

УДК 504.05+550.370

DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4662

Шифр специальности ВАК: 25.00.36

Современное состояние необустроенного приповерхностного захоронения особых радиоактивных отходов на эпицентре мирного подземного ядерного взрыва «Кристалл» (Якутия): по результатам электротомографических зондирований, наземной магнитной съемки и изучения водных стоков

С.Ю. Артамонова^{1✉}, А.Н. Шеин^{2,3}

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Россия, г. Новосибирск

² Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, г. Новосибирск

³ Научный центр изучения Арктики, Россия, г. Салехард

✉ artam@igm.nsc.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена рисками распространения радионуклидов в среду обитания человека. *Цель:* оценить современное геоэкологическое состояние необустроенного приповерхностного захоронения особых радиоактивных отходов в виде глыбово-щебнистой насыпи на эпицентре подземного ядерного взрыва «Кристалл». *Объект.* Взрыв «Кристалл» был проведен в 1974 г. в мерзлых породах на глубине 98 м, в результате на эпицентре возник навал с провалившейся центральной частью. Содержание радионуклидов в грунтах эпицентра превышало минимальные значения активности для твердых радиоактивных отходов, а центральная зона взрыва на глубине всего 98 м стала пунктом размещения особых радиоактивных отходов. Для криогенной иммобилизации радионуклидов в грунтах и предотвращения выхода подземной активности в 1992 г. навал и устье боевой скважины были захоронены под глыбово-щебнистой насыпью, состоящей из обломков известняков и доломитов. В 2006 г. насыпь была наращена, в ней был наморожен льдогрунтовый слой мощностью 0,6 м. *Методы:* зондирования методом электротомографии, наземная магнитная съемка, радиометрические измерения; жидкостно-сцинтилляционная спектрометрия, бета-радиометрия и альфа-спектрометрия с предварительной радиохимической подготовкой счетных образцов. *Результаты.* Глыбово-щебнистая насыпь находится в талом и увлажненном состоянии. Сквозь насыпь просачиваются талые и метеорные воды, также, вероятно, идет свободная конвекции воздуха, которая приводит к конденсации атмосферной влаги и, как следствие, к накоплению воды в насыпи. Тем не менее в настоящее время водная миграция радионуклидов из-под насыпи характеризуется как слабоинтенсивная: в водных стоках из-под насыпи активность ³H составляет всего 4–12 Бк/дм³, ⁹⁰Sr – 0,004–0,4 Бк/дм³, ^{239,240}Pu и ²³⁸Pu не обнаружены (<0,000001 Бк/дм³). Согласно этим показателям, в настоящее время нет необходимости для дополнительных мер по укреплению или модификации насыпи.

Ключевые слова: подземный ядерный взрыв, особые радиоактивные отходы, радионуклиды, тритий, захоронение радиоактивных отходов, геотехногенная система, многолетняя мерзлота, Якутия, электротомография, миграция радионуклидов

Благодарности: Аналитические работы проведены в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований СО РАН при Институте геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск), в Томском Центре коллективного пользования СО РАН (г. Томск), Аналитическом центре Сибирского федерального университета (г. Красноярск). 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. С.Ю. 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 гг., 2018–2022 гг.

Для цитирования: Артамонова С.Ю., Шеин А.Н. Современное состояние необустроенного приповерхностного захоронения особых радиоактивных отходов на эпицентре мирного подземного ядерного взрыва «Кристалл» (Якутия): по результатам электротомографических зондирований, наземной магнитной съемки и изучения водных стоков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 3. – С. 119–140. DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4662

UDC 504.05+550.370

DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4662

Modern state of the undeveloped near-surface disposal of special radioactive wastes at the epicenter of the peaceful underground nuclear explosion «Crystal» (Yakutia): evidence from electrical resistivity tomography, land geomagnetic survey and water runoff study

S.Yu. Artamonova^{1✉}, A.N. Shein^{2,3}

¹ V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

² Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

³ Arctic Research Center of the Yamal-Nenets Autonomous District, Salekhard, Russian Federation

✉artam@igm.nsc.ru

Abstract. Relevance. Risks of the radionuclides entering the human environment. **Aim.** To assess the current geoecological state of the undeveloped near-surface disposal of special radioactive wastes in the form of the block-rubble artificial cover at the epicenter of the peaceful underground nuclear explosion "Crystal". **Object.** Due to the explosion "Crystal", carried out in 1974 in the frozen rocks at the depth of 98 m, an upthrust dome with a collapsed central part was produced at the epicenter. The central explosion area became the site of special radioactive wastes emplacement. A high content of radionuclides determined in epicenter soils exceeds the minimum activity values for solid waste. To cryogenic immobilization of radionuclides in epicenter soils and to prevent the radionuclides exit from the central explosion area, the head of the emplacement hole and the dome-shaped mound were buried under the block-rubble stone material (limestone and dolomite fragments) in 1992, and the artificial cover was topped up in 2006. An ice-soil layer of 0.6 m thick was frozen in it in 2006. **Methods.** Electrical resistivity tomography, land geomagnetic survey, radiometric measurements, liquid scintillation spectrometry, beta-radiometry and alpha-spectrometry with preliminary radiochemical preparation of countable samples. **Results.** The block-rubble artificial cover is not frozen and waterlogged. Snowmelt and rain waters seep through the cover. There is probably free air convection in the cover, which leads to the condensation of atmospheric moisture and then accumulation of water in it. Nevertheless, nowadays the migration of radionuclides with water from under the block-rubble artificial cover is characterized as low-intensity: the activity (Bq/dm³) of ³H is only 4–12, ⁹⁰Sr – 0.004–0.4, ^{239,240}Pu and ²³⁸Pu isotopes were not detected (<0.000001 Bq/dm³). According to these indicator parameters, there is currently no need in additional measures to strengthen or modify the block-rubble artificial cover.

