

УДК 504.05+550.46
DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4862
Шифр специальности ВАК: 1.6.21
Научная статья

Особенности химического состава водных стоков на эпицентре мирного подземного ядерного взрыва «Кристалл» (Якутия), свидетельствующие об аварийности взрыва

С.Ю. Артамонова✉

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Россия, г. Новосибирск

✉artam@igm.nsc.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью оценки геоэкологического состояния объектов мирных подземных ядерных взрывов, проведенных вблизи городов и в горнодобывающих районах, где идет эксплуатация недр, из-за рисков распространения радионуклидов. *Цель:* выявить процессы и взаимосвязи в геотехногенной системе «полость подземного ядерного взрыва – вмещающая геологическая среда – поверхностные экосистемы» путем изучения химического состава водных стоков на эпицентре взрыва. *Объект.* Для исследования выбран взрыв «Кристалл», проведенный в 1974 г. в мерзлых породах на глубине 98 м, в результате которого на эпицентре возник навал с провалившейся центральной частью и был вытолкнут фрагмент обсадной колонны боевой скважины длиной 12 м. *Методы:* полевые радиометрические измерения, жидкостно-сцинтилляционная спектрометрия, капиллярный зонный электрофорез, титриметрия, атомно-эмиссионная спектрометрия с микроволновой плазмой, масс-спектрометрический метод с индуктивно-связанной плазмой. Результаты химического анализа водных проб, отобранных на эпицентре подземного ядерного взрыва «Кристалл» и его окрестностях в 2019–2021 гг., соответствуют требованиям количественного анализа. *Результаты.* На эпицентре подземного ядерного взрыва «Кристалл» основным поставщиком воды, по-видимому, является атмосферная влага, конденсирующая в глыбово-щебнистой насыпи вследствие свободной конвекции воздуха. Сделан вывод, что выщелачивание известняков и доломитов, слагающих насыпь, и погребенных под насыпью техногенных материалов, вытолкнутых из боевой скважины при взрыве, а также вероятный выход газово-рассольно-водных флюидов по открытому стволу боевой скважины приводят к формированию смешанных по составу хлорид-гидрокарбонат-сульфатных магниевых-кальциевых солоноватых ультра-жестких водных стоков с тритием, Br, Sr, Li, I, K, Na. Допускается, что Li мог быть компонентом ядерного взрывного устройства.

Ключевые слова: подземный ядерный взрыв, радионуклиды, насыпь, геологическая среда, геотехногенная система, подземные рассолы, основной химический состав воды, тритий, Якутия

Благодарности: Аналитические работы проведены в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований СО РАН при Институте геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск), Аналитическом центре Института неорганической химии СО РАН (г. Новосибирск), в Томском центре коллективного пользования СО РАН (г. Томск). Цифровая модель рельефа навала на эпицентре подземного ядерного взрыва «Кристалл» подготовлена старшим научным сотрудником Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, кандидатом физико-математических наук Александром Николаевичем Шеиным.

Работа выполнена по государственному заданию Института геологии и минералогии СО РАН (№ 122041400237-8) и при поддержке гранта РФФИ № 18-45-140020 «Особенности ядерного техногенеза на примере объекта мирного подземного ядерного взрыва "Кристалл"» (рук. Светлана Юрьевна Артамонова) по государственному заказу № 43 (76-08), 23 (105-12), Ф.2019.473808 в рамках программы «Обеспечение экологической безопасности, рационального природопользования и развитие лесного хозяйства РС (Я)» на 2008–2012, 2018–2022 гг.

Для цитирования: Артамонова С.Ю. Особенности химического состава водных стоков на эпицентре мирного подземного ядерного взрыва «Кристалл» (Якутия), свидетельствующие об аварийности взрыва // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 9. – С. 161–182. DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4862

UDC 504.05+550.46
DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4862
Scientific paper

Features of chemical composition of water runoff at the epicenter of the peaceful underground nuclear explosion “Crystal” as the signs of its accident mode status

S.Yu. Artamonova✉

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

✉artam@igm.nsc.ru

Abstract. Relevance. The necessity to assess current geo-ecological situation of peaceful underground nuclear explosions sites near cities and mining deposits by the risks of radionuclides entering the human environment. **Aim.** To reveal processes and interconnections in geotechnogenic system “underground nuclear explosion cavity – host geological environment – surface ecosystems” by analyzing chemical composition of water runoffs at the explosion epicenter. **Object.** The research focuses on the peaceful underground nuclear explosion “Crystal” site, carried out in 1974 in the frozen rocks at the depth of 98 m. It resulted in an upthrust dome with a collapsed central part at the epicenter and the ejection of a 12-meter-long fragment of the casing column from the emplacement hole. **Methods.** Field radiometry, liquid scintillation spectrometry, capillary zoned electrophoresis, titration, atomic emission spectrometry with microwave plasma, mass spectrometry with inductively coupled plasma. The results of chemical analyses of surface water, sampled at the “Crystal” epicenter and its adjacent area in 2019–2021, meet the requirements for quantitative analysis. **Results.** Due to probably free air convection in the artificial cover, condensation of atmospheric moisture in the cover is main factor of water provision at the epicenter. Leaching of the limestone and dolomite material of the artificial cover, the technogenic materials of the emplacement hole, pushed onto surface, and underground gas-brine-water fluids, most probably rising along the open emplacement hole, lead to formation of mixing chloride-bicarbonate-sulfate magnesium-calcium brackish ultra-hard waters with ^3H , Br, Sr, Li, I, K, Na at the “Crystal” epicenter. It is admitted that Li^+ could be a component of the nuclear explosive device.

Keywords: underground nuclear explosion, radionuclides, artificial cover, geological environment, geotechnogenic system, underground brine, major water chemical composition, tritium, Yakutia

Acknowledgements: The work was carried out under the State Assignment of the Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS (no. 122041400237-8) and with support from the Russian Foundation for Basic Research Project no. 18-45-140020 “Features of nuclear technogenesis by the example of the object of the peaceful underground nuclear explosion Crystal” (under supervision of Svetlana Artamonova), according to state order no. 43(76-08), 23(105-12), F.2019.473808 within the framework of the program “Ensuring environmental safety, rational environmental management and development of forestry of the Republic of Sakha (Yakutia)” for 2008–2012, 2018–2022.

For citation: Artamonova S.Yu. Features of chemical composition of water runoff at the epicenter of the peaceful underground nuclear explosion “Crystal” as the signs of its accident mode status. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic university. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 9, pp. 161–182. DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4862

Введение

Подземные ядерные взрывы (ПЯВ) являются одним из наиболее сильных воздействий на геологическую среду: в результате расплавления и испарения пород в центре взрыва создается полость [1], которая, по сути, становится подземным пунктом размещения особых радиоактивных отходов (ОРАО) с большой длительностью существования (по десятикратному периоду полураспада долгоживущего изотопа ^{239}Pu – не менее 241 тысячи лет) и без внешних защитных барьеров, более того вместо них полость окружают подробленные и потрескавшиеся вследствие взрыва горные породы. Над центральной зоной взрыва (ЦЗВ) – столб обрушения,

зона откола на границе литосфера–атмосфера и потерявшее герметичность заколонное пространство боевой скважины (иногда и ствол боевой скважины) формируют единую ослабленную зону, проницаемую для флюидов [2]. При взрыве по проекту допускается выход в атмосферу малой части газообразных продуктов взрыва (первых процентов от общей активности) по этой ослабленной зоне.

Потенциальный риск распространения радионуклидов из ЦЗВ делает весьма актуальным радиоэкологические исследования даже по прошествии десятков лет после взрыва. Долгое время объекты ПЯВ оставались секретными, открытые радиоэкологические исследования начаты в 1990-е гг. и, по-видимому, ве-

дуются до сих пор ограниченно: в 2020 г. в корневой базе Web of Science в 2020 г. по ключевому слову «underground nuclear explosion» за период с 1977 по 2019 гг. найдено всего около 600 публикаций, из которых только половина посвящена геоэкологическим исследованиям объектов ПЯВ [3]. В настоящее время большинство работ, связанных с ПЯВ, посвящены вопросам разработки методов распознавания ПЯВ по изотопам благородных газов в атмосфере, по показателям сейсмической активности и др. [4–7].

При геоэкологических исследованиях на объектах ПЯВ водные пробы главным образом отбирают для изучения в них содержания радионуклидов для оценки их водной миграции [8, 9], при этом химический состав водных стоков, как правило, оставался вне внимания: в 2021 г. в корневой базе Web of Science уточняющий поиск по ключевым словам «water salinity», «anionic», «cationic», «water mineralization» в выборке, сформированной по ключевым словам «underground nuclear explosion», не дал результатов. Между тем химический состав вод может дать дополнительную информацию о геоэкологическом состоянии геотехногенных систем объектов ПЯВ.

Для изучения выбран объект ПЯВ «Кристалл», проведенный в четырех км от кимберлитовой трубки «Удачная» и в восьми км от одноименного г. Удачный – одного из промышленных центров добычи алмаза в Якутии. Объект ПЯВ «Кристалл» один из наиболее изученных: здесь проведены расчеты потенциальных доз облучения местного населения при посещении мест проведения ПЯВ [10], оценка загрязнения почв [11, 12], водной миграции радионуклидов [8, 9, 13], пионерные зондирования электроразведочными методами [14, 15], наземная магнитная съемка [3]. Но до настоящего времени детальный анализ химического состава водных стоков, вытекающих из-под насыпи на эпицентре ПЯВ «Кристалл», еще не проводился, и настоящая статья как раз восполняет этот пробел.

Целью исследования было выявить процессы и взаимосвязи в геотехногенной системе «полость подземного ядерного взрыва – вмещающая геологическая среда – поверхностные экосистемы» путем изучения химического состава водных стоков на эпицентре взрыва на примере объекта «Кристалл».

Геологическая среда района проведения ПЯВ «Кристалл» и ее гидрохимия

Объект ПЯВ «Кристалл» расположен на Сибирской платформе (рис. 1, а). Подстилающие породы, как и практически весь осадочный чехол мощностью до 2,2 км, сложены из известняков и доломитов и их глинистых разностей кембрийского возраста (залегающие в подошве осадочного чехла терригенно-карбонатные отложения венда мало-мощны – до 200 м, а отложения ордовика сохрани-

лись в виде отдельных островов на водоразделах). Осадочную толщу прорывают кимберлитовые трубки, редкие дайки долеритов. Район относится к Якутской алмазоносной провинции (рис. 1, б).

Район находится в зоне распространения многолетней мерзлоты. Верхний слой подстилающих горных пород мощностью 150–220 м содержит воду в виде льда, редко у подошвы мерзлых пород встречаются маловодные тонкие линзы межмерзлотных подземных вод (мощность составляет первые метры). С поверхности мерзлые породы летом слегка оттаивают, зимой обратно замерзают: мощность сезонно-талого слоя (СТС) составляет всего от 0,2 до 1,8 м в зависимости от экспозиции склона и растительного покрова [16]. Под руслами рек развиты талики, насыщенные надмерзлотными грунтовыми водами, тесно связанными с поверхностными водами. Сквозные талики характерны только под крупными реками. В окрестностях объекта «Кристалл» мощность мерзлых пород, содержащих воду в твердой фазе, по данным бурения 1973 г. составляла примерно 150 м.

Под многолетнемерзлыми породами выделяют пять водоносных горизонтов (комплексов) [17]: верхнекембрийский (ВВК), I и II среднекембрийские (СВК), нижнекембрийский (НВК) и вендский (V), насыщенные подземными рассолами. ВВК – маловодный, в нем слабонапорные рассолы со средней минерализацией 83 г/л распространены в виде отдельных линз. В 1973 г. на месте будущего объекта «Кристалл» при бурении исследовательской скважины на глубине 153 м были вскрыты подземные рассолы верхнекембрийского горизонта, уровень которых установился всего на 5 м выше на глубине 148 м.

Водоносным горизонтам (комплексам) I СВК, II СВК, НВК характерна высокая водообильность, к ним приурочены напорные хлоридные кальциевые рассолы с высокой минерализацией (до 450–480 г/л при средней минерализации 336 г/л) [17, 18]. Подземные рассолы ВВК, СВК, НВК насыщены газом, который в основном состоит из CH_4 (75–85 %), также присутствуют N_2 (2–10 %), тяжелые углеводороды (1,9–10 %), CO_2 ($\leq 2,8$ %), H_2 (0,1–1,2 %), He (примерно 0,2 %) [19]. С глубиной содержание газа в подземных рассолах растет: в подземных рассолах ВВК составляет примерно $0,3 \text{ м}^3/\text{м}^3$, в СВК и НВК – до $1,2 \text{ м}^3/\text{м}^3$, с глубиной в газе снижается доля N_2 , растет доля тяжелых углеводородов.

На кимберлитовой трубке «Удачная», где ведется добыча алмазов, существует актуальная геоэкологическая проблема из-за поступления в горные отработки (глубина шахты – до 900 м) подземных рассолов: их ловят упреждающей заградительной сетью скважин, затем закачивают в многолетнемерзлую толщу на специальных участках, размещенных на водораздельных ландшафтах района (рис. 1, б).

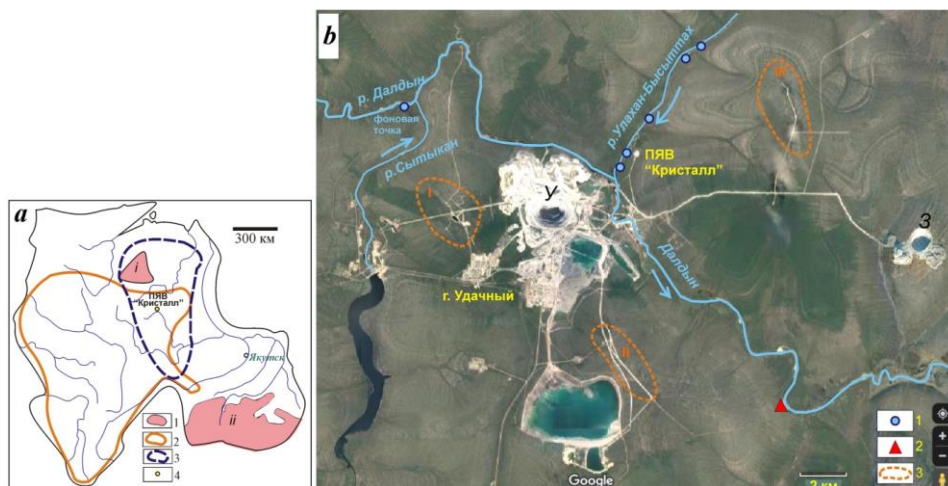


Рис. 1. Расположение объекта ПЯВ «Кристалл»: а) на Сибирской платформе; б) в бассейне р. Далдын, около разрабатываемых кимберлитовых трубок «Удачная» (У) и «Зарница» (З) (на основе космоснимка Google из открытых источников). Условные обозначения: а): (1) Анабарский (i) и Алданский (ii) щиты; (2) зона распространения сверхкрепких подземных рассолов Сибирской платформы; (3) Якутская алмазоносная провинция; (4) ПЯВ «Кристалл»; б): (1) точки отбора речной воды; (2) ручей X у высохшего источника на правом берегу р. Далдын (естественный выход подземных рассолов); (3) участки закачки дренажных рассолов в 1985–2002 (I), 2001–2013 (II) и с 2012 по н.в. (III)

