

Гидрогеологические условия и геоэкологическая ситуация на территории подземных техногенных хранилищ при утилизации дренажных рассолов Удачинского горно-обогатительного комбината

Я.Б.ЛЕГОСТАЕВА (Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук (ИГАБМ СО РАН); 677980, г. Якутск, проспект Ленина, д. 39),
В.Ф.ПОПОВ (Геологоразведочный факультет Северо-Восточного Федерального университета М.К.Аммосова (ГРФ СВФУ); 677000, г. Якутск, ул. Кулаковского, д. 50),
М.И.КСЕНОФОНТОВА (Научно-исследовательский институт прикладной экологии Севера Северо-Восточного Федерального университета М.К.Аммосова (НИИПЭС СВФУ); 677000, г. Якутск, ул. Кулаковского, д. 48)

Разработка коренных алмазных месторождений в Якутии сопряжена с вовлечением значительных объёмов сопутствующих высокоминерализованных стоков. Соответственно, их безопасное удаление – краеугольная задача обеспечения благоприятной экологической обстановки. Целенаправленное изменение мерзлотно-гидрогеологических условий на подземных полигонах захоронения дренажных вод Удачинского горно-обогатительного комбината АК «АЛРОСА» обеспечивает возможность добычи алмазов и является уникальным и оправданным воздействием на подземную криогидросферу в самом широком смысле этого понятия. Однако сложность и динамичность криогидрогеологической обстановки, увеличение объёма поступления вод в горные выработки и вероятное превышение ёмкостных возможностей резервуаров хранилищ дренажных рассолов повышают экологические риски. Абиотические компоненты экосистемы отражают вариации биогеохимических параметров природной и техногенной геохимической аномальности. Пространственное распределение микроэлементного состава почв, донных отложений и поверхностных вод характеризуется повышенными концентрациями широкого спектра элементов Cr, Ni, Co, Ti, Cu, Y, Nb, Li, Be, Sr, среди которых Sr и Li являются маркерами высокоминерализованных подземных вод.

Ключевые слова: гидрогеология, геоэкология, промышленные отходы, дренажные стоки, криолитозона, многолетнемёрзлые породы.

Легостаева Яна Борисовна
Попов Владимир Фёдорович
Ксенофонтова Марта Ивановна



ylego@mail.ru
pvf_grf@rambler.ru
ksemaria@mail.ru

Hydrogeological conditions and geocological situation in the territory of underground technogenic storage facilities for drainage brines utilization

Ya.B.LEGOSTAEVA (Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences),
V.F.POPOV (M.K.Ammosov North East Federal University, Geological Prospecting Faculty),
M.I.KSENOFONTOVA (M.K.Ammosov North East Federal University's Research Institute of the North Applied Ecology)

The development of primary diamond deposits in Yakutia involves significant amounts of associated highly mineralized effluents, therefore, their safe disposal is the cornerstone of ensuring favorable ecological situation. A targeted change in the permafrost-hydrogeological conditions on the underground landfills of the drainage waters of the Udachny Mining and Processing Division of ALROSA allows for diamond extraction and has unique and justified impact on the underground cryohydrosphere in the broadest sense of the term. However, the complexity and dynamics of the cryogenic hydrogeological situation, the increase in the volume of water flow into the mine workings and the likely capacity excess of drainage brine tank reservoirs increase environmental risks. The abiotic components of the ecosystem reflect variations in the biogeochemical parameters of natural and technogenic geochemical anomalies. The spatial distribution of the microelement composition of soils, sediments and surface waters is characterized by increased concentrations of a wide range of elements: Cr, Ni, Co, Ti, Cu, Y, Nb, Li, Be, Sr, with Sr and Li being the markers of highly mineralized groundwater.

Key words: hydrogeology, geocology, industrial waste, drainage, cryolithozone, permafrost.

В условиях криолитозоны хрупкие природные экосистемы на фоне возрастающего потенциала горнодобывающих производств испытывают возрастающий техногенный прессинг, приводящий к необратимым экологическим последствиям. Сложность в эксплуатации крупнейших алмазоносных трубок Западной Якутии – это обводнённость рассолами из подмерзлотных высоконапорных водоносных горизонтов. С подобными проблемами сталкиваются при разработке кимберлитовых трубок Екаги и Диавик в Канаде [29, 30, 32, 33]. Состав подземных вод, объёмы их притоков к горным выработкам создают проблемы для ведения горно-геологических и добычных работ, влияют на производительность, сложность при утилизации и захоронении дренажных рассолов, оказывают воздействие на геоэкологическую ситуацию в районах разработки.

Кимберлитовая трубка Удачная находится в Далдыно-Алаakitском алмазоносном районе Западно-Якутской алмазоносной провинции на правом берегу среднего течения р. Далдын. Территория Далдынского кимберлитового поля приурочена к области сопряжения юго-западного склона Анабаро-Оленёкской антеклизы и северо-восточного борта Тунгусской синеклизы [21]. В его строении участвуют кристаллические породы архея, карбонатные и терригенно-карбонатные отложения венда, кембрия, ордовика и силура, терригенные образования карбона. Глубина залегания кристаллического фундамента составляет 2,4–2,5 км. Осадочный чехол интродуцирован пластовыми телами и дайками долеритов, трубками взрыва, дайками и жилами кимберлитов. Четвертичные отложения представлены различного генезиса песками, галечниками, пылеватыми супесями, часто со значительными включениями крупнообломочного материала. В непосредственной близости от трубки Удачная проходит Октябрьский разлом с резко выраженной амплитудой вертикального смещения осадочных пород порядка 100–150 м. Простирается нарушение изменяется от северного и северо-западного на юге до западного и северо-западного на севере района исследований. В осевой части разлома на поверхность выходит трапповая интрузия мощностью более 50 м. В пределах его юго-западной части (район трубки Удачная) выделяется полосообразная геологическая структура (Далдынская флексура) с повышенными (на 1–2 порядка) значениями коэффициента водопроницаемости интервалов средне- и нижнекембрийского водоносных комплексов. Её ширина достигает 5 км. Структура асимметрична: северо-восточное крыло приподнято и более пологое, юго-западное – более крутое. По осевой части Далдынской флексуры проходит гребневая часть кембрийского рифового барьерного пояса, который в виде широкой полосы, захватывающей и район трубки Удачная, протягивается с северо-запада на юго-восток [7].