Keywords: underground nuclear explosion, special radioactive wastes, radionuclides, tritium, disposal of radioactive wastes, geotechnogenic system, permafrost, Yakutia, electrical resistivity tomography, radionuclide migration

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 the 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., Shein A.N. Modern state of the undeveloped near-surface disposal of special radioactive wastes at the epicenter of the peaceful underground nuclear explosion «Crystal» (Yakutia): evidence from electrical resistivity tomography, land geomagnetic survey and water runoff study. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 3, pp. 119–140. DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4662

Введение

Проблема радиоактивных отходов стала супер-проблемой еще во второй половине XX в. [1]. Основные исследования направлены на разработку способов надежной инкорпорации радиоактивных отходов (РАО) с разными материалами [2], разработку защитных барьеров для хранилищ [3] и способов захоронения РАО в глубоких геологических слоях [4, 5]. Но особое место среди проблем, свя-

занных с обращением с РАО, занимает проблема мирных подземных ядерных взрывов (ПЯВ). В Якутии в период с 1974 по 1987 гг. было проведено 12 ПЯВ, первым из них был взрыв рыхления «Кристалл», четыре взрыва были проведены в качестве источников сейсмических волн для глубокого зондирования Земли, шесть взрывов – для интенсификации добычи нефти и газа и еще один взрыв – для создания подземной емкости [6].

ПЯВ является разовым применением ядерной энергии, когда в результате взрыва в недрах образуются особые радиоактивные отходы (ОРАО) с весьма длительной продолжительностью существования (по десятикратному периоду полураспада долгоживущего изотопа ^{239}Pu – не менее 241 тысячи лет). По проекту при взрыве допускался выход малой части газообразных продуктов взрыва (первых процентов от общей активности) в атмосферу. Однако основная часть ОРАО содержится в центральной зоне взрыва (ЦЗВ), где в недрах в результате расплавления и испарения пород образуется полость, которая впоследствии под действием силы тяжести может сжаться и разрушиться, формируя над собой столб обрушения (рис. 1).

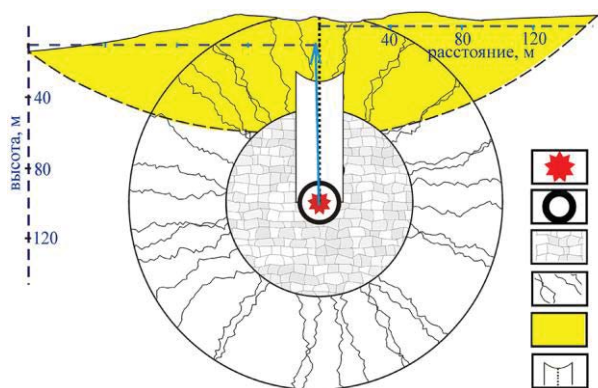


Рис. 1. Схема ослабленной зоны и навала грунтов на эпицентре ПЯВ «Кристалл» (02.10.1974 г.), построенная С.Ю. Артамоновой на основе расчетов зон разрушения по экспериментальным физическим формулам, приведенным в [7]. Вид с юго-запада на северо-восток. Условные обозначения: 1 – ЦЗВ; 2 – полость взрыва с «коркой» уплотнившихся и расплавленных пород; 3 – зона дробления; 4 – зона трещиноватости; 5 – зона откола на границе литосфера–атмосфера; 6 – столб обрушения (точечная линия посередине – вертикальный ствол боевой скважины). Бирюзовой стрелкой показано направление ударной волны сжатия при взрыве (на эпицентр взрыва)

Fig. 1. Scheme of the weakened zone and settled back up-thrust dome at the epicenter of the peaceful underground nuclear explosion (PUNE) "Crystal", prepared by S. Artamonova with calculation using experimental physical formulas of V. Adushkin [7]. Symbols: 1 – explosion center (shot point); 2 – confinement cavity with a hardpan of molten rock; 3 – crushed zone; 4 – cracked zone; 5 – spalled zone at the lithosphere–atmosphere boundary; 6 – chimney (dashed line in the middle is the emplacement hole). Arrow shows the direction of shock pressure wave

Отходы ПЯВ состоят из: 1) осколков вынужденного деления тяжелых делящихся материалов, представленных первоначально примерно 80-тью

изотопами 35-ти химических элементов от Zn до Gd; 2) радионуклидов, образовавшихся в результате взаимодействия нейтронов с материалами вмещающей геологической среды и инженерных конструкций (^3H , ^{60}Co и др., т. н. наведенной активности); 3) несгоревших остатков делящихся (^{239}Pu , ^{235}U) и термоядерных (^3H) материалов; 4) радионуклидов (^{238}Pu , ^{238}U), используемых в конструкции ядерно-взрывного устройства.