Fig. 1. Peaceful underground nuclear explosions (PUNE) «Crystal» site: a) in the Siberian Craton; b) in the River Daldyn Basin nearby the mining kimberlite pipes «Udachnaya» (Y) and «Zarnitsa» (3) (on a Google map). Legend: a): (1) Anabar (i) and Aldan (ii) shields; (2) zone of high-mineralized underground brines of Siberian Craton; (3) Yakut Diamond-Bearing Province; (4) PUNE «Crystal» site; b) sampling points: (1) of river water; (2) creek X sourced near a dried spring in the right side of the Daldyn River; (3) sites of injection into permafrost layer of drainage brines supplying the quarry of Udachnaya pipe in 1985–2002 (I), 2001–2013 (II), and 2012 to present (III)

Таблица 1. Гидрохимическое зонирование подземных вод в районе ПЯВ «Кристалл» (до 10.02.1974 г.)*

Table 1. Hydrochemical features of underground waters in the area of PUNE Crystal (until 10.02.1974)*

U	H, м/м	S, г/л/g/L	Химический тип вод Water chemical type		min-max среднее**, мг/л/average**, mg/L					
			анионы anions	катионы cations	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Br	Sr	Li
Зона активного водообмена/Active water exchange zone										
A1	0–100	0,1-0,4 лед/ice	HCO ₃ ⁻ Cl ⁻ -HCO ₃ ⁻	Ca-Mg	0,7-472 66	42,7-366 153	--***	--	--	--
A2	100–120	~1 лед/ice	HCO ₃ ⁻ -Cl ⁻		15-25	1–2	0-4,58 0,49	0-0,13 0,04		
B	120–150	2-12 2,6 лед/ice	Cl ⁻	Na-Ca-Mg; Na-Mg-Ca	30-8013 1415	33-732 146	30-1135 213	5-56 17,8	0,2-12,6 5,5	0,15-2,3 0,73
Зона затрудненного водообмена/Hindered water exchange zone										
C	150–350	31-252 83 жидкие рассолы brines ВВК/UCA	Cl ⁻	Na-Ca-Mg	18600-163000 52700	120	980	60-2570 900	58-916 300	3-305 33,3
D	480–~1200	207-425 336 жидкие рассолы brines СВК+НВК MCA+LCA	Cl ⁻	Na-Mg-Ca	138000-254000 211600	200	200	2330-6470 4300	375-2140 1200	34-568 138

* – на основе схемы С.В. Алексеева [17] с учетом данных бурения 1973 г. [8, 14], **данные [17, 20, 21], *** – практически отсутствуют. U – гидрохимические зоны подземных вод (в виде льда в A1, A2, B; в виде газонасыщенных высокоминерализованных хлоридных жидких рассолов в C, D); H – глубина, м; S – минерализация подземных вод, г/л; водоносные горизонты: ВВК – верхнекембрийский, СВК – среднекембрийский I и II, НВК – нижнекембрийский.

* – on the basis of the scheme proposed by S.V. Alekseev [17] taking into account drilling data related to 1973 [8, 14], **the data reported in [17, 20, 21], *** – practically absent. U – hydrochemical zones of underground waters (in form of ice in A1, A2, B hydrochemical zones, and gas-saturated high-mineralized chloride liquid brines in C, D hydrochemical zones); H – depth, meter; S – total salinity of underground waters and brines, g/L; aquifers: UCA – Upper Cambrian, MCA – Middle Cambrian I and II, LCA – Lower Cambrian.

Химический состав поверхностных вод, надмерзлотных грунтовых вод (вод сезонно-талого слоя, подрусловых таликов) и подземного льда в промороженных породах на глубину до 100 м (на водоразделах до 150 м), выделенного в виде гидрохимической зоны А1 на табл. 1, определяют подстилающие известняки и доломиты: здесь сформированы пресные гидрокарбонатные магниево-кальциевые воды с минерализацией $\sim 0,1\text{--}0,4$ г/л (химический тип вод определяется по преобладающим ионам с содержанием >10 экв. %, в порядке роста их эквивалентного содержания) [17, 20, 21]. В подрусловых таликах крупных рек дополнительно выявлены пресные воды сульфатно-гидрокарбонатного состава [17].

Подземные льды на глубине 100–120 м (на водоразделах – около 180 м) становятся гидрокарбонатно-хлоридными, в них также появляются сульфаты, следовые содержания Br, Sr, Li, и эти льды формируют гидрохимическую зону А2 (табл. 1). Под А2 на глубине 120–150 м лед становится солончатым хлоридным, содержание Br, Sr, Li увеличивается, и здесь выделена гидрохимическая зона В (табл. 1).

Под слоем многолетнемерзлых пород на глубине от 150 до 350 м хлоридные Na–Ca–Mg рассолы ВВК формируют гидрохимическую зону С. Ниже 480 м рассолы трех водоносных горизонтов (I СВК, II СВК, НВК) по составу практически идентичны и формируют единую гидрохимическую зону D, широко распространенную на большей части Сибирской платформы (рис. 1, а): это высокоминерализованные хлоридные рассолы, среди катионов преоб-

ладает Ca, содержание которого растет с глубиной, в рассолах много Br – до 6,5 г/л, Sr – до 2,1 г/л, Li – до 568 мг/л, что позволяет рассматривать их в качестве гидроминерального сырья [17, 20–23]. Водоносный горизонт венда изучен мало, поэтому подземные воды этого водоносного горизонта не включены в гидрохимическое зонирование.

Краткая характеристика объекта ПЯВ «Кристалл»

Взрыв «Кристалл» мощностью 1,7 кт в тротиловом эквиваленте был проведен 02.10.1974 г. на левом борту р. Улахан-Бысытта в многолетнемерзлых породах на глубине 98 м (рис. 1, б). Это был первый из 12-ти взрывов, проведенных в Якутии, самый малоглубинный. Вообще, планировалось провести восемь взрывов для создания навалов высотой 27–30 м по линейному ряду поперек долины реки, как основы для строительства плотины хвостохранилища общей длиной 1800 м, шириной по гребню 85 м, и «Кристалл» был первым из них [9, 24]. Однако взрыв на эпицентре образовал навал высотой по гребню 10–14 м, т. е. в 2 раза ниже расчетной, с провалившейся центральной частью (рис. 2, а), что послужило официальной причиной для отказа от проведения остальных семи взрывов [24]. При небольшом уклоне рельефа и малой глубине взрыва эпицентр взрыва практически совпал с устьем боевой скважины. При взрыве был вытолкнут фрагмент обсадной колонны длиной 12 м с цементной пробкой [25], который продолжает оставаться около устья боевой скважины [3], ныне погребенный под глыбово-щебнистой насыпью.

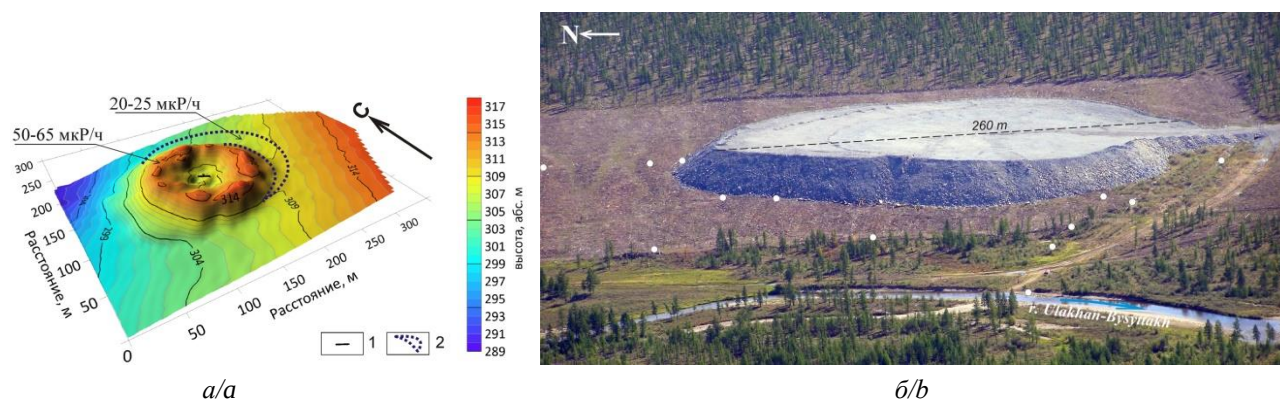


Рис. 2. а) Цифровая модель рельефа (ЦМР) навала с провальной воронкой на эпицентре ПЯВ «Кристалл». Условные обозначения: 1 – фрагмент обсадной колонны; 2 – загрязненный участок, прилегающий к навалу с северо-восточной стороны, и МЭД (мкР/ч) по данным замеров 1990 г. [25]; б) Глыбово-щебнистая насыпь поверх навала на эпицентре ПЯВ «Кристалл». На переднем плане – р. Улахан-Бысытта. Белыми кружками показаны видимые точки отбора водных проб. Фотография с вертолета, автор фото В.Е. Захаров (2007 г.)

Fig. 2. а) Digital elevation model (DEM) of the settled back upthrust dome. Symbols: 1 – fragment of emplacement hole casing; 2 – contaminated area near upthrust dome and gamma radiation exposure rate (EDR) ($\mu\text{R/h}$) in 1990 [25]; б) block-rubble artificial cover above the settled back upthrust dome at the PUNE Crystal epicenter. The river in the front is the Ula Khan-Bysyttakh. White circles mark visible water sampling points. Helicopter photograph, by V.E. Zakharov (2007)

Для прекращения эрозионных процессов под открытым небом и предотвращения рисков распространения радионуклидов навал вместе с устьем боевой скважины через 18 лет после взрыва, в 1992 г., были засыпаны глыбово-щебнистым материалом известняково-доломитового состава (из отвалов пустой породы карьера кимберлитовой трубки «Удачная»). В 1999 г. объект «Кристалл» был отнесен к аварийным из-за выявления загрязненных почв с северо-восточной стороны от засыпанного навала (рис. 2, *a*), в которых содержание техногенных радионуклидов превышало минимальные значения активности для твердых радиоактивных отходов, несмотря на то, что взрыв в целом был проведен в штатном режиме с выходом активности в проектных значениях [24, 26]. В 2006 г. насыпь была наращена с северо-восточной стороны для погребения загрязненного участка, в насыпи наморожен льдо-грунтовый слой толщиной около 0,6 м, который сверху перекрыли слоем щебня толщиной 3 м для термоизоляции [27]. Размеры насыпи достигли 260 м в диаметре при высоте от 7 до 20 м, тем самым было окончательно сформировано необустроенное приповерхностное захоронение ОРАО (все захоронения, где отходы размещены не глубже 100 м, относятся к категории приповерхностных) на эпицентре ПЯВ «Кристалл» (рис. 2, *b*). В условиях местного сурового климата, согласно расчетам, ожидали постепенное восстановление многолетней мерзлоты в насыпи и под ней, что приведет к надежной иммобилизации радионуклидов в захоронении [24, 28]. Площадка вокруг насыпи была очищена от растительного и лишайниково-мохового покровов и обнесена забором.

Методы и материалы

Полевые замеры мощности экспозиционной дозы γ -излучения (МЭД, мкР/ч) проводили с применением СРП-68-01 в условиях практически замерзшего СТС в октябре 2021 г.

Водные пробы отбирали из небольших ручейков, вытекающих из-под насыпи, и из мелких водоемов, сформированных в понижениях мелкополигонального холмистого микрорельефа, в подножье насыпи и рядом с ней, а также ниже по склону (рис. 3, *a*). Точки отбора речной воды (р. Далдын, р. Улахан-Бысытта) и ручья на правом борту р. Далдын, где до 2017 г. существовал соленый источник, показаны на рис. 1, *b*.

Отбор проб проведен в июле 2012 г., поздним летом в августе 2019 г. и в 2020 г. в летнюю межень, когда питание рек осуществлялось за счет дождевой воды и грунтовых вод подруслового талика и сезонно-талого слоя. В 2021 г. отбор проб был проведен в начале октября, в период предзимней межени, который предвещал засушливый летне-

осенний период, когда наблюдался очень слабый сток в местных реках при скудном питании грунтовыми водами в условиях ледостава.

Активность трития определяли жидкостно-сцинтилляционным методом на спектрометре-радиометре Quantulus-1220 фирмы PerkinElmer Inc (США) (аналитик – Г.В. Симонова). Пробы предварительно подвергали отгонке в присутствии перманганата и гидроксида калия. Аликвоты конденсата водяного пара водных проб объемом по 8 мл из каждой пробы помещали в пластиковые виалы, в каждую из которых добавляли по 12 мл сцинтиллятора Optiphase Hisafe3. После смешивания виалы закрывали пробкой и встряхивали в течение 2 минут до полного смешивания пробы со сцинтилляционным коктейлем. Перед измерением смесь выдерживали в темном и прохладном месте в течение 24 ч для стабилизации люминесценции. Время измерения одной пробы составляло от 8 до 24 ч, при таком накопительном измерении минимальная детектируемая активность ^3H была равна 1 Бк/л. Образцы растворов тритиевой воды изготавливали на основе стандарта ^3H (PerkinElmer unquenched LSC standard 1215-111) активностью 204500 dpm (на 1 февраля 2007 г.). Стандартное отклонение величины объемной активности трития в пробах поверхностных вод при активности 5–10 Бк/л менялось в диапазоне от 0,4 до 1,2 Бк/л, при активности >10 Бк/л – в диапазоне от 0,5 до 0,9 Бк/л.

Для изучения химического состава отбирали пробы в пластиковые бутылки объемом 1 л после их трехкратного споласкивания опробуемой водой, фильтрование через бумажный фильтр «синяя лента» проводили в день отбора. Для определения содержания микроэлементов часть пробы отливали в пробирку объемом 50 мл и консервировали добавлением концентрированной азотной кислоты из расчета 4 мл на 1 л. Пробирку предварительно промывали дистиллированной водой, трехкратно споласкивали фильтратом. Пробы воды хранили в холодильнике.

В лабораторных условиях концентрации хлорид-, сульфат-ионов определяли с применением метода капиллярного зонного электрофореза на системе «Капель 103Р» (НПФ «Люмэкс», РФ). Бикарбонаты определяли титриметрическим методом. Содержание катионов Ca, Mg, K, Na, Li определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с микроволновой плазмой на спектрометре 4100 MP-AES (Agilent Technologies, США) (аналитики – О.В. Шуваева, Е.В. Полякова). Содержание Br, I, Sr определяли масс-спектрометрическим методом с индуктивно-связанной плазмой на приборе Agilent 8800 с тройным квадруполом (Agilent Technologies, США) (аналитик – Д.Ю. Троицкий). Результаты химического анализа соответствуют требованиям количественного анализа. Относительная погрешность значений не превышает 20 %.