На территории существующего с 1971 г. Удачинского горно-обогатительного комбината (далее Удачинский ГОК) АК «АЛРОСА» (ПАО) осадочный че-

хол имеет сложное геологическое и тектоническое строение, что с одной стороны определяет разнообразие гидрогеологических, геокриологических и геоэкологических условий, а с другой, требует детальной проработки технологических решений, связанных с добычей алмазов, сооружением отвалов, размещением хвостохранилищ и промстоков. Отработка глубоких горизонтов алмазного месторождения сопряжена с поступлением большого количества агрессивных и экологически опасных хлоридно-кальциевых рассолов, требующих их последующей утилизации, непосредственно в горные выработки.

Гидрогеологическая изученность и характеристика гидрогеологического разреза. Гидрогеологические условия кимберлитовой трубки Удачная и района в целом изучались в несколько этапов, начиная с 1956 г., в соответствии с ходом геологоразведочных работ на алмазы и в дальнейшем в связи с необходимостью решения задач водоотведения и утилизации карьерных и шахтных вод. В 1958 г. началось освоение месторождения тр. Удачная открытым способом. В 1982–1983 гг. в результате опытной откачки в интервале 1500–1567 м на нефтегазопроисковой скважине 703, пройденной до кристаллического фундамента, были получены уникальные гидрогеологические параметры нижнекембрийского водоносного горизонта. В 1985 г. в рудных телах были вскрыты подмерзлотные обводнённые зоны, и высокоминерализованные подземные воды начали поступать в карьер. В районе трубки Удачная выполнены беспрецедентные по новизне, объёму и детальности гидрогеологические, инженерно-геологические, геокриологические и геоэкологические исследования Амакинской геологоразведочной экспедицией, Удачинским ГОКом, институтом Якутнипроалмаз (г. Мирный), а также Институтом Земной коры СО РАН (г. Иркутск), Институтом геологии алмазов и благородных металлов СО РАН (г. Якутск), Санкт-Петербургским горным университетом, Российским государственным горным университетом (г. Москва), Северо-Восточным федеральным университетом (г. Якутск) и др. [8].

В районе месторождения существуют все типы подземных вод, характерные для криолитозоны: над-, меж- и подмерзлотные (рис. 1). Последние являются преобладающими. Надмерзлотные представлены пресными водами сезонно-талого слоя, водами гидрогенных подрусловых и подозёрных таликов.

Подмерзлотные воды представлены четырьмя водоносными комплексами, выделенными в соответствии с принципами гидрогеологической стратификации: верхнекембрийским, среднекембрийским, нижнекембрийским и верхнепротерозойским [2, 10]. Минерализация подземных вод увеличивается с глубиной от солёных вод до рассолов. Подземные воды верхнекембрийского комплекса представлены преимущественно хлоридными магниевыми-кальциевыми рассолами с минерализацией от 72 до 177 г/дм³, относительное содержание

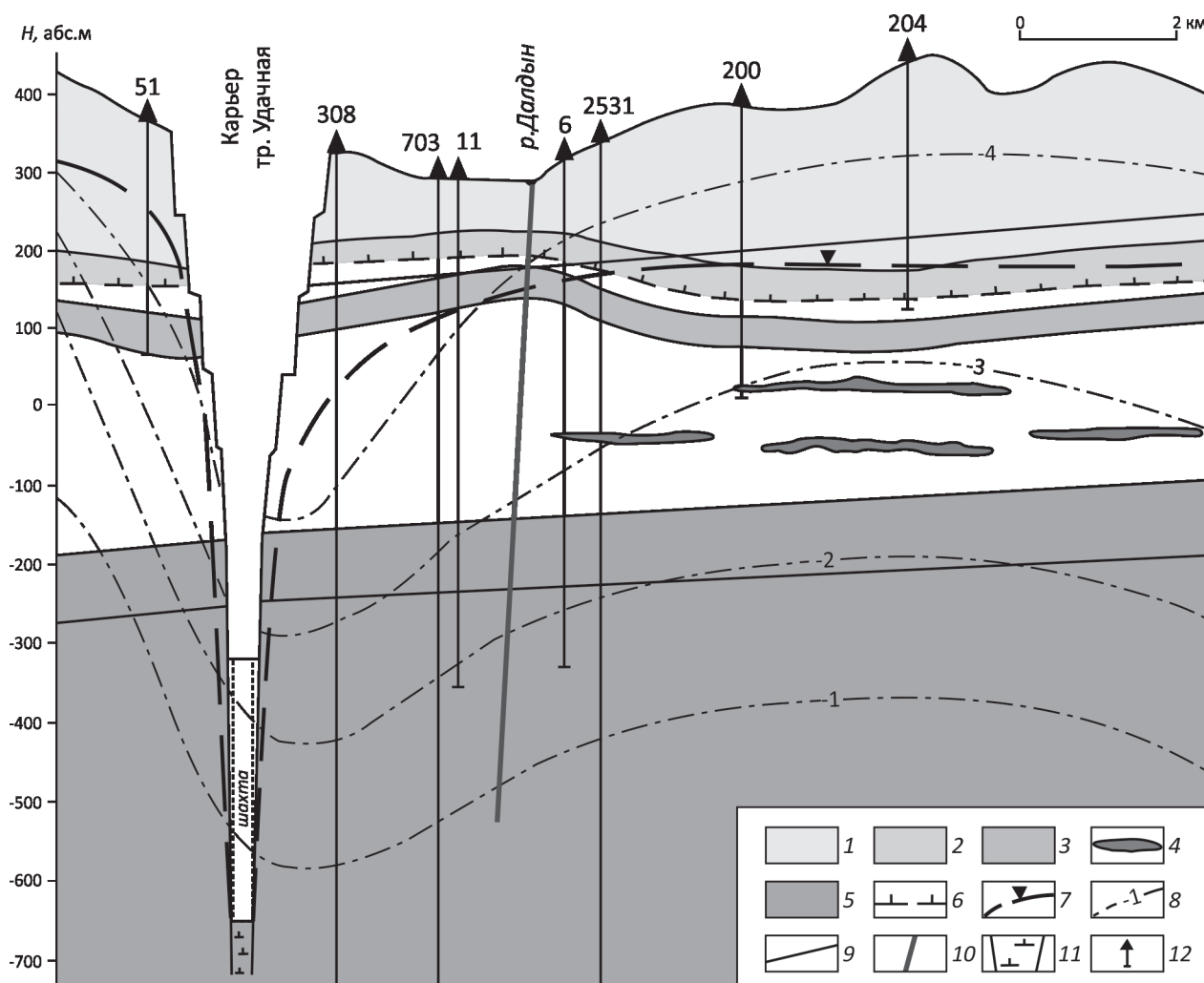


Рис. 1. Мерзлотно-гидрогеологический разрез:

подземные воды в твёрдой фазе: 1 – пресные и 2 – солоноватые; 3 – подмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс; 4 – линзы крепких рассолов; 5 – среднекембрийский водоносный комплекс; 6 – подошва многолетнемёрзлых пород; 7 – пьезометрический уровень; 8 – изотермы, °С; 9 – границы разновозрастных отложений; 10 – тектонические нарушения; 11 – кимберлитовая трубка; 12 – гидрогеологическая скважина и её номер

хлора изменяется от 97,3 до 99,98%-экв. Подземные воды среднекембрийского комплекса имеют минерализацию до 369 г/дм³, преимущественно хлоридно-кальциевого состава с неизменно высоким содержанием хлора – 99%-экв. Кислотно-щелочная характеристика рассолов изменяется с увеличением минерализации и глубины залегания от нейтральной до сильно кислой (рН=2,9–5,0). Дренаживание и откачка дренажных рассолов из карьера и горных выработок рудника Удачный ведут в водоносных комплексах вблизи месторождения к развитию депрессионной воронки. При этом воронка депрессии вблизи горной выработки очень крутая, с градиентом фильтрации на западном фланге до 4–5 [3].

В составе рассолов присутствуют повышенные концентрации микрокомпонентов: Br, Li, Rb, Cs, Sr. Ведущее место занимает Sr, содержание которого изменяется от 438,1 до 894,2 мг/дм³ [7]. Концентрации редких щелочных элементов находятся в прямой связи с концентрациями K⁺. Содержание Li изменяется от 67,4 до 165,9 мг/дм³, а Rb, соответственно, от 4,89 до 18,9 мг/дм³. Концентрации Cs в рассолах не более 0,01 мг/дм³. Рассолы относятся к типу минеральных бромных вод. И хотя Br, как правило, относится к группе микрокомпонентов, его макросодержания в рассолах (до 5,45 г/дм³) позволили отнести его к основным компонентам рассолов. Рассолы высоко агрессивны,

что обусловлено высокой минерализацией, ионным составом, пониженными значениями pH. По агрессивному действию на металлы хлорид кальция стоит на первом месте.

С момента систематического поступления в карьер подземных минерализованных вод в июле 1985 г. на прилегающих к месторождению площадях, расположенных в пределах Далдынской флексуры и в зоне Октябрьского разлома, начались геологоразведочные работы по поиску благоприятных структур для закачки дренажных вод карьера Удачный в водоносные толщи. В результате была обоснована возможность захоронения первоочередных объёмов дренажных рассолов в верхнекембрийский водоносный комплекс на северо-западном фланге Октябрьского разлома и закачки основных объёмов в среднекембрийский водоносный комплекс. Дальнейшие работы позволили разработать способ захоронения дренажных вод в естественные коллекторы многолетнемёрзлых пород, расположенные ниже местных базисов эрозии. Режим сброса – безнапорный, с поддержанием уровней воды в массиве на определённых экологически безопасных отметках (+280 м абс.).

Геотермический разрез в районе трубки Удачная достаточно детально изучен. На сравнительно небольшой площади температура горных пород была измерена в десятках скважин глубиной 600–700 м [13]. Полученные данные свидетельствуют о значительной изменчивости теплового поля. Установлено, что самую высокую (от $-2,9^{\circ}$ до $-3,8^{\circ}\text{C}$) среднегодовую температуру имеют осадочные толщи на юго-восточном фланге месторождения. До глубины 200 м фиксируется безградиентная зона. Ниже по разрезу температура пород повышается с геотермическим градиентом $0,6^{\circ}\text{--}0,9^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$. Мощность криолитозоны составляет 700–1050 м. На северо-западном фланге месторождения среднегодовая температура пород достигает $-4,3^{\circ}\text{C}$.

С 1988 г. в районе трубки Удачная начали регулярно выполняться гидрогеологические режимные наблюдения за динамикой уровня подземных вод, гидрохимическим режимом подземных и поверхностных вод и водопритоками в действующий карьер месторождения. С 2001 г. дренажные воды карьера и строящегося рудника Удачный удалялись на Киенгский полигон, а в 2013 г. заработал полигон Левобережный. Для поиска и ввода в действие полигонов захоронения и реализации планов закачки карьерных вод, а в последующем и шахтных в геологические структуры был выполнен значительный комплекс специальных геологоразведочных и научно-исследовательских работ с осуществлением опытно-промышленных закачек.

Геоэкологическая изученность и оценка геоэкологической ситуации. Геохимическое изучение Западно-Якутского региона начато с 1960-х годов при производстве геолого-съёмочных работ масштаба 1:200 000, а с 1970-х годов и при съёмке масштаба 1:50 000 [27].

Являясь составной частью геологоразведочной съёмки (ГРС), геохимические работы были ориентированы на изучение геохимии малых элементов осадочных и магматических пород. По данным Б.С. Ягнышева [28], степень геохимической изученности территории Далдыно-Алакитского района составляет 51,7%, это порядка 29 500 км², из них 1750 км² – это участки поисково-оценочных работ по потокам рассеяния, 450 км² – площади поисковых работ по вторичным ореолам рассеяния и 750 км² – проведение поисковых работ по первичным ореолам.

Геоэкологическое изучение территории и комплексный экологический мониторинг основных компонентов экосистем, в том числе и биотической составляющей, проводится с 1999 г. с оценкой параметров местного/локального геохимического фона депонирующих сред экосистемы территории промышленной площадки и прилегающих площадей [4, 6, 16, 19, 22, 24].