«Особость» ОРАО на объектах ПЯВ заключается, во-первых, в их «неудаляемости» при существующем уровне экономических и технологических возможностей, согласно действующего законодательства РФ, во-вторых, в отсутствии защитных барьеров в недрах вокруг ЦЗВ. Более того, ЦЗВ окружена трещиноватыми зонами механического разрушения, зачастую герметичность ствола боевой скважины и заколонного пространства после взрыва нарушается, что может способствовать выходу радионуклидов во вмещающую геологическую среду и на поверхность Земли. В РФ принята стратегия постепенного перевода объектов ПЯВ из необустроенных пунктов размещения в пункты консервации, а затем и в пункты захоронения ОРАО, по-видимому, предполагающей обустройство инженерных защитных барьеров, в т. ч. подземных. В настоящее время ведется изучение влияния объектов ПЯВ на недра и обоснование критериев охранных зон [8, 9], а практическое решение получают проекты по реабилитации участков поверхностного загрязнения, нацеленные на снижение уровней загрязнения и стабилизацию радиационной обстановки на объектах ПЯВ, отнесенных к аварийным (4 объекта), и на объектах, где официально признано наличие этих загрязненных участков (19 объектов) [10, 11]. В целом разработано много способов реабилитации радиоактивно-загрязненных земель [12, 13], в том числе для восстановления сельхозугодий [14]. На объектах ПЯВ «Глобус-1», «Кратон-3», «Грифон-2» загрязненный верхний слой почв вместе с растительным покровом снимали с последующим приповерхностным захоронением [10, 11].

В настоящее время все более актуальной становится оценка эффективности реабилитационных работ, проведенных на объектах ПЯВ: насколько предпринятые меры улучшили радиоэкологическую обстановку на местах, какие недостатки были допущены и какие виды работ нужно предусмотреть в будущем? Известны единичные публикации в данном направлении [15, 16]. В связи с этим нами поставлена цель оценить результаты реабилитационных работ на объектах ПЯВ на примере взрыва «Кристалл», проведенного 02.10.1974 г. в Якутии.

Целью исследований, результаты которых представлены в настоящей статье, была оценка совре-

менного геоэкологического состояния необустроенного приповерхностного захоронения ОРАО в виде глыбово-щебнистой насыпи на эпицентре ПЯВ «Кристалл» с применением методов электро-томографии, наземной магнитной съемки и изучения радионуклидного состава водных стоков.

Объект ПЯВ «Кристалл»

Природные условия. Району проведения ПЯВ «Кристалл» характерен суровый резко-континентальный климат со среднегодовой отрицательной температурой воздуха $-13,3^{\circ}\text{C}$, это зона распространения сплошной многолетней мерзлоты. На холмисто-увалистом рельефе с абсолютными отметками на водоразделах 400–600 м с речным врезом 100–200 м произрастает северная редкостойная тайга с доминирующим древесным видом – лиственницей Гмелина (*Larix Gmelinii*), мохово-лишайниковым покровом (род *Cladina*, род *Dicranum*, *Hylacomium*). Подстилающие породы на глубину до 200 м содержат воду в виде льда. Мощность сезонно-талого слоя составляет всего от 0,2 до 1,8 м в зависимости от экспозиции склона и растительного покрова, есть талики под руслами рек [17]. В геологическом отношении район расположен на Сибирской платформе (рис. 2, а). Четвертичные отложения имеют ограниченное распространение и в основном приурочены к понижениям рельефа, где мощность может достигать 10 м. Ос-

новную часть геологической среды района составляют субгоризонтально залегающие чередующиеся слои известняков, доломитов и их глинистых разностей кембрийского возраста с общей мощностью около 2200 м. Мощности терригенно-карбонатных отложений венда (эдиакария), подстилающих кембрийские породы, и морских пород ордовика, залегающих на кембрийских породах в виде прерывистого покрова-плаща, незначительные – не превышают 200 м. Эта осадочная толща несогласно перекрывает архейский кристаллический фундамент.

Осадочную толщу прорывают кимберлитовые трубки, редкие дайки долеритов, внедрившиеся по зонам разломов. Район относится к Якутской алмазодонной провинции. Под толщей многолетнемерзлых пород выделяют пять подземных водоносных комплексов: верхнекембрийский, I среднекембрийский, II среднекембрийский, нижнекембрийский и вендский, район относится к зоне распространения сверхкрепких подземных рассолов Сибирской платформы (рис. 2, а) [18, 19]. Два верхних водоносных комплекса насыщены подземными рассолами с отрицательной температурой (криопэгами). Среднекембрийские и нижнекембрийские водоносные комплексы отличаются водообильностью, насыщены напорными кальциевыми хлоридными рассолами с минерализацией до $450\text{--}600\text{ г/дм}^3$. Водоносный комплекс венда изучен мало.