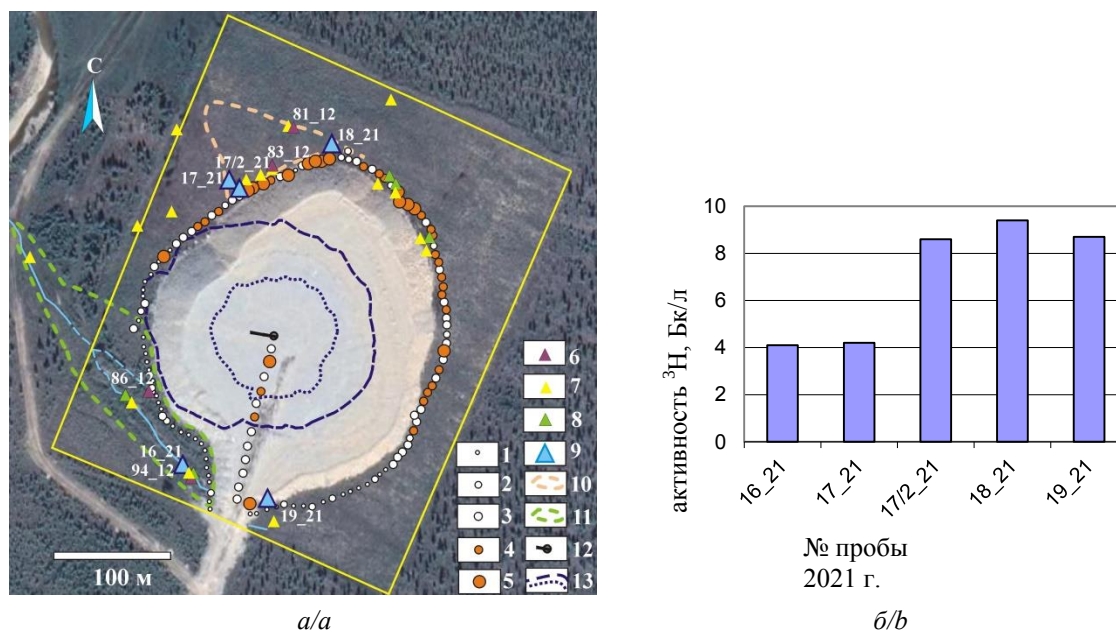


Рис. 3. а) распределение МЭД (мкР/ч): (1) 6–7; (2) 7,5; (3) 8; (4) 8,5; (5) 9–10 в 2021 г. и схема отбора проб водных стоков на эпицентре ПЯВ «Кристалл»: (6) 2012 г.; (7) 2019 г.; (8) 2020 г.; (9) 2021 г.; предположительные поля водных стоков в 2012 г.: (10) – хлоридные, (11) – смешанные техногенные; (12) – столб-репер над устьем боевой скважины; (13) – контуры подножья и гребня навала; б) активность трития ^3H (Бк/л) в водных пробах 2021 г.

Fig. 3. а) EDR distribution of gamma-radiation ($\mu\text{R/h}$): (1) 6–7; (2) 7,5; (3) 8; (4) 8,5; (5) 9–10 in 2021; and scheme of water sampling at the epicenter of the PUNE «Crystal»: (6) in 2012; (7) in 2019; (8) in 2020; (9) in 2021; presumed geochemical types of water runoff in 2012: (10) – chloride, (11) – mixed technogenic; (12) – benchmark of the emplacement hole; (13) – contours of bottom and ridge of the upthrust dome; б) activity of tritium ^3H (Bq/L) in water samples of 2021

Результаты

Распределение МЭД, активность ^3H в водных стоках в октябре 2021 г. приведены на рис. 3.

Результаты изучения химического состава водных стоков эпицентра ПЯВ «Кристалл» и речной воды отображены: минерализация (мг/л) и жесткость ($\text{rCa}^{2+} + \text{rMg}^{2+}$) (мг-экв/л) на рис. 4, а; содержание HCO_3^- , SO_4^{2-} и Cl^- (мг/л) на рис. 4, с, d; эквивалентное %-содержание основных ионов на рис. 4, b, и рис. 5 в виде треугольников Ферре (%-экв), содержание Br, Sr, Li (мг/л) на рис. 6, йода (мкг/л) на рис. 7.

Обсуждение результатов

Общий химический состав местных природных поверхностных вод

Прежде чем приступить к рассмотрению водных стоков эпицентра ПЯВ «Кристалл», посмотрим, какой химический состав присущ природным водам района. Многолетнемерзлая толща мощностью 150–200 м выполняет роль изолирующей крышки, отделяя местные поверхностные воды от подмерзлотных субнапорных и напорных подземных рассолов. В этих условиях питание местных рек: основного водотока – р. Далдын и его притоков р. Сытыкан и р. Улахан-Бысытта (рис. 1, b), как многих северных рек Якутии, обеспечивается главным образом за счет атмосферных осадков и талых вод (талого снега). Запасы грунтовых вод в таликах, развитых под

руслами рек, и в сезонно-талом слое, ограничены, что подтверждается резким снижением речного стока зимой до промерзания водотоков до самого дна. В этих условиях подстилающие горные породы являются главным фактором, определяющим химический состав местных поверхностных вод.

Поскольку фоновая точка служит контрольной базой для оценки естественного состояния поверхностных вод района и сравнительного анализа техногенного загрязнения вод, нужно было выбрать правильную фоновую точку, где поверхностные воды отвечали бы природному естеству, без возможного влияния техногенных источников, в особенности, объекта «Кристалл». Для этого могло бы подойти верховье р. Улахан-Бысытта на достаточном удалении от объекта «Кристалл», но в бассейне реки расположен участок закачки дренажных рассолов и нельзя исключить их возможное влияние на речную воду (рис. 1, b). Идеальным местом для выбора фоновой точки стало бы верховье р. Сытыкан выше водохранилища, но оно труднодоступно из-за отсутствия дорог. В результате фоновая точка выбрана в верховье р. Далдын, в 500 м выше устья правого притока – р. Сытыкан, примерно в 9 км выше по течению от промзоны г. Удачного и самого города, как и от объекта «Кристалл», также выше по течению от участка закачки дренажных рассолов (рис. 1, b).

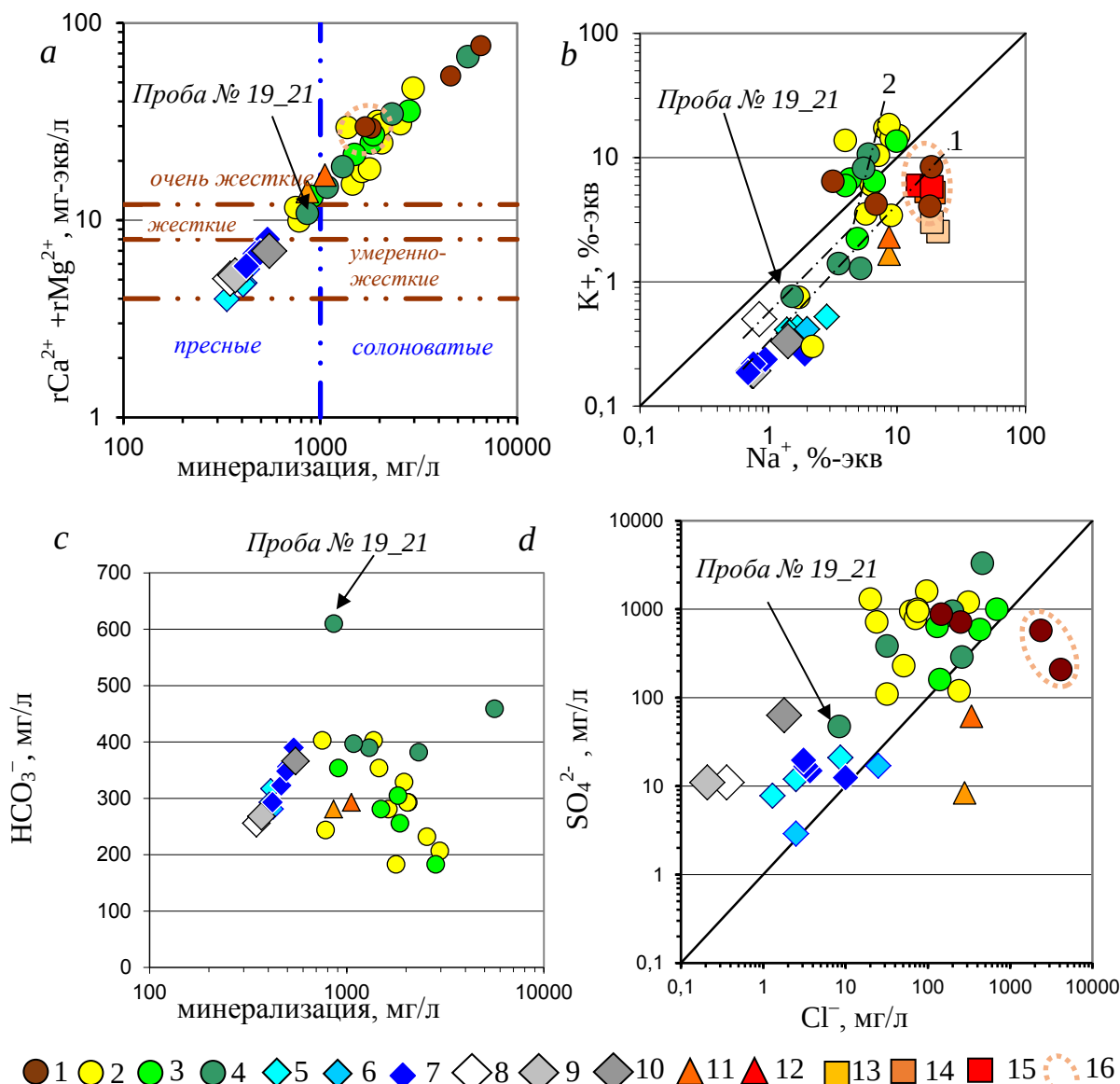


Рис. 4. Минерализация (мг/л), жесткость воды $rCa^{2+} + rMg^{2+}$ (мг-экв/л) (а), эквивалентное содержание K^+ , Na^+ (%-экв) (б), содержание HCO_3^- (мг/л) (с), SO_4^{2-} (мг/л), Cl^- (мг/л) (д) в водных стоках из-под насыпи на эпицентре ПЯВ «Кристалл»: 1 – 2012 г.; 2 – 2019 г.; 3 – 2020 г.; 4 – 2021 г.; в р. Улахан-Бысыттах: 5 – 2019 г.; 6 – 2020 г.; 7 – 2021 г.; р. Далдын (фоновой точке): 8 – 2019 г.; 9 – 2020 г.; 10 – 2021 г.; в ручье X, берущем начало у источника на правом борту р. Далдын: 11 – 2020 г.; 12 – 2021 г. (рис. 1, б); в подземных рассолах: 13 – ВВК; 14 – СВК+НВК; 15 – СВК около кимберлитовой трубки «Удачная» (данные по подземным рассолам из [17, 20, 21]); 16 – хлоридные стоки на северном подножье насыпи на эпицентре ПЯВ «Кристалл» в 2012 г. Даты отбора проб: 30.08–03.09.19 г., 07–14.08.20, 04–12.10.21, штриховой линией (а) показаны границы пресных и солоноватых вод разной жесткости, сплошной линией: (б) линия равного эквивалентного содержания катионов K^+ , Na^+ (в %-экв.), (д) линия равной концентрации анионов SO_4^{2-} , Cl^- (мг/л)

Fig. 4. (a) TDS (total salinity) (mg/L), $(rCa^{2+} + rMg^{2+})$ (mg-equiv./L); (b) equivalent percentages of K^+ and Na^+ (%-equiv.); (c) HCO_3^- (mg/L), (d) SO_4^{2-} (mg/L) and Cl^- (mg/L) contents in PUNE-related water sampled in different years: 2012 (1); 2019 (2), 2020 (3), 2021 (4), as well as in samples from the Ulanakh-Bysyttakh River of 2019 (5), 2020 (6), and 2021 (7), in the background samples from the Daldyn River of 2019 (8), 2020 (9), 2021 (10), and in samples from the creek X, originating from a spring on the right side of the Daldyn River of 2020 (11), 2021 (12), in underground brines from the Upper Cambrian (13), the Middle and Lower Cambrian (14) aquifers, the Middle Cambrian aquifers nearby Udachnaya kimberlite pipe (15) according to [17, 20, 21]; 16 – chloride water flows from under northern foot of the artificial cover at the PUNE “Crystal” epicenter in 2012. Sampling dates: 30.08–03.09.19; 07–14.08.20; 04–12.10.21. Chain line in panel (a) divides fresh and brackish waters of different hardness; solid line in panel (b) corresponds to equal equivalent percentages of K^+ and Na^+ (%-equiv.); in panel (d) corresponds to equal concentrations of SO_4^{2-} and Cl^- (mg/L)

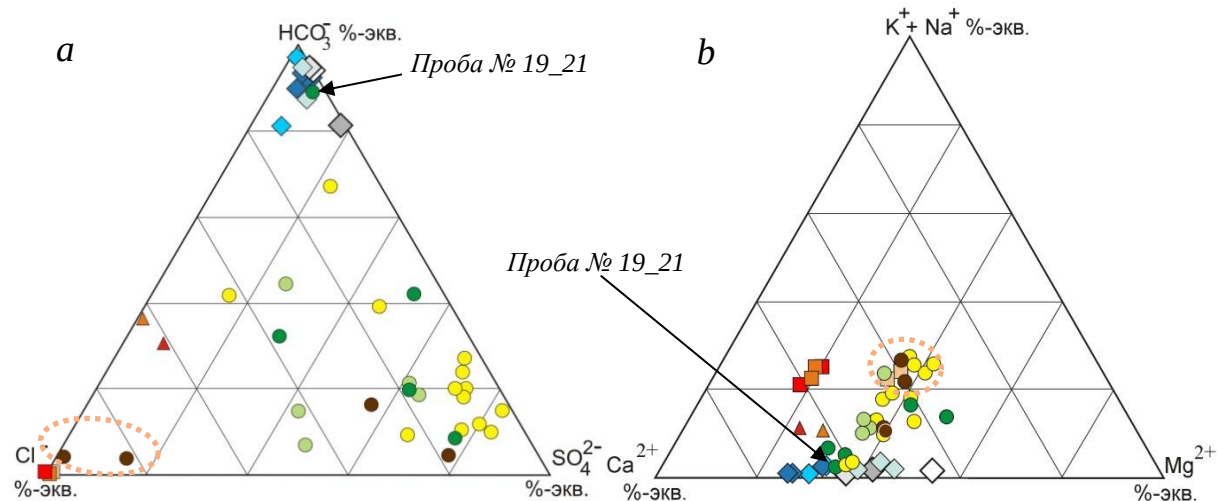


Рис. 5. Основной анионный (а) и катионный (б) составы (%-экв) водных стоков, вытекающих из-под насыпи на эпицентре ПЯВ «Кристалл», местной речной воды, ручья X и среднего анионного и катионного состава (%-экв) подземных рассолов (данные по подземным рассолам из [17, 20, 21]). Условные обозначения – на рис. 4

Fig. 5. Major (a) anion, (b) cation composition of PUNE-related water runoffs, form local river water, creek X; average contents of ions in underground brines according to [17, 20, 21]. Legend is the same as in Fig. 4

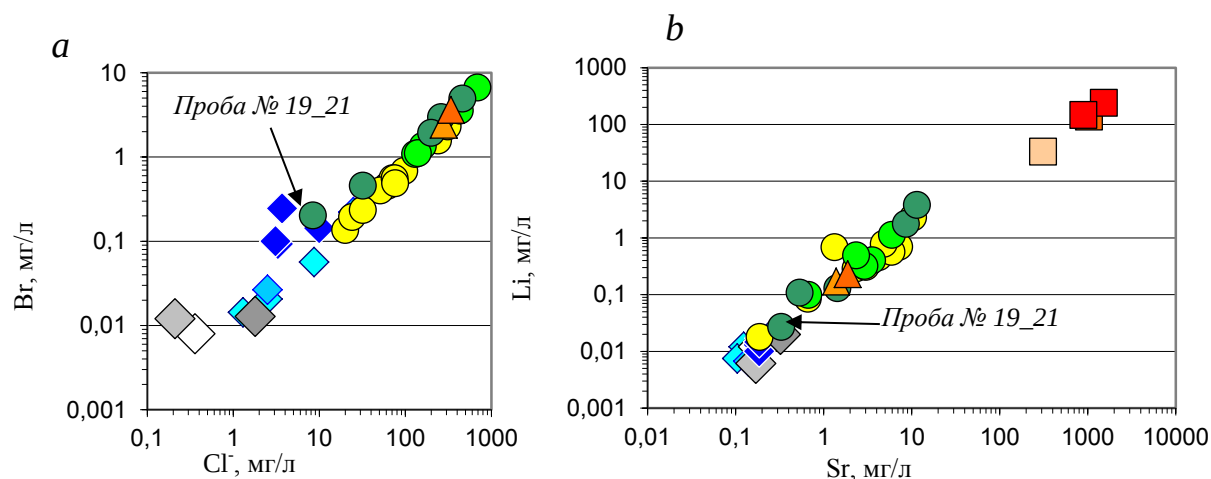


Рис. 6. Концентрация Br и Cl- (мг/л) (а), Li и Sr (мг/л) (б) в водных стоках из-под насыпи на эпицентре ПЯВ «Кристалл», в речной воде и ручье X и в подземных рассолах (данные по подземным рассолам из [17, 20, 21]). Условные обозначения – на рис. 4