Формирование современного почвенного покрова Далдыно-Алакитского района происходит на фоне предшествующего периода длительной денудации, в результате которого на уровне современного эрозионного среза доминирующее положение приобрели карбонатные породы раннего палеозоя. Они выступают в роли почвообразующего субстрата, определяя тем самым «карбонатную» направленность существующих геохимических процессов при главенствующем положении Ca-Fe-Mg компонентов природных сред. Уровень содержаний макро- и микроэлементов осадочных пород отвечает параметрам регионального геохимического фона и отражает характер общей геохимической специализации региона. Таким образом, в плане Далдыно-Алакитского алмазоносного района выявлены как природные, так и техногенные геохимические аномалии, генетически связанные с участками известных кимберлитовых тел, в том числе трубок Удачная и Зарница, с зонами глубинных разломов разной ориентации и дизъюнктивных нарушений. Существенное влияние на параметры местного геохимического фона оказывают регионально распространённые подземные водоносные горизонты, в составе которых присутствуют высокоминерализованные рассолы, насыщенные Li и Sr [27]. При этом природная геохимическая аномальность почв, унаследованная от подстилающих пород, служит причиной вариации биогеохимических параметров абиотических компонентов естественных и антропогенных экосистем.

Почвенный покров территории Далдынского и Алакитского кимберлитовых полей, сформированный в результате действия биогенно-аккумулятивных, иллювиально-аккумулятивных и криотурбационных процессов, характеризуется концентрациями микроэлементов, находящимися на уровне или несколько выше значений регионального фона [16–18]. Микроэлементные характеристики доминирующих типов почв отражают накопительные ряды. Тип почв дан по работе [12]:

Глеезём перегнойный – Oh-G-CG:
 $Sc_{1,4} \rightarrow Mn_{1,3} \rightarrow Yb_{1,2} \rightarrow Ti(Ag)_{1,1} \rightarrow Ge_{1,0}$
 Криозём глееватый – O-CRg-Cg:
 $Sc_{1,3} \rightarrow Ti(Ge-Y-Yb)_{1,2} \rightarrow Mn(Nb-Sn)_{1,1} \rightarrow Ni(Zn)_{1,0}$
 Криозём типичный – O-CR-C:
 $Sc_{1,4} \rightarrow Ge(Y-Yb)_{1,2} \rightarrow Be(Ti-Sn)_{1,1}$
 Криозём тиксотропный – O-CR-C:
 $Ge_{1,6} \rightarrow Ni(Zn)_{1,3} \rightarrow Sn_{1,2} \rightarrow Li(Y)_{1,1}$
 Карбопетрозём гумусовый – O-Rca:
 $Sc(Ti)_{1,4} \rightarrow Y_{1,2} \rightarrow Ge(Yb)_{1,1} \rightarrow P_{1,0}$
 Мерзлотные аллювиальные – W-C:
 $Ni_{1,4} \rightarrow Ge_{1,3} \rightarrow Mn(Ag-Sn)_{1,1} \rightarrow Mo(Sc)_{1,0}$

В целом пространственное распределение микроэлементного состава почв характеризуется повышенными концентрациями широкого спектра элементов: Cr, Ni, Co, Ti, Cu, Y, Nb, Li, Be, Sr (табл. 1). В зависимости от кислотно-щелочных и окислительно-восстановительных условий, от направленности мигрирующей влаги и органического вещества в почвенном покрове и профиле почв формируется свой облик пространственного и внутрипрофильного распределения.

Наибольший вклад в состав полиэлементной техногенной аномалии, образовавшейся в зоне воздействия Удачинского ГОКа, вносят высокие содержания подвижных форм никеля, кобальта и хрома, то есть элементов, являющихся индикаторами кимберлитового магматизма и в больших количествах присутствующих в породах ордовика и кембрия в зоне экзоконтакта с кимберлитами трубки Удачная. Поэтому уровень загрязнения по содержанию подвижных форм микроэлементов повышается в промышленной зоне, где эпицентр техно-

ногенного воздействия приходится на борта карьера, отвалы пустых пород, хвостохранилища, территории Киенгского и Октябрьского полигонов закачки дренажных и высокоминерализованных вод (табл. 2). В результате общего уклона местности в сторону р. Далдын основной вектор шлейфа техногенных потоков рассеяния также обращён в направлении реки.

Таким образом, основной поток миграции подвижных форм микроэлементов в поверхностных горизонтах почв в зоне воздействия Удачинского ГОКа имеет северо-восточное направление от промышленной площадки.

Основным водным объектом территории является р. Далдын, левый приток р. Марха. Абсолютные отметки истока 465 м и устья 252 м, общее падение 213 м, или 154 см на 1 км. По естественному характеру русла р. Далдын можно разделить на два участка. Первый (60,4 км) от истока до устья р. Сытыкан и второй (77,6 км) от впадения р. Сытыкан до устья. На первом участке река представляет собою маломощный поток, изобилующий каменистыми перекатами [25]. На втором участке ширина долины поверху 8–9 км, уменьшающаяся выше руч. Орто-Бысытта до 5 км. Основная доля техногенной нагрузки приходится именно на второй участок реки, где на правом берегу расположены карьер трубки Удачная, отвалы, хвостохранилище на руч. Новый, полигон Киенгский. Участие подземных вод незначительно. По классификации О.А.Алекина [1], с начала 1960-х годов состав воды в среднем по реке значительно не меняется и остаётся постоянным. Относится к

1. Валовое содержание микроэлементов в профиле почв Далдынского кимберлитового поля