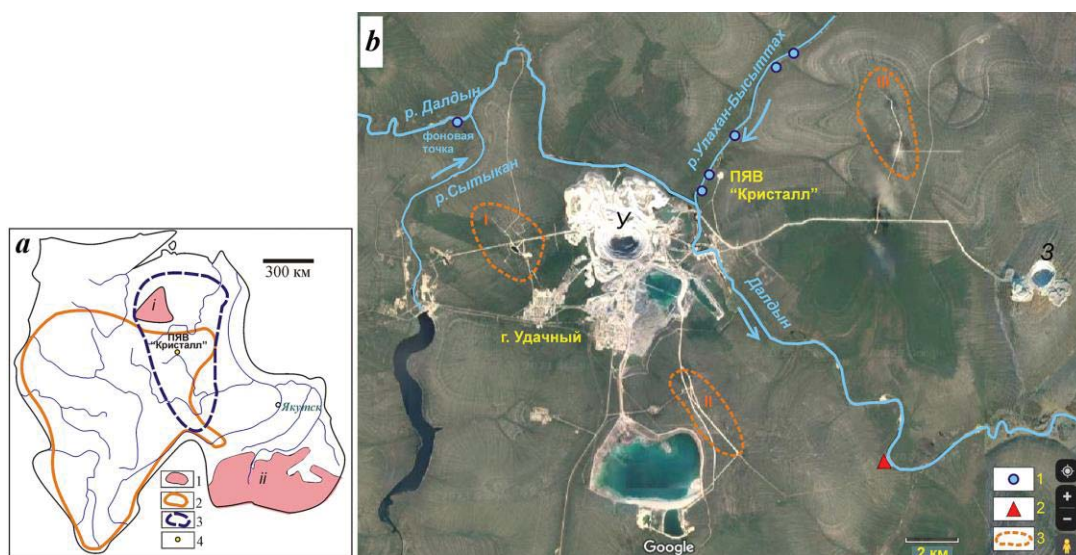


Рис. 2. Расположение объекта ПЯВ «Кристалл»: (а) на Сибирской платформе и (б) в бассейне р. Далдын, около разрабатываемых кимберлитовых трубок «Удачная» (У) и «Зарница» (З) (на основе космоснимка Google из открытых источников). Условные обозначения: (а): 1 – Анабарский (i) и Алданский (ii) щиты; 2 – зона распространения сверхкрепких подземных рассолов Сибирской платформы; 3 – Якутская алмазодонная провинция; 4 – ПЯВ «Кристалл»; (б): 1 – точки отбора речной воды, 2 – естественный выход подземных рассолов; 3 – участки закачки дренажных рассолов и их номера I–III

Fig. 2. Location of the PUNE "Crystal" site on the Siberian Craton (a) on River Daldyn Basin (b) nearby the mining kimberlite pipes "Udachnaya" (Y) and "Zarnitsa" (3) (on Google map). Symbols: (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) 1 – water sampling points; 2 – natural groundwater source; 3 – sites of drainage brines pumping I–III

Характеристики взрыва и реабилитационные работы. Взрыв «Кристалл» мощностью 1,7 кт в тротиловом эквиваленте был произведен на глубине 98 м в 300 м от уреза воды р. Улахан-Бысыттах – левого притока р. Далдын в бассейне р. Марха (рис. 2, б). Боевой скважиной была вскрыта малая толика геологического разреза района: в интервале 0–5 м вскрыты суглинки и щебень четвертичных отложений, ниже до глубины 105 м – переслаивание многолетнемерзлых глинистых и доломитизированных известняков [20]. В атмосферу фактически вышло примерно 1 % общей активности, образовавшейся при взрыве, вместо проектных 4 % [6]. Это был первый из восьми запланированных близповерхностных взрывов для получения навала высотой 27–30 м поперек долины р. Улахан-Бысыттах, как основы для строительства плотины хвостохранилища общей длиной 1800 м, шириной по гребню 85 м [6, 21]. На эпицентре взрыва «Кристалл» появился навал с провалившейся центральной частью, форма которого походила на кальдеру вулкана, т. е. это был скорее провал, окруженный гребнем (рис. 3, а), но мы продолжим называть его навалом. Диаметр навала по основанию составлял около 200 м, а высота по гребню – всего 10–14 м (рис. 1, 3, а), т. е. в два раза ниже расчетной, что послужило официальной причиной для отказа от проведения остальных взрывов [6]. Впервые с использованием программного пакета Surfer и встроенного в него инструмента Volume нами построена цифровая модель рельефа (ЦМР) навала и рассчитан его объем: он составил $143000 \pm 4300 \text{ м}^3$ (рис. 3, а). При небольшом уклоне рельефа и малой глубине взрыва эпицентр взрыва практически совпал с устьем боевой скважины (рис. 1) [22].