Fig. 6. Concentrations of Br and Cl- (mg/L) (a), Li and Sr (mg/L) (b) in PUNE-related water; local river water, creek X and the data on brines published in [17, 20, 21]). Legend is the same as in Fig. 4

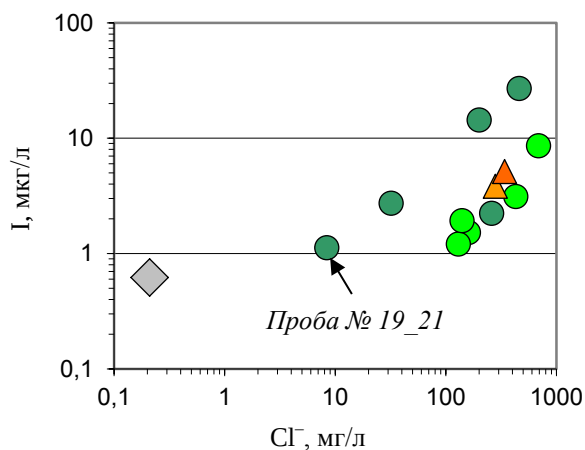


Рис. 7. Содержание йода (мкг/л) и хлоридов (мг/л) в водных стоках из-под насыпи на эпицентре ПЯВ «Кристалл», в ручье на правом борту р. Далдын, в фоновой воде (р. Далдын) в 2020–2021 гг. Условные обозначения – на рис. 4

Fig. 7. Concentrations of I (mkg/L) and Cl- (mg/L) in different water samples of 2020–2021: PUNE-related water and Daldyn River, and creek X in the right side of the Daldyn River. Legend is the same as in Fig. 4

Как показали анализы, на подстилающих известняках и доломитах формируются гидрокарбонатные магниевые-кальциевые поверхностные воды умеренной жесткости: средний химический состав фоновых вод р. Далдын (название типа вод дано в порядке роста эквивалентной доли ионов с содержанием $\geq 10\%$ -экв) в летнюю межень по формуле Курлова выглядит следующим образом (записаны ионы с содержанием $\geq 1\%$ -экв):

$$359 \text{ мг/л } \frac{\text{HCO}_3^- 94,7 \text{SO}_4^{2-} 5,1}{\text{Ca}^{2+} 53,3 \text{Mg}^{2+} 45,5} \text{ рН } 8,53$$

(фоновая вода р. Далдын в августе 2019, 2020)

Среди анионов резко доминирует HCO_3^- , среди катионов – Mg^{2+} и Ca^{2+} : главным образом они формируют минерализацию речной воды, положительная корреляционная взаимосвязь между этими ионами наглядно видна на графиках рис. 4, а, с. В предзимнюю межень, в октябре 2021 г., в условиях питания грунтовыми водами после предшествовавшего засушливого лета и осени, приведших к обмелению рек до холодов, минерализация речной воды выросла на 53 % по сравнению с летними показателями, и наблюдался шестикратный рост концентрации сульфатов: с 11 до 63,4 мг/л (с 5,1 до 17,9 %-экв), и поверхностные воды из гидрокарбонатных стали сульфатно-гидрокарбонатными (рис. 5, а):

$$550 \text{ мг/л } \frac{\text{HCO}_3^- 81,3 \text{SO}_4^{2-} 17,9}{\text{Ca}^{2+} 56,2 \text{Mg}^{2+} 42,1 \text{Na}^+ 1,4}$$

(фоновая вода р. Далдын в октябре 2021)

В предзимнюю межень химический состав вод р. Улахан-Бысытта, в отличие от состава р. Далдын, изменяется мало: содержание SO_4^{2-} выросло всего до 16 мг/л (5,6 %-экв) при летнем содержании 12,1 мг/л (4,8 %-экв) (рис. 4, d), и воды остаются гидрокарбонатными магниевыми-кальциевыми, практически идентичными составу летней фоновой воды р. Далдын (рис. 5, а):

$$389 \text{ мг/л } \frac{\text{HCO}_3^- 91,0 \text{SO}_4^{2-} 4,8 \text{Cl}^- 4,1}{\text{Ca}^{2+} 59,8 \text{Mg}^{2+} 38,0 \text{Na}^+ 1,7} \text{ рН } 8,29$$

(р. Улахан- Бысытта в августе 2019, 2020)

$$484 \text{ мг/л } \frac{\text{HCO}_3^- 91,8 \text{SO}_4^{2-} 5,6 \text{Cl}^- 2,5}{\text{Ca}^{2+} 71,0 \text{Mg}^{2+} 27,7 \text{Na}^+ 1,1}$$

(р. Улахан- Бысытта в октябре 2021)

Более значительное увеличение содержания сульфатов в р. Далдын в предзимнюю межень по сравнению с их содержанием в р. Улахан-Бысытта можно объяснить особенностями подрусловых таликов этих рек. Под крупными реками развиваются более глубокие талики, вплоть до сквозных через всю толщу многолетнемерзлых

пород, как, например, под рекой р. Леной (главной рекой Якутии). В нашем случае расход р. Далдын, по оценке автора, примерно в 15–20 раз превышает расход р. Улахан-Бысытта, значит, под ее руслом развит более глубокий и широкий подрусловой талик с большим запасом грунтовых вод. Как было отмечено выше, в подрусловом талике крупных рек, кроме гидрокарбонатных, распространены более глубокозалегающие сульфатно-гидрокарбонатные воды [17]. По-видимому, в предзимнюю межень в фоновой речной воде р. Далдын при отсутствии разбавления дождевой водой и сокращении притока гидрокарбонатных грунтовых вод из СТС привнос сульфатно-гидрокарбонатных грунтовых вод подруслового талика становится более заметным. А под руслом р. Улахан-Бысытта, по-видимому, развит гораздо более мелкий подрусловой талик с гидрокарбонатными грунтовыми водами, потому сезонная смена режимов питания на химическом составе воды отражается слабо.

Отметим, что в фоновой речной воде очень мало хлоридов – среднее содержание Cl^- в летнюю межень составляло 0,3 мг/л, в предзимнюю межень – 1,8 мг/л (0,18 и 0,69 %-экв соответственно) (рис. 4, с; рис. 5, а) при среднем отношении $\text{rSO}_4^{2-}/\text{rCl}^-$ 29,1. Низкое содержание ионов Cl^- свидетельствует о том, что подрусловой талик р. Далдын на фоновом участке и выше по течению скорее всего не является сквозным и в него напорные подземные рассолы, распространенные в местной геологической среде под мерзлой толщей, не поступают.

Вместе с тем обнаружено редкое место выхода подземных рассолов из-под правого борта среднего течения р. Далдын (координаты $66^\circ 21,621'$ северной широты, $112^\circ 32,288'$ восточной долготы): здесь в 2015–2016 гг. наблюдался источник соленых вод непонятного генеза, дающий начало небольшому ручью без названия, для определенности обозначенному буквой X (рис. 1, b). К 2018 г. видимый источник иссяк, но ручей X сохранился, и, как показали анализы, воды этого ручья солоноватые гидрокарбонатно-хлоридные высокой жесткости ($\text{rCa}^{2+} + \text{rMg}^{2+}$) 15,4 мг-экв/л с рН ~8,3 (красный и оранжевый треугольники на рис. 4, 5):

$$859 \text{ мг/л } \frac{\text{Cl}^- 62,0 \text{HCO}_3^- 36,2 \text{SO}_4^{2-} 1,4}{\text{Ca}^{2+} 61,4 \text{Mg}^{2+} 28,1 \text{Na}^+ 8,7} \text{ рН } 8,3$$

(ручей X в августе 2020)

$$1057 \text{ мг/л } \frac{\text{Cl}^- 61,0 \text{HCO}_3^- 31,0 \text{SO}_4^{2-} 8,2}{\text{Ca}^{2+} 65,7 \text{Mg}^{2+} 23,2 \text{Na}^+ 8,7}$$

(ручей X в октябре 2021)

В районе изучения природные поверхностные воды хлоридного состава не встречаются, выявленный ручей X с гидрокарбонатно-хлоридными водами – редкий, единственный случай. Диапазон содержания Cl^- в ручье X составил от 280 до 680 мг/л

при среднем содержании 310 мг/л. Гидрокарбонатно-хлоридные воды ручья *X* в месте впадения в р. Далдын исчезают из-за смешения и разбавления с гидрокарбонатными водами реки. Проблема появления хлоридных поверхностных вод в районе заслуживает отдельного обсуждения, но в настоящей статье гидрокарбонатно-хлоридные воды ручья *X* использованы для сравнительного анализа с водными стоками эпицентра ПЯВ «Кристалл».

Особенности химического состава водных стоков на эпицентре ПЯВ «Кристалл»

Глыбово-щебнистая насыпь, состоящая из обломков известняков и доломитов, представляет собой, по сути, необустроенное приповерхностное захоронение ОРАО на эпицентре ПЯВ «Кристалл»: под ней погребен образовавшийся при взрыве грунтовый навал (содержащий радионуклиды) (рис. 1, *a*) и прилегающий к нему с северо-восточной стороны загрязненный участок, а на глубине всего 98 м находится ЦЗВ с радиоактивными продуктами взрыва и остатками ядерного взрывного устройства. Насыпь, навал, боевая скважина (и ослабленная зона вокруг нее) и ЦЗВ вместе образуют сложную геотехногенную систему, о внутренних связях которой могут рассказать нам водные стоки, вытекающие из-под насыпи (радиоактивная составляющая водных стоков подробно обсуждалась в статье [13]).

Впервые на наличие высоких концентраций Cl^- в водных стоках из-под насыпи обратили внимание в 2008 г. [14], но детальное изучение в 2019–2021 гг. показало, что их химический состав значительно разнообразнее и сложнее. Это солоноватые жесткие и сверхжесткие воды с ($\text{rCa}^{2+} + \text{rMg}^{2+}$) от 9,9 до 67,5 мг-экв/л с минерализацией от 781 до 5621 мг/л смешанного анионного состава (рис. 4, 5, табл. 2). Среди катионов преобладают Ca^{2+} и Mg^{2+} , что делает их похожими на местные природные поверхностные воды, однако их абсолютное содержание гораздо больше, также увеличены доли и абсолютные содержания K^+ и Na^+ (рис. 4, *b*; рис. 5). Средние концентрации Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ и Na^+ в летнюю межень составляют (мг/л): 263, 134, 105 и 47, и превышают в 4,7, 4,7, 151 и 49 раз их фоновые уровни в речной воде соответственно. Средние концентрации SO_4^{2-} , Cl^- в летнюю межень составляют 763 и 163 мг/л, что превышает их соответствующие фоновые уровни в речной воде в 69,3 и 572 раза, но при этом среднее содержание HCO_3^- (287,6 мг/л) сравнимо с фоновым уровнем в речной воде (262 мг/л). Взаимные отношения анионов в водных стоках эпицентра «Кристалл» изменяются в широких пределах: одновременно выявлены воды сульфатного, хлоридного и гидрокарбонатного состава и их смешанные вариации (табл. 2, рис. 5, *a*).

Откуда такое разнообразие химического состава, откуда большие количества SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ и Na^+ в водных стоках эпицентра ПЯВ «Кристалл»? Попытаемся разобраться. В первую очередь, высокая гетерогенность химического состава водных стоков на ограниченном 260–300-метровом участке эпицентра ПЯВ «Кристалл» указывает на наличие нескольких источников, стоки которых, по-видимому, смешиваясь в разных пропорциях между собой, формируют наблюдаемый «фейерверк» химических составов водных стоков (табл. 2).

Чаще среди анионов доминируют сульфаты SO_4^{2-} (рис. 5, *a*), и усредненный состав водных стоков характеризуется как хлоридно-гидрокарбонатно-сульфатный:

$$1765 \text{ мг/л} \frac{\text{SO}_4^{2-} 58,2 \text{HCO}_3^- 24,0 \text{Cl}^- 17,7}{\text{Ca}^{2+} 46,6 \text{Mg}^{2+} 38,0 \text{K}^+ 8,6 \text{Na}^+ 6,4} \text{pH } 7,84$$

(водные стоки на эпицентре ПЯВ «Кристалл»
в августе 2019, 2020 гг.)

Таблица 2. Анионный состав водных стоков, вытекающих из-под насыпи на эпицентре ПЯВ «Кристалл», в 2019–2021 гг. (классификация и название типов вод по анионам с содержанием $\geq 10\%$ -экв)

Table 2. Anion composition types of water runoff flowing from under the artificial cover at the epicenter of the PUNE “Crystal” sampled in 2019–2021 (classified and named by anions $\geq 10 \text{ eq.}\%$)

Химический тип вод* Water chemical type*	количество проб samples quantity		
	2019	2020	2021
Сульфатная/Sulfate	1	–	–
Гидрокарбонатно-сульфатная Bicarbonate-sulfate	6	–	1
Хлорид-гидрокарбонат-сульфатная Chloride-bicarbonate-sulfate	1	2	1
Гидрокарбонат-хлорид-сульфатная Bicarbonate-chloride-sulfate	–	1	–
Хлорид-сульфатная/Chloride-sulfate	1	1	1
Сульфат-гидрокарбонат-хлоридная Sulfate-bicarbonate-chloride	1	–	1
Сульфат-гидрокарбонатная Sulfate-bicarbonate	1	–	–
Сульфат-хлорид-гидрокарбонатная Sulfate-chloride-bicarbonate	–	1	–
Гидрокарбонатная/Bicarbonate	–	–	1

*названия анионного состава – в порядке увеличения доли аниона (учтены анионы с содержанием $\geq 10 \%$ -экв)

*anions are listed according to increasing equivalent percentages ($\geq 10 \text{ eq.}\%$)

В предзимнюю межень 2021 г. химический состав водных стоков не испытывает принципиальных изменений, за исключением повышения при-

мерно в 1,6 раз доли HCO_3^- и почти двукратного снижения доли K^+ :

$$2236 \text{ мг/л} \frac{\text{SO}_4^{2-} 46,0 \text{HCO}_3^- 38,4 \text{Cl}^- 15,5}{\text{Ca}^{2+} 52,3 \text{Mg}^{2+} 38,6 \text{K}^+ 4,5 \text{Na}^+ 4,4}$$

(водные стоки на эпицентре ПЯВ «Кристалл»)
 в октябре 2021 г.