Горизонт (глубина отбора проб, см)	Элемент (вес.%)													
	Li	B	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Y	Nb	Sn	Pb
Криозём глееватый на породах Меикской свиты раннего силура														
O (0–5)	3,25	1,33	5,56	3,93	2,4	19,13	0,7	1,05	2,2	3,0	5,8	0,5	0,33	0,3
CRg (5–18(20))	5,5	1,48	3,33	9,74	7,33	7,4	0,05	3,3	2,5	5,68	7,33	1,47	1,18	0,5
Cg (18(20)–30)	5,78	2,07	0,2	7,03	1,5	10,87	0,02	7,55	1,5	7,12	3,19	0,52	2,06	0,7
Глеезём перегнойный на кимберлитах трубки Юность														
Oh (0–5)	1,33	1,0	7,0	11,6	15,0	16,6	5,2	12,3	2,33	4,3	4,3	–	0,83	0,11
G (5–20)	1,66	0,16	10,0	3,33	43,3	25,0	10,7	66,6	5,0	7,0	2,5	–	1,3	0,62
CG (20–85)	1,33	1,83	10,0	6,33	50,1	126,6	11,6	116,6	5,3	7,0	1,5	–	1,25	0,5
Криозём типичный Сохсолохской свиты раннего ордовика														
O (0–5)	10,0	2,21	5,58	7,08	10,0	7,2	1,5	7,1	2,2	5,13	5,0	1,0	2,0	0,3
CR(5–23)	7,0	3,01	2,0	3,75	12,75	10,0	5,56	5,38	7,9	8,51	3,3	2,25	1,16	0,5
C (23–40)	7,5	1,56	3,64	1,3	5,9	5,3	0,7	1,14	1,3	5,01	2,0	0,5	2,5	0,5
Карбопетрозём гумусовый на породах Моркокинской свиты позднего кембрия														
O (0–1)	3,0	2,1	5,1	1,5	3,0	10,7	0,2	1,0	2,0	5,6	5,0	1,0	0,5	0,3
R _{Ca} (1–5)	7,0	3,33	7,53	5,34	3,0	9,87	0,5	1,5	2,05	2,73	7,33	0,5	1,0	0,3
C _{Ca} (5–17)	15,0	3,5	5,06	1,5	3,0	10,3	0,33	2,0	2,0	5,0	3,19	1,5	2,0	1,13

2. Характер накопления микроэлементов в грунтах и почво-грунтах техногенно-преобразованных ландшафтов территории Далдынского кимберлитового поля

Тип техногенных площадок	Микроэлементный ряд
Отвалы карьера трубки Удачная	Li ₁₀ >Ga _{6,7} >Y _{4,8} >Ge _{4,3} >B _{3,3} >Sn _{3,2} >Sc _{2,9} >Mn _{2,7} >Pb _{2,6} >Ti _{2,3} >Cu _{2,1} >>Be _{2,0} >Cr _{1,9}
Полигон Киенгский	Li _{9,9} >Sr _{7,5} >Mn _{3,5} >V _{3,4} >Ag(Pb) _{2,7} >Sn _{2,1} >Cu _{1,7} >Ga(Y) _{1,6}
Хвостохранилище II очереди на руч. Новый	Li _{9,9} >Ga _{7,4} >Sn _{3,0} >V _{2,7} >Ag _{2,6} >Pb _{2,2} >Mn(Ge, Y) _{1,9} >Ni _{1,8} >Cu _{1,5}
Полигон Октябрьский	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}
Селитебные территории г. Удачный	Pb _{9,2} >Li _{6,5} >Ga _{4,4} >V _{2,1} >Ag _{2,0} >Sn _{1,8} >Mn _{1,5}
Дорожные насыпи	Li _{12,2} >Ga _{4,2} >Pb _{3,4} >Ge _{2,3} >Ag(Cr) _{2,0} >Sn _{1,9}

гидрокарбонатному классу: в анионном составе преобладают гидрокарбонат-ионы, а в катионном – кальций и магний. Жёсткость воды достигает наибольших значений в конце зимы и наименьших – в период половодья; в среднем р. Далдын относится к водооткам средней жёсткости. В разные периоды времени общая минерализация вод варьирует в широких пределах и в среднем составляет 207,06–750 мг/дм³, отмечены невысокие превышения предельно-допустимых концентраций для рыбохозяйственного значения по Вг, Mn, Zn, Fe, Cr и Cu [14–15, 20, 23, 26–27].

Для бассейна р. Далдын влияние высокоминерализованных вод можно проследить по наличию высоких концентраций Li, Sr, Ba, а также поступлению с поверхностным стоком Mn, Cu и Fe (табл. 3).

Обсуждение результатов и выводы. Опыт создания бессточных поверхностных рассолонакопителей в криолитозоне показывает, что длительное хранение рассолов на естественном основании из трещиноватых пород, даже при создании специальных противоточных экранов, трудно осуществимо, и их эксплуатация сопровождается достаточно серьёзными экологическими проблемами [30, 31, 34]. Удачный ГОК АК «АЛРОСА» – первое предприятие, где внедрён способ захоронения дренажных рассолов в многолетнемёрзлые породы, не имеющий аналогов в отечественной и мировой практике. Принятые схемы удаления минерализованных стоков ориентированы на изменение состояния криогидрогеологической структуры за счёт воздействия высококонцентрированных рассолов на подземные льды, вызывающее их плавление и замещение. По существу, подобное целенаправленное изменение мерзлотно-гидрогеологических условий используемых участков обеспечивает возмож-

ность эксплуатации алмазоносных трубок и является уникальным и оправданным воздействием на подземную криогидросферу в самом широком смысле этого понятия.

Каждый природный подземный резервуар для захоронения промышленных стоков в криолитозоне характеризуется взаимозависимыми геологическими, гидрогеологическими, геокриологическими и гидрохимическими параметрами среды, обуславливающими эффективность его использования. Они определяют фильтрационно-ёмкостные свойства потенциальных для утилизации стоков толщ горных пород: участков подземной криогидросферы; граничные условия резервуара; физико-химические показатели среды для захоронения; температурный режим используемых для закачки толщ пород и перекрывающего криогенного массива; совместимость природных вод и закачиваемых промышленных стоков; экранирующие свойства многолетнемёрзлых пород и их динамику во времени. Динамика по показателям ежегодных объёмов (V) откачанных вод и их минерализация (M) показана на рис. 2.

