзлоту. Монография. Саарбрюккен: LAPLAMBERT Academic Publishing, 2012. 231 с.
6. Легостаева Я.Б. Экологическая значимость микроэлементного состава почв Далдынского кимберлитового поля. Проблемы региональной экологии. 2008. № 2. С. 15–20.
7. Ксенофонтова М.И. Качество воды Сытыканского водохранилища. Наука и образование. 2009. № 1. С. 74–79
8. Ягнышев Б.С., Ягнышева Т.А., Зинчук М.Н., Легостаева Я.Б. Экология Западной Якутии (геохимия геосистем: состояние и проблемы). Монография. Якутск, Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2005. 432 с.
9. Алексеева Л.П., Алексеев С.В., Кононов А.М. Геохимические особенности подземных текстурообразующих льдов алмазонасных районов Западной Якутии. Лед и снег. 2014. № 1. С. 101–113.
10. Артамонова С.Ю., Бондарева Л.Г., Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О. Геоэкологическая модель района мирного подземного ядерного взрыва "Кристалл" (Якутия). Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2012. № 2. С. 143–158.

References

1. Drozdov A.V., Popov V.F., Pomortsev O.A. Udalenie vysokomineralizovannykh vod almazodobvayushchikh predpriyatiy v mnogoletnemerzlye porody kriolitozony (na primere Udachninskogo GOKa). Otechestvennaya geologiya. 2011. № 6. S. 64–71.
2. Atroshchenko F.G. Otsenka gidrogeologicheskikh uslovii podzemnoi razrabotki mestorozhdeniya trubki "Udachnaya". Geoekologiya, inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya. 2012. № 5. S. 414–421.
3. Alekseev S.V. Kriogidrogeologicheskie sistemy Yakutskoi almazonosnoi provintsii. Novosibirsk, Akademicheskoe izd-vo "Geo", 2009. 319 s.
4. Evangelou V.P., Zhang Y.L. A Review: Pyrite Oxidation Mechanisms and Acid Mine Drainage Prevention. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2005. № 25(2). P. 141–199.
5. Drozdov A.V., Popov V.F. Zakhoronenie drenaznykh rassolov trubki Udachnoi v mnogoletnyuyu merzlotu. Monografiya. Saarbrücken: LAPLAMBERT Academic Publishing, 2012. 231 s.
6. Legostaeva Ya.B. Ekologicheskaya znachimost' mikroelementnogo sostava pochv Daldynskogo kimberlitovogo polya. Problemy regional'noi ekologii. 2008. № 2. S. 15–20.
7. Ksenofontova M.I. Kachestvo vody Sytykanskoego vodokhranilishcha. Nauka i obrazovanie. 2009. № 1. S. 74–79
8. Yagnyshev B.S., Yagnysheva T.A., Zinchuk M.N., Legostaeva Ya.B. Ekologiya Zapadnoi Yakutii (geokhimiya geosistem: sostoyanie i problemy). Monografiya. Yakutsk, Izd-vo YaNTs SO RAN, 2005. 432 s.
9. Alekseeva L.P., Alekseev S.V., Kononov A.M. Geokhimicheskie osobennosti podzemnykh teksturoobrazuyushchikh l'dov almazonosnykh raionov Zapadnoi Yakutii. Led i sneg. 2014. № 1. S. 101–113.
10. Artamonova S.Yu., Bondareva L.G., Antonov E.Yu., Kozhevnikov N.O. Geoekologicheskaya model' raiona mirnogo podzemnogo yadernogo vzryva "Kristall" (Yakutiya). Geoekologiya, inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya. 2012. № 2. S. 143–158.

Я.Б. Легостаева – канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук, 677980 Россия, г. Якутск, проспект Ленина 39, e-mail: ylego@mail.ru • М.И. Ксенофонтова – канд. географ. наук, ст. науч. сотрудник, Научно-исследовательский институт прикладной экологии Севера Северо-Восточного Федерального университета М.К. Аммосова, 677000 Россия, г. Якутск, ул. Кулаковского 48, e-mail: ksemaria@mail.ru • В.Ф. Попов – доцент, Северо-Восточный Федеральный университет М.К. Аммосова, 677000 Россия, г. Якутск, ул. Кулаковского, 50, e-mail: pvf_grf@rambler.ru

Ya.B. Legostaeva – Cand. Sci. (Biol.), Leading Research Fellow, Institute of Geology of Diamond and Precious Metals, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 677980 Russia, Yakutsk, Lenin Pr. 39, e-mail: ylego@mail.ru • M.I. Ksenofontova – Cand. Sci. (Geogr.), Senior Research Fellow, M.K. Ammosov Research Institute of Applied Ecology of the North of the North-Eastern Federal University, 677000 Russia, Yakutsk, Kulakovskiy Str. 48, e-mail: ksemaria@mail.ru • V.F. Popov – Associate Professor, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 677000 Russia, Yakutsk, Kulakovskiy Str. 50, e-mail: pvf_grf@rambler.ru