Известно, что многолетняя мерзлота в глыбово-щербнистой насыпи не восстановилась [15], и снеготалые и метеорные воды могут свободно просачиваться через нее. По-видимому, крупнообломочный состав способствует также свободной конвекции воздуха в насыпи, в результате в теплое время года в ней предположительно идёт конденсация атмосферной влаги из-за разницы температур поступающего прогретого воздуха и пород насыпи, что, по-видимому, приводит к накоплению воды (росы) в насыпи. Это предположение подкрепляется наличием множества водных стоков из-под насыпи, наблюдаемых даже во время длительных засух, и весьма низкими значениями удельного электрического сопротивления в насыпи по результатам электротомографических зондирований [15]. Несомненно, обломки известняков и доломитов насыпи при взаимодействии с водой становятся поставщиками HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} . Результаты анализов показали, что содержание HCO_3^- в водных стоках в летнюю межень колеблется в довольно узком диапазоне – от 183 до 403 мг/л – при среднем содержании 287,6 мг/л, что сравнимо с местным фоновым содержанием HCO_3^- в речной воде (262 мг/л) и средним содержанием гидрокарбонатов в р. Улахан-Бысытта, равным 283 мг/л при диапазоне от 256 до 317 мг/л (рис. 4, с). В предзимнюю межень (октябрь 2021 г.) при отсутствии разбавления дождевой водой содержание HCO_3^- в водных стоках ожидаемо увеличилось и составило в среднем 447,6 мг/л.

Гидрокарбонатные магниевые-кальциевые воды без значимого подмеса других анионов и катионов обнаружены в пробе № 19_21, отобранной на ~0,5 м выше подошвы насыпи в октябре 2021 г. (рис. 4, 5). По мнению автора, эта проба № 19_21 является конденсатом водяного пара, образованного в насыпи (проба росы), который по мере просачивания сквозь насыпь сверху вниз обогатился ионами HCO_3^- (до 610 мг/л), Ca^{2+} (до 140 мг/л) и Mg^{2+} (до 46 мг/л):

$$859 \text{ мг/л} \frac{\text{HCO}_3^- 89,0 \text{SO}_4^{2-} 8,8 \text{Cl}^- 2,1}{\text{Ca}^{2+} 63,0 \text{Mg}^{2+} 34,6 \text{Na}^+ 1,5 \text{K}^+ 0,8}$$

(проба № 19_21 в октябре 2021 г.)

Ионы HCO_3^- , Ca^{2+} и Mg^{2+} составляют основную минерализацию (859 мг/л), и сумма гCa^{2+} (7,0 мг-экв/л) и гMg^{2+} (3,8 мг-экв/л) практически

равна гHCO_3^- (10 мг-экв/л). По-видимому, продолжительность контакта конденсата атмосферной влаги, исходно близкого по составу к дистиллированной воде, с поверхностью обломков известняков, доломитов, достаточна для обогащения ионами HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} в концентрациях, превышающих их обычные содержания в речной воде района (262, 55,7 и 28,4 мг/л в фоновой речной воде соответственно) (рис. 4, 5).

В пробе № 19_21, по сравнению с другими пробами, очень низкое содержание SO_4^{2-} , Cl^- : 47,3 и 8,4 мг/л соответственно (рис. 4, с). Предполагается, что источником сульфатов, обнаруженных в пробе № 19_21, мог стать гипс, присутствующий в виде прожилков и мелких желваков в известняках маркокинской свиты верхнего кембрия и удачининской свиты среднего кембрия (остальным породам местной геологической среды гипс не характерен), обломки которых могут присутствовать среди обломочного материала пустых пород карьера трубки «Удачная», использованного для насыпи. Хлориды в пробе росы, в свою очередь, могут быть остаточными следами бывшей засоленности обломочного материала, или эти хлориды могли быть результатом эманации газово-рассольных флюидов из недр, вынесенных по стволу боевой скважины (и (или) по ослабленной зоне вокруг боевой скважины): подробнее эти пути привноса хлоридов обсудим ниже.

Всем остальным водным пробам, отобранным в подножье насыпи и ниже по склону (на уровне подошвы насыпи и ниже), характерен смешанный анионный состав: к HCO_3^- с содержанием 200–400 мг/л (рис. 4, с; рис. 5, а) добавляются разные количества SO_4^{2-} с концентрацией до 3311 мг/л и Cl^- – до 690 мг/л. Это свидетельствует о том, что основные источники сульфатов и хлоридов расположены не в теле глыбово-щербнистой насыпи, а у ее подошвы, по-видимому, в грунтах навала или под ними в недрах. Количество сульфатов и хлоридов, поступающих в водные стоки подножья насыпи, значительно превышает количество гидрокарбонатов (рис. 5, а), и они вместе с основными катионами Ca^{2+} и Mg^{2+} определяют химический состав водных стоков. По-видимому, SO_4^{2-} и Cl^- немного снижают щелочность: среднее значение pH в водных стоках эпицентра в летнюю межень составляет 7,84, тогда как в местной фоновой воде и р. Улахан-Бысытта оно более щелочное и равняется 8,53 и 8,29 соответственно.

Кроме Cl^- , в водных стоках эпицентра ПЯВ «Кристалл» выявлены повышенные концентрации Br, Sr, Li, присущие подземным рассолам СВК и НВК (табл. 1) [22, 23], их среднее содержание составило (мкг/л): 1524, 3864, 708, что превышает фоновый уровень в речной воде в 139, 17 и 56 раз соответственно (рис. 6). В водных стоках также

обнаружен I (йод) со средним содержанием 6,4 мкг/л (рис. 7).

Как отметили выше, местным природным поверхностным водам хлориды не характерны: диапазон фоновых содержаний Cl^- в них составляет 0,29–1,8 мг/л, за исключением ручья *X* с гидрокарбонатно-хлоридными водами (рис. 1, *b*). В ручье *X* содержание хлоридов достигает 680 мг/л, также присутствуют Br, Sr, Li, I со средним содержанием (мкг/л): 3026, 1637, 200, 4,5 соответственно (рис. 6, 7).

Таким образом, для водных стоков эпицентра ПЯВ «Кристалл» и ручья *X* характерны хлориды и Br, Sr, Li, I, присущие подземным рассолам, и это указывает на поступление подземных рассолов в поверхностные стоки этих объектов. По мнению автора, ручей *X* (и бывший соленый источник на этом месте) не может быть связан с объектом «Кристалл», поскольку расположен ~13 км от него и вытекает из-под противоположного правого склона долины р. Далдын (рис. 1, *b*) и, несомненно, представляет собой самостоятельное явление. Вероятнее всего, гидрокарбонатно-хлоридные воды ручья *X* обусловлены локальной разгрузкой подземных рассолов, закачанных в многолетнемерзлые породы (после их сбора в скважинах при упреждающем осушении шахты и карьера кимберлитовой трубки «Удачная»), чем выходом подмерзлотных подземных рассолов из недр: один из специальных участков закачки как раз расположен на водораздельном ландшафте к северо-западу от ручья *X* (рис. 1, *b*).

Но каким образом подземные рассолы поступают в водные стоки эпицентра ПЯВ «Кристалл»? Как уже было сказано выше, насыпь была сложена из обломочного материала отвалов пустых пород карьера кимберлитовой трубки «Удачная». Известно, что в карьер (и рудник) поступали и продолжают поступать большие объемы подземных рассолов с прилегающей осадочной толщи [17, 19], которые, несомненно, загрязняют как руду, так и вмещающие пустые породы, которые, будучи в карьере, подвергаются засолению. Следовательно, в последующем, в т. ч. будучи сложенными в насыпи на эпицентре ПЯВ «Кристалл», обломки пустых пород становились источником Cl^- , Br, Sr, Li, I. Данные 2012 г. подтвердили предположение: из нарастающей в 2006 г. северной (северо-восточной) оконечности насыпи в 2012 г. продолжали смываться остатки засоления, об этом свидетельствовали выявленные в 2012 г. ярко-выраженные хлоридные водные стоки с содержанием Cl^- до 4130 мг/л у северного подножья насыпи (рис. 3, *a*; рис. 4, *d*; рис. 5). В этих хлоридных стоках rNa^+ преобладал над rK^+ , и на диаграмме эти пробы располагаются в геохимическом поле подземных рассолов ВВК, СВК+НВК (рис. 4, *b*). В отличие от них водные стоки юго-западного подножья насыпи в 2012 г.

оказались смешанного хлоридно-сульфатного состава, как и водных стоков 2019–2021 гг.: в них содержание Cl^- было в 10–20 раз ниже, чем в стоках северного подножья, и составило 146–230 мг/л (рис. 3, *a*; рис. 4, *d*; рис. 5). По-видимому, к 2012 г. исходная засоленность первичной насыпи 1990 г. уже была смыта, и она перестала быть источником хлоридов, и химический состав водных стоков формировался под влиянием, предположительно, тех же факторов, что и в 2019–2021 гг., судя по схожести химических составов водных стоков.

О практическом отсутствии остаточной засоленности материала насыпи к 2019–2021 гг. и свидетельствует проба росы № 19_21, поскольку в ней весьма низкое содержание Cl^- – всего 8,4 мг/л, что почти на порядок меньше, чем в водных стоках подшвы насыпи (рис. 4, *d*; рис. 5, *a*). Таким образом, есть какой-то другой источник подземных рассолов на эпицентре ПЯВ «Кристалл». Теперь вспомним о боевой скважине и вылетевшем 12-метровом фрагменте обсадной колонны с цементом [25], который, как показали результаты наземной магнитной съемки, до сих пор залегает под насыпью [3]. Однако, по мнению автора, при взрыве, вероятнее всего, была вытолкнута вся цементная пробка боевой скважины (но без обсадки, поэтому она не была установлена при посещении объекта в 1990 г.), вспомним хотя бы о бутылке шампанского: она либо открыта, либо не открыта. Следовательно, ствол боевой скважины, скорее всего, открыт и представляет собой удобный путь для выхода подземных рассолов из недр, к тому же вокруг него развита трещиноватая ослабленная зона, через которую также могут просачиваться подземные флюиды. Согласно расчетам, ослабленная зона распространялась в недра на глубину до 150 м [15] – до кровли ВВК. Однако подземные рассолы ВВК не обладают достаточным напором для подъема на высоту до 150 м. У подземных рассолов СВК и НВК может быть значительный пластовый напор, но они находятся на глубине от 480 м и ниже, и неизвестно, достигает ли таких глубин зона техногенной трещиноватости. При изливании подземных рассолов на поверхности водные стоки на эпицентре ПЯВ «Кристалл» стали бы хлоридными высокоминерализованными, поскольку среднее содержание хлоридов в подземных рассолах ВВК оценивается в 52,7–58,6 г/л, СВК – в 195–212 г/л (табл. 1) [17, 20, 21]. Между тем концентрации хлоридов в водных стоках, вытекающих из-под насыпи, измеряются всего лишь десятками и сотнями мг/л (рис. 4, *d*), то есть меньше в 100 и более раз по сравнению с подземными рассолами. Это указывает на весьма малоинтенсивный характер выхода подземных рассолов на эпицентре ПЯВ «Кристалл».

Самое время вспомнить о газовой составляющей подземных водоносных комплексов. Известно, что подземные рассолы, начиная с ВВК и ниже, насыщены газами от 0,1 до 1,2 м³/м³, состоящими в основном из СН₄ (до 75–85 %), Н₂ (0–1,2 %), N₂ (2–10 %) в растворенном состоянии, также отмечается наличие мигрирующего в пластах свободного газа, а также газа, сорбированного в породе, в т. ч. в виде газогидратов [19]. Как раз в районе изучения наблюдаются спонтанные газовой-водяно-рассольные выбросы из скважин (рис. 8), в том числе в карьере трубки «Удачная», что представляет реальные риски аварийных выбросов газовой-рассольных флюидов при буровых работах. По мнению С.В. Алексеева с соавторами [20], именно воздействие подземных рассолов на газогидраты в приподошвенной части мерзлой толщи приводит к разложению газогидратов и освобождению огромного количества газа и воды и их фонтанированию. Таким образом, в районе объекта ПЯВ «Кристалл», оказывается, характерно освобождение газов из недр и их выход с жидкими флюидами при буровых работах и иных воздействиях на геологическую среду.



Рис. 8. Фонтанирование скважины газовой-водяной (газово-рассольно-водяной) смеси в районе кимберлитовой трубки «Удачная» (фото Г.П. Шмарова) [20]

Fig. 8. Flowing a well with a gas-water (gas-brine-water) mixture nearby the mining kimberlite pipe "Udachnaya" (photo by G.P. Shmarov) [20]

Предполагается, что газовой-водяно-рассольные, газовой-рассольные флюиды могут также выходить по открытому стволу боевой скважины ПЯВ «Кристалл»: этому ничто не мешает, разве что большой диаметр ствола скважины, вероятнее всего, обуславливает более спокойный выход подземных флюидов, а «шапка» из глыбово-щебнистой насыпи «гасит» и ловит жидкую составляющую флюидов у подошвы насыпи. Известно, что даже колебания

атмосферного давления вызывают выход радиоактивных газов из ЦЗВ ПЯВ, это было выявлено на объектах ПЯВ полигона Невада путем замеров газа радиоксенона [29, 30]. По мнению автора, на эпицентре ПЯВ «Кристалл» подземные газовой-водяно-рассольные, газовой-рассольные флюиды выходят по открытому стволу боевой скважины в виде слабого «дыхания» при колебаниях атмосферного давления, и, возможно, также бывают залповые (событийные), спровоцированные техногенным воздействием при эксплуатации недр и (или) природными факторами. Согласно точке зрения С.В. Алексеева [20] о разложении газогидратов при взаимодействии с подземными рассолами, следует предполагать, что закачка (утилизация) дренажных рассолов, собранных при осушении горных отработок, в мерзлую толщу района могла стать фактором интенсификации разложения газогидратов и повышения газовойности подземных флюидов в геологической среде района и рисков их спонтанного фонтанирования. Предполагается, что закачка дренажных рассолов на участке, расположенном в 6–8 км к востоку от объекта «Кристалл» (рис. 1, б), могла активизировать движение газовой-рассольных флюидов в геологической среде в непосредственной близости от объекта «Кристалл» и их эманацию через ствол боевой скважины (и через ослабленную зону вокруг боевой скважины). Промышленные взрывы, регулярно проводимые при горных работах в районе, как и другие техногенные и природные факторы, могут быть триггерами для залповых (событийных) выбросов подземных флюидов на эпицентре ПЯВ «Кристалл». В сто и более раз более низкое содержание СГ в водных стоках по сравнению с подземными рассолами и даже по сравнению с водным стоком, сформированным смывом засоленного обломочного материала в 2012 г., согласуется с представлением о газовой-водяно-рассольном, газовой-рассольном поступлении хлоридов из недр на эпицентре ПЯВ «Кристалл».

Отметим, что подземные флюиды могут выносить с собой из ЦЗВ радионуклиды. Действительно, в водных стоках эпицентра ПЯВ «Кристалл» постоянно обнаруживали тритий, превышающий местный фоновый уровень [13]. Тритий с активностью 8,7 Бк/л обнаружен и в пробе росы № 19_21, и эта активность оказалась одной из наиболее высоких среди проб 2021 г. (рис. 3, б). Однако наличие трития в материале насыпи крайне маловероятно, поскольку насыпь сложена из чистых от радионуклидов обломков известняков доломитов. Предполагается, что тритий был захвачен конденсатом водяного пара из газовой-паровых испарений, эманлирующих через открытый ствол боевой скважины. Повышенное значение МЭД до 11 мкР/ч над устьем боевой скважины в октябре 2021 г. при МЭД 8 мкР/ч на насыпи подкрепляет вы-

шеприведенное предположение (рис. 3, а). Нужно отметить, что именно в октябре 2021 г. была получена наиболее высококонтрастная картина современной радиационной обстановки на насыпи и вокруг неё, поскольку в условиях предзимней засухи и замерзшего сезонно-талого слоя отсутствовали помехи, создаваемые влагой сезонно-талого слоя из-за экранирующего γ -излучение свойства воды (рис. 3, а). Как видим, раз тритий в пробе росы – скорее всего результат эманации газов и пара из недр, то в таком случае источником обнаруженных в пробе росы № 19_21 хлоридов в концентрации 8,4 мг/л, йода – 1,12 мкг/л, а также брома – 203 мкг/л, по-видимому, также являются газовой-рассольные флюиды из недр, а не остаточная засоленность пород насыпи.