Следует отметить, что дренажные воды не относятся в полном смысле к специфическим отходам каких-либо производств. Это обычные для района подземные рассолы, извлекаемые при осушении карьера. Дополнительное влияние на них оказывают примесь поверхностных вод и взаимодействие с кимберлитами в зоне горных работ, а также свободный контакт с атмосферными газами. Поэтому дренажные и подземные воды являются химически однородными хлоридными растворами со сходным набором катионов, полностью смешивающимися между собой. Они сосуществуют с вмещающими породами миллионы лет и поэтому равновесны с ними. Перекачка не ведёт к коренному

3. Среднее содержание микроэлементов в поверхностных водах бассейна р. Далдын (в мг/дм³)

Год	Бассейн р. Далдын					
	Li ⁺	Sr ²⁺	Ba ²⁺	Mn	Cu	Fe
2013 (n=33)	0,03	0,95	1,52	0,019	0,0028	0,09
2014 (n=30)	0,09	0,69	0,12	0,01	0,0026	0,06
2017 (n=23)	0,02	0,16	0,58	0,008	0,0077	0,02

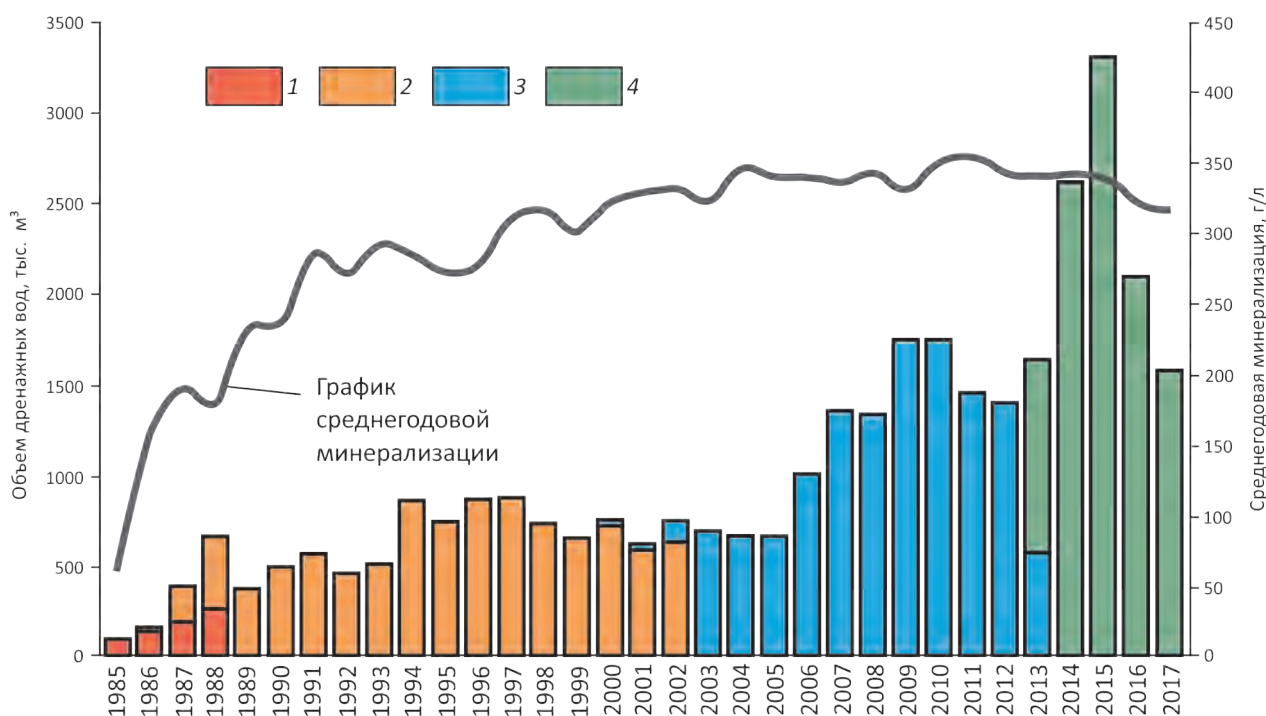


Рис. 2. Динамика изменения откачки-закачки шахтовых и дренажных вод по состоянию на 01.08.2017 г.:

1 – в накопитель (733,9 тыс. м³); в скважины: 2 – Октябрьского полигона (9905,5 тыс. м³), 3 – полигона Киенг (12 914,5 тыс. м³), 4 – Левобережного полигона (11 316,1 тыс. м³)

изменению их качества. На 99% это хлориды, обладающие наибольшей миграционной способностью из прочих компонентов водных растворов [9].

Система «многолетнемёрзлые породы–дренажный рассол» представляет собой природно-техногенную геосистему, нестабильность которой определяется изменениями температурных, механических, физико-химических и химических показателей её составных элементов. Химическое взаимодействие обуславливает возникновение процессов растворения, ионного обмена, окислительно-восстановительных реакций. Физико-химическое взаимодействие приводит к структурно-текстурным преобразованиям, вызывающим изменение криогенного строения, образованию льдопородных пробок и других процессов, оказывающих существенное влияние на фильтрационные и ёмкостные свойства горного массива. В каждой точке осадочной породы поровый раствор должен находиться в равновесии с соприкасающимся с ним минералом. Всякое изменение термодинамических условий приводит к тому, что поровый раствор, с одной стороны, становится активным растворителем, с другой, средой первичной аккумуляции и перераспределения химических элементов и соединений [26].

Тектонические зоны нарушений создают благоприятные условия для активной миграции подземных вод

и определяют области их разгрузки на дневную поверхность при нарушении гидрогеодинамического режима [20]. Эти процессы активизируются при нарушении общего пьезометрического уровня подземных вод и за счёт изменения параметрических давлений, подъём высокоподвижных химических элементов к дневной поверхности становится более интенсивным.

В ноябре 2012 г. сотрудниками Министерства охраны природы РС (Я) в бассейне р. Далдын в районе устья руч. Киенг-Юрях на территории Киенгского полигона был обнаружен выход высокоминерализованных вод. Сотрудниками Министерства охраны природы и Научно-исследовательского института прикладной экологии Севера СВФУ (2013–2014 гг.), а также Института геологии алмазов и благородных металлов СО РАН (2017 г.) были проведены исследования влияния выхода на водную систему р. Далдын. В 2013–2014 гг. это был точечный источник с чёткой границей, из которого вытекал ручёк, на поверхности воды был отмечен лёд (рис. 3, А–В). Из-за проведённых в 2017 г. мероприятий по устранению выхода (распашка земли тяжёлой гусеничной техникой), он уже имеет нечёткие границы (течение и сток практически отсутствуют) и представляет собой небольшой водоём, на поверхности воды которого лёд отсутствует (см. рис. 3, В).