В 2001 г. были опубликованы данные о радиоактивности навала в первые часы и дни после взрыва: через 1 час после взрыва 02.10.1974 г. на навале мощность экспозиционной дозы гамма-излучения (МЭД) была около 10–12 Р/ч, в 500 м от эпицентра через 2 часа МЭД составляла 0,3 Р/ч, а через 24 ч снизилась до 0,04 Р/ч [6], то есть начальная радиоактивность навала, которая быстро снижалась по мере распада короткоживущих изотопов, была значительной. В 1990 г. при первом посещении объекта «Кристалл» после его рассекречивания в центре обводненного навала якутскими исследователями был обнаружен фрагмент обсадной колонны длиной 12 м, вытолкнутый при взрыве (рис. 3, б), МЭД на навале составляла 50–65 мкР/ч, тогда как в окрестностях вокруг навала – преимущественно 6–12 мкР/ч [23]. Кроме радиометрических измерений, другие открытые исследования после 1990 г. на навале не успели выполнить, поскольку уже в 1992 г. по решению АО ВНИПИПТ ГК «РОСАТОМ» (современного преемника организации, проводившей взрывы) навал засыпали глыбово-

щебнистым материалом, привезенным из отвалов пустых пород кимберлитовой трубки «Удачная» [23]. Однако в 1993 г. у северо-восточного подножья насыпи был выявлен радиоактивно-загрязненный участок с МЭД 20–25 мкР/ч (рис. 3, а, пунктирная область), что до двух раз превышало МЭД, распространенные в окрестностях. Эти невысокие МЭД – 20–25 мкР/ч – не в полной мере отражали реальную степень радиационной опасности. В почвах этого участка были обнаружены $^{239,240}\text{Pu}$, ^{137}Cs , ^{241}Am , активность которых превышала минимальные значения активности для твердых радиоактивных отходов в 21,6; 1,1; 2,8 раз и составляла (Бк/кг): $^{239,240}\text{Pu}$ – 21600, ^{137}Cs – 11200, ^{241}Am – 2800 соответственно. Кроме того, были обнаружены ^{60}Co с активностью 2720 Бк/кг и ^{125}Sb – 210 Бк/кг [23], ^{90}Sr – 800 Бк/кг [24]. Именно открытие этих загрязненных почв стало основанием для отнесения ПЯВ «Кристалл» в 1999 г. к аварийным взрывам [25, 26].

Следует полагать, что в 1990 г. грунты навала содержали еще большее количество техногенных радионуклидов, чем почвы прилегающего загрязненного участка, поскольку на навале МЭД 50–65 мкР/ч почти трехкратно превышала МЭД на прилегающем загрязненном участке, и грунты навала представляли собой твердые радиоактивные отходы. Засыпка навала глыбово-щебнистой насыпью всего через год с небольшим после рассекречивания объекта (зимой 1992 г.) подкрепляет наше предположение.

В 2006 г. для захоронения прилегающего загрязненного участка насыпь была наращена с северо-восточной стороны, и ее диаметр увеличился до 260 м при высоте от 7 до 20 м. Общим объемом насыпи с погребенным под ней навалом, по нашим оценкам, составляет $624000 \pm 20000 \text{ м}^3$ (рис. 4). Дополнительно в том же году в насыпи был наморожен льдогрунтовый слой мощностью 0,6 м, который для теплоизоляции сверху перекрыли трехметровым слоем щебня [27]. В условиях сурового резко-континентального климата и сплошной многолетней мерзлоты рассчитывали, что при мощности насыпи, превышающей в 10 и более раз мощность сезонно-талого слоя, составляющую 0,2–1,8 м для природных ландшафтов района, в насыпи и под ней постепенно восстановится многолетняя мерзлота за счет подтягивания подошвы сезонно-талого слоя, а намороженный в насыпи льдогрунтовый слой ускорит её замерзание, тем самым будет достигнута долговременная надежная морозная иммобилизации радионуклидов в погребенных грунтах навала и прилегающего участка, а также будут надежно перекрыты устье боевой скважины и ослабленная зона вокруг неё, соединяющие дневную поверхность с ОРАО, размещенными в ЦЗВ на глубине всего 98 м [6, 25, 28].

Так, на эпицентре ПЯВ «Кристалл» было сформировано необустроенное приповерхностное захоронение ОРАО в виде насыпи из глыбово-щебнистых чистых обломков известняков и доломитов, взятых из отвалов пустых пород карьера

кимберлитовой трубки «Удачная» (все захоронения, где отходы размещены не глубже 100 м, относятся к категории приповерхностных) (рис. 4).