При поступлении подземных рассолов в поверхностные воды логично ожидать сохранения взаимных отношений элементов-индикаторов, если в поверхностных водах они исходно отсутствуют или содержатся в очень малой концентрации. Для анализа этих взаимных связей элементов-индикаторов сравним их распределение в водных стоках эпицентра ПЯВ «Кристалл» и в ручье X. Известно, что в подземных рассолах гидрохимической зоны С и D отношение Cl/Bg практически постоянно и изменяется в пределах 41–84 и 27–73 соответственно [17, 20]. Анализы показали, что в водных стоках эпицентра ПЯВ «Кристалл» отношение Cl/Bg в летнюю межень колеблется в диапазоне 103–155 при среднем значении 131, в предзимнюю межень отношение снижается и составляет 41–103 при среднем значении 79 (табл. 3). К этим значениям близко отношение Cl/Bg в ручье X: в летнюю межень оно составило 116, а в предзимнюю межень – 94.

Узкий диапазон значений Cl/Bg в поверхностных водах свидетельствует об устойчивой взаимосвязи между Cl[–] и Bg, как и в подземных условиях, однако более высокие значения Cl/Bg по сравнению со значениями в подземных рассолах можно объяснить разной миграционной способностью хлоридов и бромидов в поверхностных условиях. Коэффициент корреляции между Cl[–] и Bg в водных стоках эпицентра ПЯВ «Кристалл» и в ручье X составил $K_r=+0,98$, а в местной речной воде – $K_r=+0,62$ (рис. 9, табл. 4). В связи с вышеприведенным Bg можно использовать в качестве яркого индикатора поступления подземных рассолов в поверхностные воды.

Результаты анализов показали, что в ручье X отношение элементов-индикаторов сохранилось таким же, как в подземных рассолах, его можно записать в виде последовательности $Cl >> Bg > Sr > Li$, тогда как в водных стоках эпицентра ПЯВ «Кристалл» оно другое: $Cl >> Sr > Bg \geq Li$ (рис. 10, а), поскольку содержание Sr в водных стоках эпицентра ПЯВ «Кристалл» превышает содержание Bg. В ручье X

отношение концентраций Cl/Sr изменяется в пределах от 180 до 201, а Cl/Li – от 1478 до 1650, что практически совпадает со значениями Cl/Sr (156–190) и Cl/Li (985–1887) в подземных рассолах (табл. 3). Тогда как в водных стоках на эпицентре ПЯВ «Кристалл» в силу более высоких содержаний Sr, Li отношения Cl/Sr и Cl/Li в 2–3 раза ниже, и в летнюю и предзимнюю межень среднее отношение Cl/Sr составило 65,8 и 66,1, Cl/Li – 467 и 568 соответственно, что дает основание предположить наличие, помимо подземных рассолов, второго неизвестного источника Sr и Li на эпицентре ПЯВ «Кристалл».

Таблица 3. Отношение Cl/Br, Cl/Sr, Cl/Li в водных стоках эпицентра ПЯВ «Кристалл», ручья X в 2019–2021 гг. и в подземных рассолах по данным [20, 21]

Table 3. Ratio of Cl/Br, Cl/Sr, Cl/Li in water runoff from the PUNE "Crystal" epicenter, creek X in 2019–2021, and underground brines according to [20, 21]

Отношение/Ratio	Подземные рассолы Underground brines		Водные стоки эпицентра ПЯВ «Кристалл» Water runoff from the PUNE "Crystal" epicenter		Ручей X Creek X	
	гидрохимические зоны hydrochemical zones		Летняя межень Summer low-water time 2019–2020	Предзимняя межень Pre-winter low-water time 2021	Летняя межень Summer low-water time 2019–2020	Предзимняя межень Pre-winter low-water time 2021
	C	D				
Cl/Br	41–84	27–73	<u>103–155*</u> 131	<u>41–103</u> 79	116	94
Cl/Sr	~176–188	~176–190	<u>5,7–209</u> 66	<u>23,3–182</u> 66	201	180
Cl/Li	~1760	~1410	<u>52–1778</u> 467	<u>113–2000</u> 568	1650	1478

* в числителе – диапазон значений, в знаменателе – среднее значение; the range of values is in the numerator, the average value is in the denominator.

Известняки и доломиты, слагающие насыпь, не могут быть источниками Sr и Li, что подтверждается отсутствием положительной корреляционной связи между HCO_3^- и Sr, HCO_3^- и Li (коэффициенты корреляции составили –0,25 и –0,04) (табл. 4). Вместе с тем выявлена положительная корреляционная связь между SO_4^{2-} и Sr, а также между SO_4^{2-} и Li⁺ с коэффициентами +0,74 и +0,83 соответственно, что указывает на привнос дополнительного количества Sr и Li с сульфатными стоками (в дополнение к их привносу с подземными хлоридными газовой-рассольными флюидами).

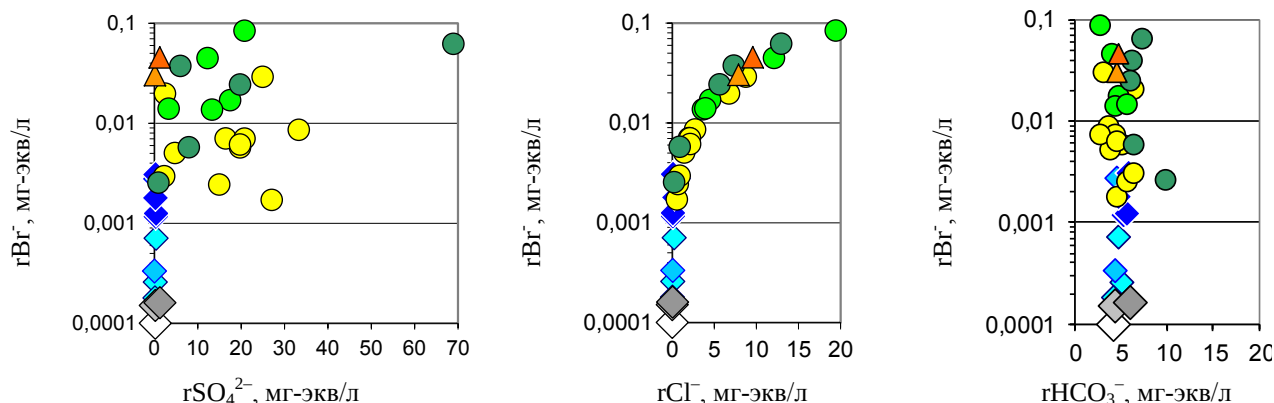


Рис. 9. Взаимосвязь содержания Br^- (мг-экв/л) с главными анионами SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- (мг-экв/л) в водных пробах района ПЯВ «Кристалл». Условные обозначения – на рис. 4

Fig. 9. Contents of Br^- (mg-eq./L) vs. SO_4^{2-} , Cl^- , and HCO_3^- (mg-eq./L) in PUNE-related water samples. Legend is the same as in Fig. 4

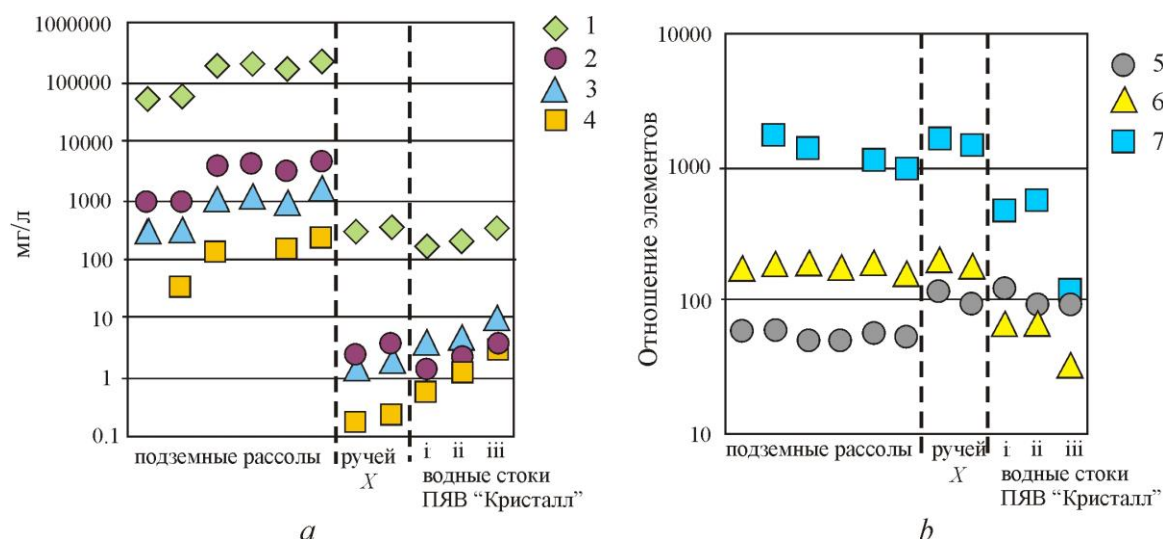


Рис. 10. Среднее содержание Cl^- (1), Br^- (2), Sr (3), Li (4), мг/л (a) и среднее отношение Cl/Br (5), Cl/Sr (6), Cl/Li (7) (b) в подземных рассолах по данным [20, 21], в гидрокарбонатно-хлоридных водах ручья X у естественного выхода подземных рассолов, в водных стоках на эпицентре ПЯВ «Кристалл»: i) в летнюю межень, ii) в предзимнюю межень, iii) в водных стоках с максимальной минерализацией в октябре 2021 г.

Fig. 10. Average contents of Cl^- (1), Br^- (2), Sr (3), and Li (4), mg/L (a) and average Cl/Br (5), Cl/Sr (6), and Cl/Li (7) ratios (b) in different samples: brines [20, 21]; bicarbonate-chloride water of the creek X near emergent brines; PUNE-related water sampled in summer (i) and pre-winter autumn (ii); in the most saline PUNE-related water sample (iii)

В водных стоках эпицентра ПЯВ «Кристалл» среди катионов преобладают Ca^{2+} и Mg^{2+} . Их источником, как и бикарбонатов, несомненно, являются обломки известняков и доломитов, слагающие насыпь, но их привнос в водные стоки эпицентра ПЯВ «Кристалл», оказывается не значителен, что проявляется в отсутствии корреляционной связи rCa^{2+} и rMg^{2+} и rHCO_3^- (табл. 4, рис. 11), тогда как для местной речной системы эта взаимосвязь является основополагающей с коэффициентом K_r +0,87. Допустим, что основным поставщиком Ca^{2+} и Mg^{2+} на эпицентре ПЯВ «Кристалл» являются хлоридные подземные газовой-рассольные флюиды, поскольку кальций и магний являются преобладающими катионами в подземных рассолах (табл. 1).

Однако значимое количество Ca^{2+} и Mg^{2+} в водные стоки, как видим, поступает с сульфатными стоками из третьего неизвестного источника, поскольку коэффициент корреляции в водных стоках эпицентра ПЯВ «Кристалл» между $(\text{rCa}^{2+} + \text{rMg}^{2+})$ и rSO_4^{2-} составил +0,85, а K_r между $(\text{rCa}^{2+} + \text{rMg}^{2+})$ и rCl^- был меньше и составил +0,65 (рис. 11, табл. 4).

Выше уже отмечали, что в водных стоках эпицентра ПЯВ «Кристалл» содержание K^+ , Na^+ превышает в среднем в 48,7 и 151 раз их содержание в местной фоновой речной воде. В водных стоках rNa^+ связан с rCl^- с коэффициентом K_r = +0,71, что отражает преимущественный привнос Na^+ с хлоридными подземными флюидами, чего не скажешь про K^+ .

Таблица 4. Показатели корреляционной взаимосвязи компонентов водных проб геотехногенных и природных систем района ПЯВ «Кристалл» в 2019–2021 гг.

Table 4. Indicators of correlation in water components of geotechnogenic system of the PUNE "Crystal" site and natural systems of the adjacents territory in 2019–2021

Коэффициенты корреляции между содержанием (мг/л) анионов и элементов в водных стоках эпицентра ПЯВ «Кристалл» Correlation coefficients between content (mg/L) of elements and anions in water runoff from the PUNE "Crystal" epicenter			
	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻
Br	0,42	0,98	-0,16
Sr	0,74	0,49	-0,25
Li	0,83	0,55	-0,04
Коэффициенты корреляции между эквивалентным содержанием (мг-экв/л) анионов и катионов в водных стоках эпицентра ПЯВ «Кристалл» Correlation coefficients between equivalent content of cations and anions (mg-eq/L) in water runoff from the PUNE "Crystal" epicenter			
	rSO ₄ ²⁻	rCl ⁻	rHCO ₃ ⁻
rCa ²⁺ +rMg ²⁺	0,85	0,65	0,15
rCa ²⁺	0,75	0,69	0,18
rMg ²⁺	0,88	0,59	0,11
rK ⁺	0,60	0,58	-0,22
rNa ⁺	0,56	0,71	-0,16
Коэффициенты корреляции между эквивалентным содержанием (мг-экв/л) катионов и анионов в р. Улахан-Бысытта и фоновой воде р. Далдын Correlation coefficients between equivalent content of cations and anions (mg-eq./L) in the Ulakhan-Bysyttakh river and background water of the Daldyn river			
	rSO ₄ ²⁻	rCl ⁻	rHCO ₃ ⁻
rCa ²⁺ +rMg ²⁺	0,27	-0,1	0,87
rCa ²⁺	0,03	-0,03	0,78
rMg ²⁺	0,67	-0,18	0,19
rK ⁺	0,47	0,39	-0,15
rNa ⁺	0,42	0,67	0,01

Выявлена положительная корреляционная связь rK^+ как с rCl^- , так и с SO_4^{2-} с коэффициентом корреляции +0,58 и +0,60 соответственно, что указывает, по-видимому, на привнос K^+ как с хлоридными, так и с сульфатными стоками.

Значения rK^+/rNa^+ в речной воде и гидрокарбонатно-хлоридных водах ручья X и в подземных рассолах среднекембрийского водоносного комплекса близки между собой, и оцениваются в среднем 0,26, 0,23, 0,27–0,32 соответственно. Данный факт, по-видимому, отвечает естественному геохимическому распространению Na^+ : в природных водных системах катионов Na^+ почти в 4 раза больше K^+ (в эквивалентных содержаниях). Однако в водных стоках эпицентра ПЯВ «Кристалл» среднее rK^+/rNa^+ составляет 1,2, максимально – 1,8, т. е. повышено в 4–5 раз и K^+ преобладает над Na^+ в эквивалентном содержании. Это свидетельствует о том, что основное количество K^+ в водные стоки эпицентра ПЯВ «Кристалл», по-видимому, привносится с сульфатными стоками (рис. 4, b).

Итак, что за сульфатные стоки на эпицентре ПЯВ «Кристалл», которые несут с собой Ca^{2+} , Mg^{2+} , Sr , Li^+ и K^+ , и что является их источником? На эпицентре ПЯВ «Кристалл» мы наблюдаем необычную ситуацию, далекую от природных моделей: в водных стоках относительно немного хлоридов, но очень много сульфатов, сульфаты преобладают как в абсолютном, так и в эквивалентном содержании (рис. 4, d; рис. 5, a), при этом сульфатные стоки вместе с собой вносят в водные стоки, как показали выше, дополнительное количество Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Sr и Li . Среднее содержание сульфатов в водных стоках, которое превышает фоновый уровень в речной воде от 4-х до 300 раз, в среднем примерно в 30 раз, составляет 818 мг/л при диапазоне от 47 до 3311 мг/л (рис. 4, b).