Рис. 3. Выход высокоминерализованных вод в районе исследования:

в период: А и Б – 2013 г., В – 2014 г., Г – 2017 г.

Результаты исследования воды из источника высокоминерализованных вод на Киенгском полигоне представлены в табл. 4. Химико-аналитические работы проведены в Лаборатории физико-химических методов анализа НИИПЭС СВФУ (2013–2017 гг.), в центре коллективного пользования физико-химических методов анализа ИГАБМ СО РАН (2017 г.) по общепринятым методикам.

Вода заводи имеет высокую минерализацию до 3,9 г/дм³ и слабокислую среду. Состав воды преимущественно хлоридно-натриево-кальциево-магниевый. Превышения нормативов ПДК_{вр} отмечаются по: Na_{2,3} < K_{2,9} < Mg_{5,1} < Cl_{9,8} < Cu₁₄ < Li₁₆ < Sr₂₆. Наличие в заводи экстремально высоких содержаний лития, стронция, хлоридов и меди указывает на влияние подземных высокоминерализованных вод, так как других

4. Химический состав воды из выхода высокоминерализованных вод (2013, 2017 гг.)

Показатель	2013 г.		2017 г.
	Фазы		
	Жидкая	Твёрдая	Жидкая
Минерализация, г/дм ³	270,0	4,9	0,44
Водородный показатель pH	6,2	6,3	6,5
Ионный состав	Cl-Na	Cl-Ca	Cl-Na-Mg
Микроэлементы, превышающие ПДК _{вр}	Fe _{7,0} < Cu _{9,1} < Ba _{48,6} < Mn ₉₉ < Sr ₇₇₅	Li _{16,3} < Fe _{21,8} < Cu ₃₀ < Sr ₃₅ < Mn ₁₃₀	Sr _{1,9} < Mn _{2,0} < Li _{2,5} < Cu ₂₀

источников поступления этих элементов на поверхность нет.

В целом для бассейна р. Далдын влияние высокоминерализованных вод можно проследить по увеличению содержания Cl^- , наличию высоких концентраций Li, Sr, Ba, а также поступлению с поверхностным стоком Mn, Cu и Fe. Таким образом, основное влияние выхода минерализованных вод на почвы прослеживается по высоким концентрациям Li, Sr, Ga по всему профилю, а на поверхностные воды р. Далдын – ураганными значениями Cl^- , Li, Sr, Ba.

Введение в 2013 г. в эксплуатацию нового полигона «Левобережный» немного сняло геоэкологическую напряжённость, 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, в среднем составляет: в 2013 г. 394,9 мг/дм³, в 2017 г. 339 мг/дм³. В районе выхода высокоминерализованных вод на поверхность отмечается повышение минерализации поверхностных вод в р. Далдын в 2013 г. до 2,2 г/дм³, в 2017 г. до 1,04 г/дм³.

Вопросы взаимодействия подземных вод с зоной радиоактивного загрязнения под саркофагом мирного ядерного взрыва «Кристалл», произведённого в 1974 г., вызывают тревогу [5]. При превышении ёмкостных возможностей полигона Левобережный существует опасность радиоактивного загрязнения дренажных вод и дальнейшего их распространения по участкам захоронения и так далее. Следует отметить, что участок Левобережный имеет расчётную ёмкость порядка 11–13 млн. м³. Это обеспечивает возможность захоронения рассолов с дебитами от 270 до 350 м³/час в течение пяти, а может быть, и шести лет.

Безусловно, важным элементом природоохранных мероприятий является гидрохимический мониторинг поверхностных вод р. Далдын и её притоков, прежде всего левых, и в зонах вероятного выхода подземных вод.

В целом подземное захоронение дренажных рассолов в толще многолетнемерзлых пород криолитозоны явилось наиболее прогрессивным направлением в решении экологических проблем региона при отработке крупнейшего алмазного месторождения – трубки Удачная. В настоящее время предусматривается аналогичным образом осуществлять ликвидацию минерализованных стоков и на других алмазных месторождениях: Айхал, Комсомольская, Юбилейная, Нюрбинская, Ботуобинская, трубках Верхне-Мунского поля. По сравнению с другими методами удаления сточных вод, этот способ ликвидации жидких отходов горного производства имеет преимущества практически во всех аспектах его рассмотрения (технических, технологических, финансовых и экологических) [11]. В последующем он может применяться не только на

алмазодобывающих предприятиях Западной Якутии, но и в других областях, которым свойственно развитие мощных толщ многолетнемерзлых пород. При этом необходимо помнить, что наиболее рациональным считается использование гравитационной ёмкости природных геологических образований или природно-техногенных резервуаров с безнапорным режимом закачки и складирования жидких отходов разных производств. Поэтому при выборе наиболее экологически безопасного варианта удаления или складирования разного вида промстоков в криолитозоне должна учитываться не только вся совокупность показателей резервуара, но и геоэкологическая безопасность применения данного способа утилизации для компонентов экосистемы.

Работа выполнена в рамках Госзадания на 2018 – 2020 гг. по проекту НИР 0381-2016- 0003 (№ госрегистрации: АААА-А17-117021310214-9) «Эколого-геохимическое изучение техногенных массивов на территории Якутской алмазодобывающей провинции».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алекин О.А.* Основы гидрохимии: монография. – Л.: Гидрометеониздат, 1953.
2. *Алексеев С.В.* Криогидрогеологические системы Якутской алмазодобывающей провинции. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2009.
3. *Апрощенко Ф.Г.* Оценка гидрогеологических условий подземной разработки месторождения трубки «Удачная» // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2012. № 5. С. 414–421.
4. *Вольперт Я.Л., Мартынова Г.А.* Основные направления минимизации воздействия алмазодобывающей промышленности Якутии на окружающую среду // Горный журнал. 2011. № 1. С. 100–102.
5. *Геоэкологическая модель района мирного подземного ядерного взрыва «Кристалл» (Якутия) / С.Ю.Артамонова, Л.Г.Бондарева, Е.Ю.Антонов, Н.О.Кожевников* // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2012. № 2. С. 143–158.
6. *Данилов П.П., Легостаева Я.Б., Саввинов Г.Н.* Техногенные ландшафты и их влияние на естественный почвенный покров Западной Якутии // Вестник Якутского государственного университета. 2005. Т. 2. № 3. С. 70–75.
7. *Дроздов А.В.* Природные и техноприродные резервуары промышленных стоков в криолитозоне на примере Якутской части Сибирской платформы: монография. – Якутск: Издательско-полиграфический комплекс СВФУ, 2011.
8. *Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В.* Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. – Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2008.
9. *Дроздов А.В., Попов В.Ф.* Захоронение дренажных рассолов трубки Удачная в многолетнемерзлоту: монография // Саарбрюккен: LAPLAMBERTAcademicPublishing, 2012.