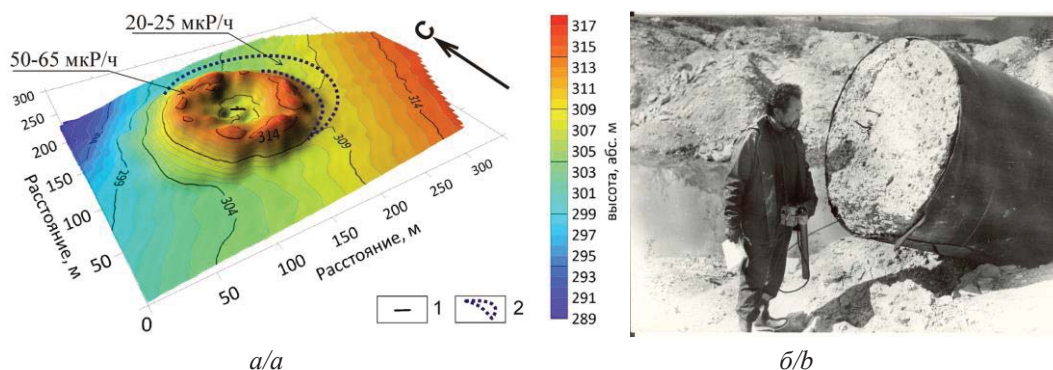


Рис. 3. а) ЦМР навала на эпицентре ПЯВ «Кристалл». Условные обозначения: 1 – фрагмент обсадной колонны; 2 – загрязненный участок, прилегающий к навалу с северо-восточной стороны, и МЭД (мкР/ч) по данным замеров 1990 г. [23]; б) фрагмент обсадной колонны на эпицентре ПЯВ «Кристалл» (фото И.Д. Архипова, с радиометром Е.С. Секов, 1990 г.) [23. С. 32]

Fig. 3. 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 dose rate (EDR) ($\mu\text{R/h}$) in 1990 [23]; б) cement-filled casing fragment of the emplacement hole of the "Crystal" (12 m long) (depicted by I.D. Arkhipov, E.S. Sekov with the radiometer is on the photo, 1990) [23. P. 32]

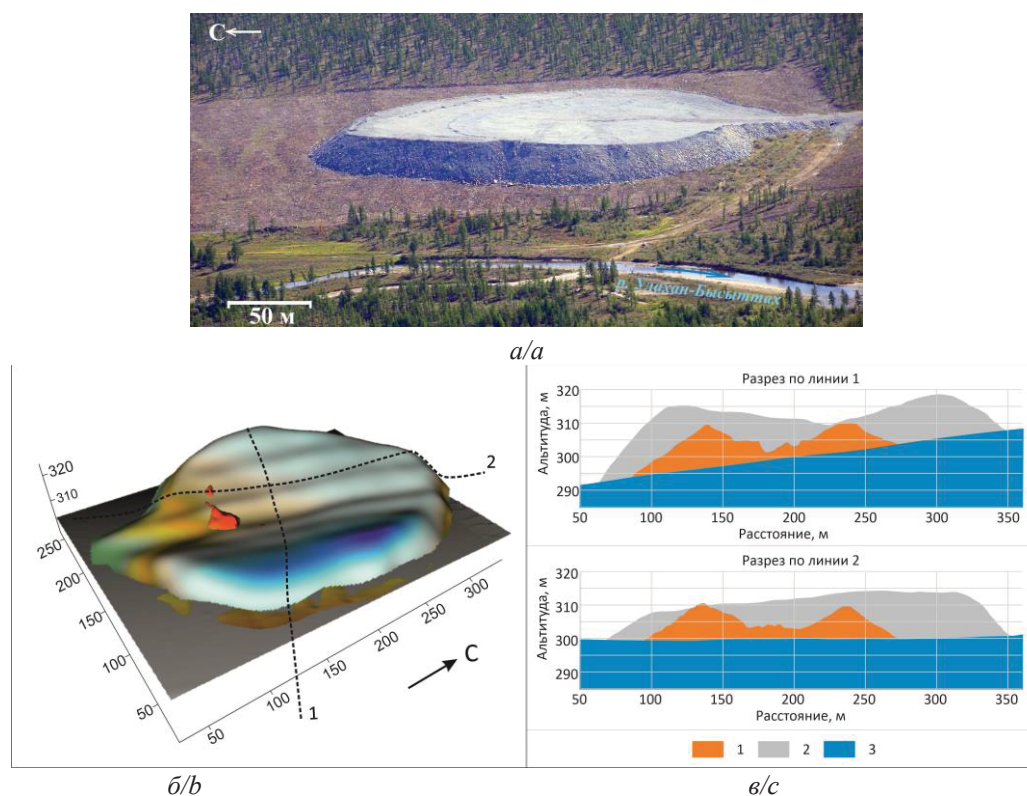


Рис. 4. а) глыбово-щебнистая насыпь на эпицентре ПЯВ «Кристалл» летом 2007 г. (автор фото В.Е. Захаров, 2007 г.); б) ЦМР насыпи, совмещенная с первичной формой навала, пунктиром показаны линии разрезов 1 и 2; в) разрезы ЦМР насыпи. Условные обозначения: 1 – навал; 2 – насыпь; 3 – естественный склон

Fig. 4. а) block-rubble artificial cover at the epicenter PUNE «Crystal» in summer 2007 (photograph by V.E. Zakharov, 2007); б) DEM of the artificial cover, combined with primary form of dome-shaped mound; dashed lines show the direction of sections; в) DEM sections of the block-rubble artificial cover. Symbols: 1 – dome shaped mound; 2 – block-rubble artificial cover; 3 – natural slope

В рамках реабилитационного проекта в 2006 г. были проведены и другие работы: механизированным способом удалены растительность и мохово-лишайниковый покров на участке вокруг насыпи размером 430×330 м, названном технологической площадкой, которую обнесли забором из металлических столбов и колючей проволоки, а собранный почвенно-растительный материал разместили за забором в виде длинных гряд (рис. 4).