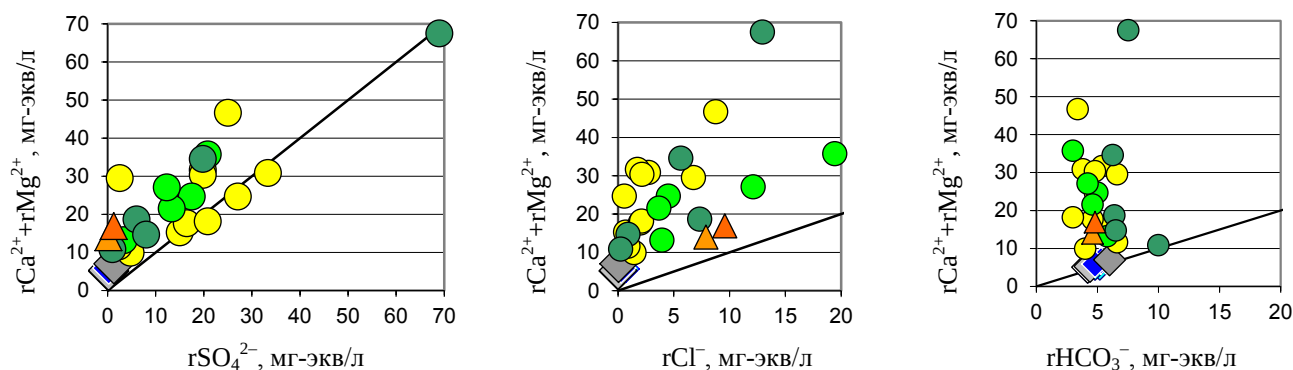


Рис. 11. Взаимосвязь суммы содержаний ($rCa^{2+}+rMg^{2+}$) (мг-экв/л) с анионами SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- (мг-экв/л) в водных пробах района ПЯВ «Кристалл». Условные обозначения – на рис. 4. Черной линией показана равновесная прямая ($rCa^{2+}+rMg^{2+}$) и аниона

Fig. 11. Correlations between the sum $rCa^{2+}+rMg^{2+}$ (mg-eq./L) and anions rSO_4^{2-} , rCl^- , $rHCO_3^-$ (mg-eq./L) in water samples from the PUNE Crystal site. For designations, see Fig. 4. The black line shows the equilibrium straight line for ($rCa^{2+}+rMg^{2+}$) and an anion

Мы уже обсуждали выше, что в местной речной воде сульфатов очень мало: в фоновой точке р. Далдын 11–63,4 мг/л, в р. Улахан-Бысыттах среднее содержание летом – 12 мг/л, в предзимнюю межень – 16 мг/л. В подземных рассолах среднее содержание SO_4^{2-} составляет около 1000 мг/л в рассолах ВВК и ~200 мг/л в рассолах СВК и НВК (табл. 1), но по сравнению с хлоридами их очень мало: среднее отношение $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ в рассолах ВВК составляет 53,8, в рассолах СВК и НВК – 1058. Если даже представить излив рассолов ВВК на поверхности, то и при этом не были бы достигнуты наблюдаемые концентрации сульфатов в 3300 мг/л, а были бы сформированы соленые хлоридные водные стоки. Посмотрим на квазиприродную систему – на ручей X: здесь в гидрокарбонатно-хлоридных водах характерно весьма низкое содержание сульфатов, такое же, как в фоновых водах: в летнюю межень оно составило 8,4 мг/л, в предзимнюю межень – 61,5 мг/л. Это показывает, что в условиях природных геосистем сульфаты с подземными рассолами в поверхностные воды не поступают. Если бы у сульфатов и хлоридов был бы один источник, между ними была бы обнаружена ярко-выраженная положительная корреляционная взаимосвязь, как, например, у хлоридов с бромом (бромидами) с $K_r=+0,98$. Вместе с тем коэффициент корреляции между Cl^- и SO_4^{2-} в водных стоках эпицентра ПЯВ «Кристалл» K_r составил $K_r=+0,37$, а между их эквивалентными содержаниями rCl^- и rSO_4^{2-} $K_r=+0,40$, т. е. не совсем близок к нулю, как было бы при отсутствии какой-либо корреляционной связи, что, по-видимому, отражает относительно близкое пространственное расположение их источников – ниже подошвы глыбово-щебнистой насыпи.

Может ли цементная пробка, вытолкнутая из боевой скважины, быть источником сульфатов? Это маловероятно, поскольку отсутствие серы и ее производных является одним из технических требований для крепости цемента. Можно предположить, что при технических работах для закрепления приборов, проводов, для подвешивания ЯВУ, возможно, использовали очень удобный быстрозастывающий строительный алебастр-гипс и оставшееся от цементной пробки пространство боевой скважины заполнили этим алебастровым материалом. Тогда именно такой гипсосодержащий техногенный материал, также вытолкнутый за цементной пробкой на поверхность, частью оставшийся в стволе боевой скважины, стал, по-видимому, источником SO_4^{2-} , дополнительного количества Ca^{2+} , Mg^{2+} , Sr , Li и K^+ , поступающих в водные стоки эпицентра ПЯВ «Кристалл». Нужно заметить, что Li , возможно, входил в состав ЯВУ или является продуктом взрыва. Заметим, что интенсивный водный перенос продуктов разрушения техногенных

материалов свидетельствует о подходящих условиях (O_2 , H_2O и др.) для их выветривания, что подтверждает полную флюидопроницаемость насыпи и свободную конвекцию воздуха в ней.

Таким образом, любой водный сток – гидрокарбонатные метеорные воды и роса с Ca^{2+} и Mg^{2+} и HCO_3^- , а также хлоридные газово-рассольные флюиды с Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Br , Sr , Li , I , ^3H , эманлирующие из недр, внизу насыпи (у подошвы насыпи) обогащаются SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Sr , Li техногенного происхождения. При этом нужно допустить, что хлоридные газово-рассольные флюиды, поднимающиеся из недр по открытому стволу боевой скважины (и по ослабленной зоне вокруг боевой скважины), могут захватывать и выносить на дневную поверхность техногенные компоненты, оставшиеся в боевой скважине.

Заключение

При подземном ядерном взрыве «Кристалл» из боевой скважины, по предположению автора, была вытолкнута вся цементная пробка, а не только 12-метровый фрагмент с обсадной колонной, сфотографированный в 1990 г. [3, 25]. Впоследствии открытый ствол боевой скважины, по-видимому, был завален и присыпан упавшим куполом взрыва – грунтами навала, а с 1992 г. перекрыт сверху глыбово-щебнистой насыпью из обломков известняков и доломитов мощностью до 20 м. Глыбово-щебнистая насыпь, по сути, является приповерхностным захоронением ОРАО, поскольку была сооружена для криогенной иммобилизации радионуклидов в грунтах навала и для предотвращения выхода радионуклидов из ЦЗВ, расположенной на глубине примерно 98 м.

Результаты изучения химического состава водных стоков показали, что вопреки расчетам глыбово-щебнистая насыпь не замерзла, а встретила в открытую геотехногенную систему «центральная зона взрыва – ствол боевой скважины (ослабленная зона вокруг боевой скважины) – навал», а именно:

- через насыпь беспрепятственно просачиваются талые и метеорные воды;
- в насыпи характерна свободная конвекция воздуха, и при разнице температур породы насыпи и входящего воздуха идет конденсация атмосферной влаги и накопление воды в насыпи. Это предположение подкрепляется наличием множества водных стоков из-под насыпи, наблюдаемых даже во время длительных засух, и весьма низкими значениями удельного электрического сопротивления в насыпи по результатам электрографических зондирований [15].

Выявлено, что водные стоки из-под насыпи – солоноватые с минерализацией до 5600 мг/л от жестких до сверхжестких с ($\text{rCa}^{2+}+\text{rMg}^{2+}$) от 9,9 до

67,5 мг-экв/л смешанного анионного состава: от хлоридных до сульфатных, иногда гидрокарбонатные, часто хлоридно-гидрокарбонатно-сульфатные, формируются за счет смешения:

- метеорных, талых вод и конденсата водяного пара гидрокарбонатного магний-кальциевого состава. Источником HCO_3^- , Ca^{2+} и Mg^{2+} в этих исходно практически дистиллированных водах являются обломки известняков и доломитов, слагающих насыпь, через которую просачивались эти воды;
- водных стоков хлоридного магний-кальциевого, кальций-магниевого состава с Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Br , Sr , Li , I , источником которых предположительно являются просачивание (эманация) и (или) залповые выбросы подземных газовой-рассольных, газовой-водяно-рассольных флюидов через открытый ствол боевой скважины и ослабленную зону вокруг боевой скважины;
- сульфатных магний-кальциевых стоков с SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Sr , Li , источником которых предположительно являются гипс-содержащие техногенные материалы (типа алебаstra), использованные при обустройстве боевой скважины и др. технических работах, связанных с подготовкой взрыва (наполнитель ствола боевой скважины и т. п.), вытолкнутых при взрыве вслед за цементной пробкой или залегающих неглубоко в открытом стволе боевой скважины. В этих техногенных материалах возможно содержание остатков ядерно-технических компонентов или продуктов взрыва, о чем может свидетельствовать избыточное содержание Li в водных стоках из-под насыпи.

Доминирование сульфатов в анионном составе водных стоков свидетельствует о подходящих условиях (O_2 , H_2O и др.) для выветривания техногенных материалов, погребенных под насыпью, и подкрепляет вывод о флюидопроницаемости и свободной конвекции воздуха в насыпи. Не исключается возможность адсорбирующей роли обломочного материала насыпи при просачивании водных стоков через насыпь.

На насыпи резкий скачок МЭД с 8 до 11 мкР/ч над устьем боевой скважины, наличие трития с активностью до 8,7 Бк/дм³ в конденсате водяного пара, стекающего из насыпи, в котором также содержатся элементы-индикаторы подземных газовой-рассольных флюидов: Cl^- с концентрацией 8,4 мг/л, Br^- – 203 мкг/л, I^- – 1,12 мкг/л, по-видимому, свидетельствуют именно об открытости ствола.

Таким образом, современный сложный химический состав водных стоков на эпицентре ПЯВ «Кристалл» обусловлен исходной аварийностью взрыва (открытостью боевой скважины, выносом техногенного материала из боевой скважины к поверхности вслед за цементной пробкой) и чрезмерной крупностью обломочного материала насыпи, являющейся основным недостатком приповерхностного захоронения ОРАО на эпицентре ПЯВ «Кристалл», и свидетельствует о том, что геотехногенная система «центральная зона взрыва – ствол боевой скважины (ослабленная зона вокруг боевой скважины) – навал – талая глыбово-щебнистая насыпь – сопряженные поверхностные ландшафты» является открытой и в ней идет активный водообмен и миграция вещества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В.В., Спивак А.А. Подземные взрывы. – М.: Наука, 2007. – 579 с.
2. Артамонова С.Ю. Геотехногенные системы подземных ядерных взрывов на территории Якутии (1974–1987 гг.): геоэкологические модели и особенности переноса радионуклидов и сопутствующих элементов: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2015. – 291 с. URL: <http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/30540/1/dis00024.pdf> (дата обращения 26.06.2024).
3. Магнитные аномалии на площадке объекта мирного подземного ядерного взрыва «Кристалл» (Западная Якутия) / С.Ю. Артамонова, А.Н. Шеин, В.В. Потапов, Н.О. Кожевников, П.Н. Новикова, В.Е. Ушницкий // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 12. – С. 158–172. URL: <https://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/2949> (дата обращения 09.06.2024).
4. Ziolkowski A. Bayesian inversion of MDJ seismograms for source parameters and yields of DPRK underground nuclear explosions 2 to 6 // Pure and Applied Geophysics. – 2024. – 28 p. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00024-024-03454-8> (дата обращения 25.07.2024).
5. Elkhoully Sh., Ali Ghada. Seismic discrimination between nuclear explosions and natural earthquakes using multi-machine learning techniques // Pure and Applied Geophysics. – 2024. – 28 p. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00024-024-03463-7> (дата обращения 25.07.2024).
6. Torrano Z.A., Boggs M.A., Sanborn M. The distinct conditions of atmospheric and underground nuclear tests revealed by Zn isotopic compositions of nuclear debris samples // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2024. – Vol. 333. – P. 805–814. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10967-023-09291-8> (дата обращения 24.07.2024).
7. Heterogeneous multiphase flow properties of volcanic rocks and implications for noble gas transport from underground nuclear explosions / J.E. Heath, K.L. Kuhlman, S.T. Broome, J.E. Wilson, B. Malama // Vadose Zone Journal. – 2021. – Vol. 20. – Iss. 3. – p. 22 URL: <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/vzj2.20123> (дата обращения 24.07.2024).
8. Состояние радиационной безопасности объектов мирных ядерных взрывов на территории РС(Я) / В.В. Касаткин, В.В. Ильичев, К.В. Мясников, В.И. Клишин, Б.П. Мамонов // Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия): Матер. II Республиканской научно-практич. конф. – Якутск: ЯФ ГУ «Изд-во СО РАН», 2004. – С. 82–100. URL: <https://disk.yandex.ru/i/gBqGQduEF081cw> (дата обращения 09.07.2024).