10. Дроздов А.В., Попов В.Ф., Поморцев О.А. Удаление высокоминерализованных вод алмазодобывающих предприятий в многолетнемёрзлые породы криолитозоны (на примере Удачинского ГОКа) // Отечественная геология. 2011. № 6. С. 64–71.
11. Дроздов А.В., Толстихин О.Н., Попов В.Ф. Экологические последствия эволюции подземной криогидросферы вблизи алмазоносных месторождений Якутии // Подземная гидросфера: мат-лы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России. – Иркутск: Изд-во ООО «Географ», 2012. С. 69–73.
12. Классификация и диагностика почв России / Л.Л.Шишов, В.Д.Тонконогов, И.И.Лебедева, М.И.Герасимова. – Смоленск: Ойкумена, 2004.
13. Климовский И.В., Готовцев С.П. Криолитозона Якутской алмазосной провинции. – Новосибирск: Наука, 1994.
14. Ксенофонтова М.И. Качество воды Сытыканского водохранилища // Наука и образование. 2009. № 1. С. 74–79.
15. Ксенофонтова М.И., Пестрякова Л.А. Экологическая оценка состояния поверхностных вод северо-таёжных ландшафтов на примере бассейна р. Далдын: мат-лы научно-практической конференции «Принцип экологического императива при промышленном освоении Арктической зоны РС (Я), посвящённой памяти Н.Е.Андросова» 15–16 мая 2007 г. – Якутск, 2007. С. 23–25.
16. Легостаева Я.Б. Экологическая значимость микроэлементного состава почв Далдынского кимберлитового поля // Проблемы региональной экологии. – М.: Изд-во «Камертон», 2008. № 2. С. 15–20.
17. Легостаева Я.Б., Мартынова Г.А. Анализ микроэлементного состава грунтов и почво-грунтов селитебных территорий Западной Якутии // Горный журнал. 2011. № 10. С. 78–81.
18. Легостаева Я.Б., Саввинов Г.Н., Данилов П.П. Оценка экологической ситуации в Западной Якутии по показателям загрязнения почвенного покрова // Современные наукоёмкие технологии. 2004. № 5. С. 83–85.
19. Легостаева Я.Б., Ягнъшев Б.С. Биогеохимические показатели техногенного загрязнения экосистем в районе деятельности алмазодобывающих предприятий Якутии // Наука и образование. 2003. № 3. С. 110–113.
20. Ломоносов И.С., Дзюба А.А. Роль рассолов в гидрохимическом режиме рек. Западная Якутия. – Новосибирск: Наука: Сиб. отделение, 1987.
21. Мерзлотно-гидрогеологические условия Восточной Сибири / В.В.Шепелев, О.Н.Толстихин, В.М.Пигузова и др. – Новосибирск: Наука, 1984.
22. Поздняков А.И., Вольперт Я.Л. Анализ воздействия алмазодобывающей промышленности на окружающую среду северо-западной Якутии // Проблемы региональной экологии. 2008. № 2. С. 24–28.
23. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 17 Лено-Индигирский район // Под ред. М.С.Протасьева. – Л.: Гидрометеоиздат, 1972. С. 384–408.
24. Саввинов Г.Н., Данилов П.П., Петров А.А. Проблемы рекультивации хвостохранилищ обогатительных фабрик алмазодобывающей промышленности Западной Якутии // Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства IV международная научная экологическая конференция (с участием экологов Азербайджана, Армении, Беларуси, Германии, Грузии, Казахстана, Киргизии, Латвии, Ливана, Молдовы, Приднестровья, России, Словакии, Узбекистана и Украины). – Краснодар, 2015. С. 426–429.
25. Чистяков Г.Е. Водные ресурсы рек Якутии. – М.: Наука, 1964.
26. Шварцев С.Л. Фундаментальные механизмы взаимодействия в системе вода–горная порода и ее внутренняя геологическая эволюция // Литосфера. 2008. № 6. С. 3–24.
27. Экология Западной Якутии. Геохимия геосистем: состояние и проблемы / Б.С.Ягнъшев, Т.А.Ягнъшева, М.Н.Зинчук, Я.Б.Легостаева. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2005. С. 432.
28. Ягнъшев Б.С. Новые данные о биогеохимических ореолах кимберлитов // Отечественная геология. 2003. № 3. С. 42–46.
29. Drever J.I. The Chemistry of Natural Waters: Surface and Ground water Environments. Prentice-Hall Inc., 1997.
30. 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.
31. Negative pH and Extremely Acidic Mine Waters from Iron Mountain, California / D.K.Nordstrom, C.N.Alpers, C.J.Ptacek, D.W.Blowes // Environmental Science and Technology. 2002. № 34(2). P. 254–258.
32. Static Tests of Neutralization Potentials of Silicate and Aluminosilicate Minerals / J.L.Jambor, J.E.Dutrizac, L.A.Groat, M.Raudsepp // Environmental Geology. 2002. № 43. P. 1–17.
33. Pfeifer H.R. A Model for Fluids in Metamorphosed Ultramafic Rocks: Observations at Surface and Subsurface Conditions (High pH Spring Waters) // Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen. 1977. № 57. P. 361–396.
34. Sato T., Akita N. and Arai S. Geochemical Modelling of Hyperalkaline Spring Water and Precipitates at the Oman Ophiolite // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2002. 66 (15A).