На сегодняшний день объект «Кристалл» – один из наиболее обследованных объектов ПЯВ в Якутии: первые открытые радиометрические замеры проведены в 1990 г., пробы почв изучены в 1993 г. [23], а в начале 2000-х гг. проведен большой комплекс работ по оценке загрязнения почв, растительности [24, 29, 30] и рисков возможного облучения местного населения [31]. Пионерные зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) в 2008 г. позволили впервые оценить геоэкологическую обстановку в недрах объекта «Кристалл» и прилегающей территории [20]. Проблема водного переноса радионуклидов на объекте «Кристалл» обсуждалась исследователями Института динамики геосфер РАН [21], Акционерного общества «Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии» государственной корпорации РОСАТОМ (ВНИПИ протехнологии) [10], Института геологии и минералогии СО РАН [20, 32, 33].

Комплексная геоэкологическая оценка реабилитационных работ на эпицентре ПЯВ «Кристалл», в том числе современного состояния насыпи – необустроенного приповерхностного захоронения особых радиоактивных отходов, еще не проводилась.

Методы и материалы

В настоящей статье рассматриваются результаты зондирований методом электротомографии, наземной магнитной съемки в 2019 г., замеров МЭД и изучения водных проб в 2008, 2012, 2018–2021 гг. в совокупности с опубликованными данными других исследователей. Для построения ЦМР насыпи и навала и оценки их объемов использовали программный пакет Surfer и встроенный в него инструмент Volume.

Зондирования насыпи методом электротомографии (ЭТ) [34] выполнялись по четырем профилям многоэлектродной электроразведочной станцией «СКАЛА 48» (производство КБ «Электрометрия» и Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск), которая поочередно коммутирует по многожильным кабелям с 48-ю выводами и опрашивает различные комбинации электродов в виде заземленных в грунт железных штырей (исп. – А.Н. Шейн, помогали В.В. Потапов, С.Ю. Артамонова, Р. Бейсенбаев) (рис. 5, 6). Ис-

пользование данного метода признано весьма эффективным при изучении верхнего разреза геологической среды и решения задач инженерной геологии, гидрогеологии [35, 36], в т. ч. в условиях Арктики и многолетней мерзлоты [37].

Результатом измерений ЭТ является информация о распределении кажущегося удельного электрического сопротивления ($УЭС$, Ом·м) по глубине вдоль профиля измерений. Использовалась трёхэлектродная установка с выносом удалённого электрода на 1 км перпендикулярно профилям с достижением глубинности замеров кажущегося $УЭС$ до 80 м, межэлектродное расстояние составляло 5 м. Качество измерений оценивалось аппаратными средствами прибора «Скала-48»: для каждого замера оценивалось относительное стандартное отклонение, и, если оно превышало 1 %, замер выбраковывался. Кроме того, проводился контроль воспроизводимости данных. При повторных зондированиях средняя относительная погрешность не превышала 5 %. После этого массив первичных данных $УЭС$ обрабатывался вручную. Инверсия первичных данных проводилась в программе Res2Dinv с учётом влияния рельефа, с использованием робастной инверсии стандартным методом Гаусса–Ньютона. В соответствии с рекомендациями разработчиков программного обеспечения [34], при инверсии использовалась густая расчётная сетка, где ширина ячеек равнялась половине межэлектродного расстояния, что позволило улучшить детальность верхней части геоэлектрического разреза, неоднородность которой усилена присутствием металлического забора и погребённых железных фрагментов. Для верификации полученных моделей и определения степени влияния железных объектов проводилось численное моделирование с использованием программы ZondRes2D [38], в которой решалась прямая задача, а затем полученные синтетические данные подвергали инверсии с применением Res2DInv [22]. В результате обработки каждого профиля были построены геоэлектрические разрезы – двумерное распределение $УЭС$. Затем для построения площадного распределения $УЭС$ проводилась фильтрация всех полученных данных по соответствующей глубине с последующей интерполяцией выборки в программе Surfer.

Измерения модуля полного вектора геомагнитного поля проводили с помощью протонного магнитометра ММРОС-1 (УГТУ-УПИ, г. Екатеринбург) по 32-м профилям с погрешностью 1 нТл, вариации естественного магнитного поля записывали квантовым магнитометром GSM-19 (Gem System, Канада) с погрешностью 0,1 нТл (рис. 5) (исп. – А.Н. Шейн, помогали В.В. Потапов, С.Ю. Артамонова, Р. Бейсенбаев). Для последовательной энергетической фильтрации магнитных данных (исп. – П.Н. Нови-

кова) применяли программы «КОСКАД 3D» (авторы А.А. Никитин, А.В. Петров, А.С. Алексахин) [39], для численного моделирования (исп. – П.Н. Новикова) – программу PRIZMA (автор А.С. Долгаль) [40], подробная методика замеров и обработки полученных данных приведена в [41].