9. Голубов Б.Н., Сапожников Ю.А., Горальчук А.В. Миграция радионуклидов из полости подземного термоядерного взрыва «Кристалл» в алмазодобывающий карьер // Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия): Матер. II Республиканской научно-практ. конф. – Якутск, 2004. – Якутск: ЯФ ГУ «Изд-во СО РАН», 2004. – С. 182–192. URL: <https://disk.yandex.ru/i/gBqGQduEF081cw> (дата обращения 09.07.2024).
10. Residual radioactive contamination at the peaceful underground nuclear explosion sites «Craton-3» and «Crystal» in the Republic of Sakha (Yakutia) / A.D. Gedeonov, E.R. Petrov, V.G. Alexeev, I.N. Kuleshova, M.L. Savopulo, L.S. Burtsev, V.Yu. Shkroev, V.I. Arkhipov // J. of Environ. Radioact. – 2002. – Выд. 60. – Iss. 1–2. – P. 221–234. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0265931X01001059> (дата обращения 25.09.2024).
11. Radioecological studies at the Kraton-3 underground nuclear explosion site in 1978–2007: a review / V. Ramzaev, A. Mishin, V. Golikov, T. Argunova, V. Ushnitski, A. Zhuravskaya, P. Sobakin, J. Brown, P. Strand // J. Environ. Radioact. – 2009. – Vol. 100. – Iss. 12. – P. 1092–1099. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0265931X09000782> (дата обращения 25.09.2024).
12. Chevychelov A.P., Sobakin P.I., Molchanova I.V. Radioactive contamination of Permafrost – affected soils with ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr, the products of an accidental underground nuclear explosion // Eurasian soil science. – 2006. – Vol. 39. – № 12. – P. 1362–1369. URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S106422930612012X> (дата обращения 09.09.2024).
13. Modern radioecological situation at the site of the peaceful underground nuclear explosion “Crystal” and radionuclides in the surface waters of the adjacent territory (Western Yakutia) / S.Yu. Artamonova, L.G. Bondareva, M.S. Melgunov, G.V. Simonova // Radiochemistry. – 2023. – Vol. 65. – № 5. – P. 599–617. URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1066362223050119> (дата обращения 09.03.2024).
14. 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. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17699401> (дата обращения 09.07.2024).
15. Shallow permafrost at the crystal site of peaceful underground nuclear explosion (Yakutia, Russia): evidence from electrical resistivity tomography / S. Artamonova, A. Shein, V. Potapov, N. Kozhevnikov, V. Ushnitsky // Energies. – 2022. – Vol. 15. – Iss. 1. ID 15010301 URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/1/301> (дата обращения 09.09.2024).
16. Цифровое тематическое картографирование современного состояния мерзлотных ландшафтов в Якутии / А.Н. Федоров, А.А. Шестакова, Я.И. Торговкин, Н.Ф. Васильев // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2019. – № 2. – С. 36–49. URL: https://www.vnzsvfu.ru/jour/article/view/6?locale=ru_RU (дата обращения 09.09.2024).
17. Алексеев С.В. Криогидрогеологические системы Якутской алмазоносной провинции. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2009. – 319 с.
18. Shvartsev S.L. The chemical composition and strontium isotopes of brines from Tunguska basin: implications for their formation // Geochemistry International. – 2000. – Vol. 38. – Iss. 11. – P. 1070–1083. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13342633> (дата обращения 09.07.2024).
19. Дроздов А.В. Горно-геологические и технологические проблемы при строительстве подземного рудника «Удачный» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 2. – С. 125–131. URL: <https://giab-online.ru/catalog/archives/11141/view> (дата обращения 29.09.2024).
20. Specific of the late Cenozoic geochemical evolution of chloride calcium brines in the Olenek cryoartesian basin / S.V. Alekseev, L.P. Alekseeva, S.L. Shvartsev, N.S. Trifonov, E.S. Sidkina // Geochemistry International. – 2017. – Vol. 55. – Iss. 5. – P. 442–456. URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0016702917050020> (дата обращения 29.09.2024).
21. Alekseeva L.P., Alekseev S.V. Industrial groundwater of the Olenek Artesian Basin: geochemistry and development prospects // Water Resources. – 2018. – Vol. 45. – Iss. 1. – P. 79–88. URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0097807818010025> (дата обращения 29.09.2024).
22. Перспективы использования промышленных рассолов Сибирской платформы для извлечения лития и брома / С.Л. Шварцев, С.В. Алексеев, А.Г. Вахромеев, Л.П. Алексеева // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2012. – Т. 2. – № 1. – С. 30–34. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18040350> (дата обращения 29.09.2024).
23. К минерализации лития гидроминеральной провинции Сибирской платформы / А.Г. Вахромеев, С.В. Алексеев, И.В. Литвинова, Н.В. Мисюркеева, Д.А. Погребная // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса от океана к континенту: Матер. науч. конф. – Иркутск, 18–21 октября 2022. – Вып. 20. – С. 43–45. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49903065> (дата обращения 29.09.2024).
24. Мирные ядерные взрывы: обеспечение общей и радиационной безопасности при их проведении / под рук. проф. В.А. Логачева. – М.: ИздАТ, 2001. – 512 с.
25. Бурцев И.С., Колодезникова Е.Н. Радиационная обстановка в алмазоносных районах Якутии (препринт). – Якутск: ЯНИЦ СО РАН, 1997. – 52 с. URL: <https://yadi.sk/i/Kmp2f2-scGdTLw> (дата обращения 14.07.2024).
26. Киселев В.В., Бурцев И.С. Ликвидация последствий аварийных подземных ядерных взрывов в зоне многолетней мерзлоты. – Якутск: Изд-во ЯНИЦ СО РАН, 1999. – 148 с. URL: <https://disk.yandex.ru/i/J0PHqSdWs0woag> (дата обращения 14.07.2024).
27. Мониторинг аварийных объектов МПЯВ «Кратон-3», «Кристалл» после проведенных реабилитационных мероприятий / В.В. Касаткин, В.А. Ильичев, В.Е. Латышев, Б.П. Мамонов, А.В. Касаткин, Н.С. Седов // Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия): Материалы III Республиканской научно-практ. конф. – Якутск, 18–20 октября 2011. – Якутск: ИП Иванов «СМИК-МАСТЕР», 2012. – С. 144–154. URL: <https://disk.yandex.ru/i/VjISJfo1PGWrqg> (дата обращения 24.07.2024).
28. Лобанов В.В., Мищенко Ю.В., Целлер Е.В. Обоснование корректировок проектных решений по ликвидации последствий аварийных ядерных взрывов на территории Западной Якутии (объекты «Кристалл» и «Кратон-3») // Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия): Матер. II Республиканской научно-практ. конф. – Якутск, 2004. – Якутск: ЯФ ГУ «Изд-во СО РАН», 2004. – С. 100–107. URL: <https://disk.yandex.ru/i/gBqGQduEF081cw> (дата обращения 09.07.2024).

29. Gas transport across the low-permeability containment zone of an underground nuclear explosion / Ch.R. Carrigan, Y. Sun, S.L. Hunter, D.G. Ruddle, M.D. Simpson, C.M. Obi, H.E. Huckins-Gang, L.B. Prothro, M.J. Townsend // *Scientific reports*. – 2020. – 10:1437. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-58445-1> (дата обращения 09.09.2024).
30. Implication of underground nuclear explosion cavity evolution for radionuclide isotopic composition / Y. Sun, Ch.R. Carrigan, E. Pili, T. Antoun // *Pure and Applied Geophysics*. – 2023. – Vol. 180. – P. 1395–1406. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00024-022-03026-8> (дата обращения 09.09.2024).

Информация об авторах

Светлана Юрьевна Артамонова, доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3. artam@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1428-6762>

Поступила в редакцию: 11.10.2024

Поступила после рецензирования: 28.10.2024

Принята к публикации: 17.07.2025

REFERENCES

1. Adushkin V.V., Spivak A.A. *Underground explosions*. Moscow, Nauka Publ., 2007. 579 p. (In Russ.)
2. Artamonova S.Yu. *Geotechnogenic systems of underground nuclear explosions on the territory of Yakutia (1974–1987): geoecological models and features of the transfer of radionuclides and related elements*. Dr. Diss. Tomsk, 2015. 291 p. (In Russ.) Available at: <http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/30540/1/dis00024.pdf> (accessed 26 June 2024).
3. Artamonova S.Yu., Shein A.N., Potapov V.V., Kozhevnikov N.O., Novikova P.N., Ushnitskii V.E. Magnetic anomalies at the site of the peaceful underground nuclear explosion «Crystal» (Western Yakutia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets engineering*, 2020, vol. 331, no. 12, pp. 158–172. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/12/2949>
4. Ziolkowski A. Bayesian inversion of MDJ seismograms for source parameters and yields of DPRK Underground nuclear explosions 2 to 6. *Pure and Applied Geophysics*, 2024, 28 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-024-03454-8>
5. Elkhoully Sh., Ali Ghada. Seismic discrimination between nuclear explosions and natural earthquakes using multi-machine learning techniques. *Pure and Applied Geophysics*, 2024, 28 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-024-03463-7>
6. Torrano Z.A., Boggs M.A., Sanborn M. The distinct conditions of atmospheric and underground nuclear tests revealed by Zn isotopic compositions of nuclear debris samples. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2024, vol. 333, pp. 805–814. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10967-023-09291-8>
7. Heath J.E., Kuhlman K.L., Broome S.T., Wilson J.E., Malama B. Heterogeneous multiphase flow properties of volcanic rocks and implications for noble gas transport from underground nuclear explosions. *Vadose Zone Journal*, 2021, vol. 20, Iss. 3, p. 22 DOI: <https://doi.org/10.1002/vzj2.20123>
8. Kasatkin V.V., Ilichev V.A., Myasnikov K.B., Klishin V.I., Mamonov B.P. State of radiation safety on the objects of the peaceful nuclear explosions on territory of the Republic Sakha (Yakutia). *Radiation safety in the Republic Sakha (Yakutia). Proc. of II Republic Scientific-practical Conference*. Yakutsk, 2004. Yakutsk, Yak. Div. SB RAS Publ., 2004. pp. 82–100. (In Russ.) Available at: <https://disk.yandex.ru/i/gBqGQduEF081cw> (accessed 9 July 2024).
9. Golubov B.N., Sapozhnikov Yu.A., Goralchuk A.V. Radionuclides migration from the confinement cavity of the underground thermonuclear explosion «Crystal» into diamond mining quarry. *Radiation safety in the Republic Sakha (Yakutia). Proc. of II Republic Scientific-practical Conference*. Yakutsk, 2004. Yakutsk, Yak. Div. SB RAS Publ., 2004. pp. 182–192. (In Russ.) Available at: <https://disk.yandex.ru/i/gBqGQduEF081cw> (accessed 9 July 2024).
10. Gedeonov A.D., Petrov E.R., Alexeev V.G., Kuleshova I.N., Savopulo M.L., Burtsev L.S., Shkroev V.Yu., Arkhipov V.I., Residual radioactive contamination at the peaceful underground nuclear explosion sites «Cration-3» and «Crystal» in the Republic of Sakha (Yakutia). *J. of Environ. Radioact.*, 2002, vol. 60, Iss. 1–2, pp. 221–234. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(01\)00105-9](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(01)00105-9)
11. Ramzaev V., Mishin A., Golikov V., Argunova T., Ushnitski V., Zhuravskaya A., Sobakin P., Brown J., Strand P. Radioecological studies at the Kraton–3 underground nuclear explosion site in 1978–2007: a review. *J. Environ. Radioact.*, 2009, vol. 100, Iss. 12, pp. 1092–1099. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2009.04.002>
12. Chevychelov A.P., Sobakin P.I., Molchanova I.V. Radioactive contamination of Permafrost – affected soils with ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr, the products of an accidental underground nuclear explosion. *Eurasian soil science*, 2006, vol. 39, no. 12, pp. 1362–1369. DOI: <https://doi.org/10.1134/S106422930612012X>
13. Artamonova S.Yu., Bondareva L.G., Melgunov M.S., Simonova G.V. Modern Radioecological situation at the site of the peaceful underground nuclear explosion “Crystal” and radionuclides in the surface waters of the adjacent territory (Western Yakutia). *Radiochemistry*, 2023, vol. 65, no. 5, pp. 599–617. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1066362223050119>
14. Artamonova S.Yu., Bondareva L.G., Antonov E.Yu., Kozhevnikov N.O. Geoecologic model of «Crystal» peaceful underground nuclear explosion area (Yakutia). *Environmental Geosciences*, 2012, Iss. 2, pp. 143–158. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17699401> (accessed 9 July 2024).
15. Artamonova S., Shein A., Potapov V., Kozhevnikov N., Ushnitsky V. Shallow permafrost at the crystal site of peaceful underground nuclear explosion (Yakutia, Russia): evidence from electrical resistivity tomography. *Energies*, 2022, vol. 15, Iss. 1, ID 15010301. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15010301>
16. Fedorov A.N., Shestakova A.A., Torgovkin Y.I., Vasilev N.F. Digital thematic mapping of modern condition of permafrost landscapes in Yakutia. *Vestnik of North-Eastern Federal University Series "Earth Sciences"*, 2019, vol. 2, pp. 36–49. (In Russ.) Available at: https://www.vnzsvfu.ru/jour/article/view /6?locale=ru_RU (accessed 9 September 2024).

17. Alekseev S.V. *Cryohydrogeologic systems of Yakutsk Diamond-Bearing Province*. Novosibirsk, Academic «Geo» Publ., 2009. 319 p. (In Russ.)
18. Shvartsev S.L. The chemical composition and strontium isotopes of brines from Tunguska basin: implications for their formation. *Geochemistry International*, 2000, vol. 38, Iss. 11, pp. 1070–1083. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13342633> (accessed 9 July 2024).
19. Drozdov A.V. Mining-and-geological and engineering problems in construction of Udachny underground mine. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2015, Iss. 2, pp. 125–131. (In Russ.) Available at: <https://giab-online.ru/catalog/archives/11141/view> (accessed 29 September 2024).
20. Alekseev S.V., Alekseeva L.P., Shvartsev S.L., Trifonov N.S., Sidkina E.S. Specific of the late Cenozoic geochemical evolution of chloride calcium brines in the Olenek cryoartesian basin. *Geochemistry International*, 2017, vol. 5, pp. 429–444. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016702917050020>
21. Alekseeva L.P., Alekseev S.V. Industrial groundwater of the Olenek artesian basin: geochemistry and development prospects. *Water Resources*, 2018, vol. 45, Iss. 1, pp. 79–88. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0097807818010025>
22. Shvartsev S.L., Alexeev S.V., Vakhromeev A.G., Alexeeva L.P. Perspective use of industrial brines in Siberian platform for extract of Lithium and Bromine. *INTEREKSPO GEO-Sibir*, 2012, vol. 2, Iss. 1, pp. 30–34. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18040350> (accessed 29 September 2024).
23. Vakhromeev A.G., Alexeev S.V., Litvinova I.V., Misyurkeeva N.V., Pogrebnaya D.A. Concerning lithium mineragenium of the hydromineral province of the Siberian platform. *Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian Mobile Belt (from the Ocean to the Continent). Material of the Scientific Conference*. Irkutsk, 18–21 October 2022. Vol. 20, pp. 43–45. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49903065> (accessed 29 September 2024).
24. *Peaceful nuclear explosion: common and radiation safety arrangements*. Chief V.A. Logachev. Moscow, Izdat Publ., 2001. 512 p. (In Russ.)
25. Burtsev I.S., Kolodeznikova E.N. *Radiation situation in the diamond-bearing regions of Yakutia (preprint)*. Yakutsk, YANC SO RAN Publ., 1997. 52 p. (In Russ.) Available at: <https://yadi.sk/i/Kmp2f2-scGdTLw> (accessed 14 July 2024).
26. Kiselev V.V., Burtsev I.S. *Elimination of the consequences of emergency underground nuclear explosions in the cryolithozone*. Yakutsk, YANC SB FAS Publ., 1999. 148 p. (In Russ.) Available at: <https://disk.yandex.ru/i/J0PHqSdWs0woag> (accessed 14 July 2024).
27. Kasatkin V.V., Ilichev V.A., Latyshev V.E., Mamonov B.P., Kasatkin A.V., Sedov N.S. Monitoring of the emergency objects PUNE «Kraton-3», «Crystal» after rehabilitation measures. *Radiation safety in the Republic Sakha (Yakutia). Proc. of III Republic Scientific-practical Conference*. Yakutsk, 18–20 October, 2004. Yakutsk, IB Ivanov «SMIK-MASTER» Publ., 2012. pp. 144–154. (In Russ.) Available at: <https://disk.yandex.ru/i/VjISJfo1PGWrqg> (accessed 24 July 2024).
28. Lobanov V.V., Mishhenko Yu.V., Celler E.V. Justification for adjustments to design solution to eliminate the consequences of emergency nuclear explosions in Western Yakutia (objects «Crystal» and «Kraton-3»). *Radiation safety in the Republic Sakha (Yakutia). Proc. of II Republic Scientific-practical Conference*. Yakutsk, 2004. Yakutsk, Yak. Div. SB RAS Publ., 2004. pp. 100–107. (In Russ.) Available at: <https://disk.yandex.ru/i/gBqGQduEF081cw> (accessed 9 July 2024).
29. Carrigan Ch.R., Sun Y., Hunter S.L., Ruddle D.G., Simpson M.D., Obi C.M., Huckins-Gang H.E., Prothro L.B., Townsend M.J. Gas transport across the low-permeability containment zone of an underground nuclear explosion. *Scientific reports*, 2020, 10:1437. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58445-1>
30. Sun Y., Carrigan Ch.R., Pili E., Antoun T. Implication of underground nuclear explosion cavity evolution for radionuclide isotopic composition. *Pure and Applied Geophysics*, 2023, vol. 180, pp. 1395–1406. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03026-8>

Information about the authors

Svetlana Yu. Artamonova, Dr. Sc., Senior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3, Akademician Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. artam@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1428-6762>

Received: 11.10.2024

Revised: 28.10.2024

Accepted: 17.07.2025