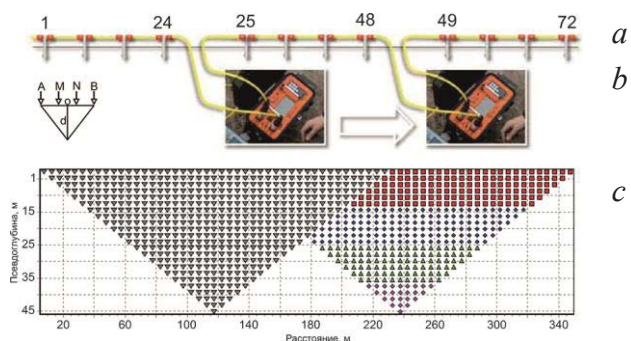


Рис. 5. Схема измерений УЭС при электротомографии: а) подключение электродов и кабелей к прибору SKALA; б) положение точки записи в симметричной установке; в) положение точки записи на псевдоразрезе

Fig. 5. Electrical resistivity tomography (ERT) measurements: a) electrodes and cables connected to the SKALA system; b) symmetrical sounding array; c) resistivity data points

Радиационную обстановку оценивали путем маршрутных измерений мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (МАД, мкЗв/ч) с применением спектрометра МКС-АТ6101Д, мощности экспозиционной дозы гамма-излучения (МЭД, мкР/ч) с применением СРП-68-01 (исп. – С.Ю. Артамонова). Пробы отбирали из водных стоков, вытекающих из-под насыпи на эпицентре ПЯВ «Кристалл», водопроявлений (луж) и ручья, протекающего рядом с насыпью (рис. 6), из р. Улахан-Бысытта, на фоновой точке в р. Далдын, из ручья у естественного выхода подземных рассолов на правом борту р. Далдын (исп. – С.Ю. Артамонова) (рис. 2, б).

Активность трития определяли жидкостно-сцинтилляционным методом с применением спектрометра Tri-Carb 2800 (США) (аналитик – Л.Г. Бондарева), в 2018–2020 гг. – с применением спектрометра-радиометра Quantulus-1220 фирмы PerkinElmer Inc (США) (аналитик – Г.В. Симонова). Определение активности ^{90}Sr в водных пробах, пробах подземных рассолов проводилось бета-радиометрическим методом на низкофоновой бета-радиометре РУБ-01П с предварительной радиохимической подготовкой счетных образцов (аналитик – И.В. Макарова) [42].

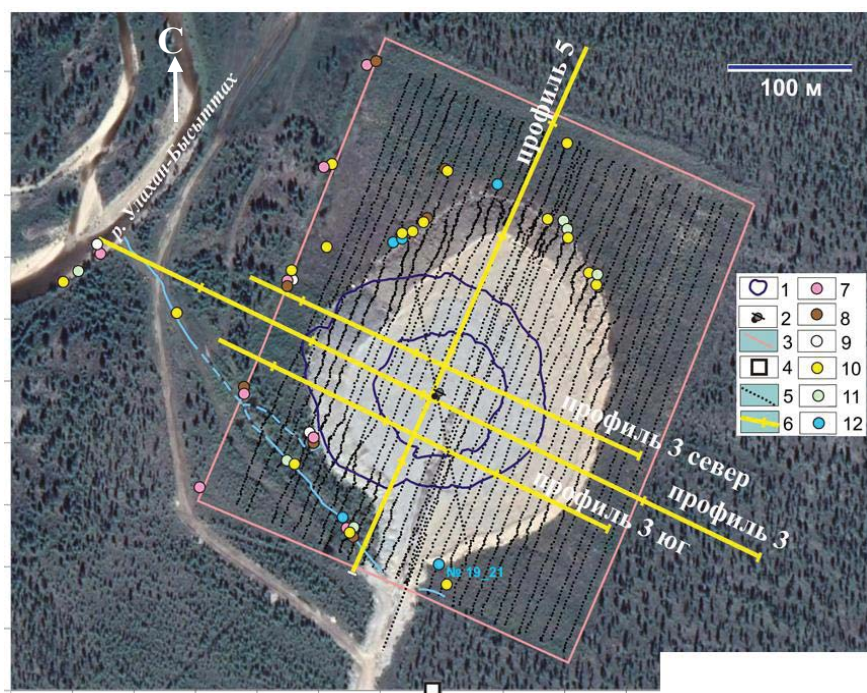


Рис. 6. Схема геоэкологических исследований насыпи на эпицентре ПЯВ «Кристалл» в 2008–2021 гг. Условные обозначения: 1 – контуры подножья и гребня навала; 2 – столб-репер над устьем боевой скважины; 3 – забор; 4 – магнитотовариационная станция; 5 – треки наземной магнитной съемки; 6 – профили электротомографических зондирований; точки отбора проб воды: 7 – 2008 г.; 8 – 2012 г.; 9 – 2018 г.; 10 – 2019 г.; 11 – 2020 г.; 12 – 2021 г.

Fig. 6. Geoecologic research of the block-rubble artificial cover at the epicenter PUNE "Crystal" in 2008–2021. Symbols: 1 – contours of bottom and ridge of the upthrust dome; 2 – benchmark of the emplacement hole; 3 – paling of the site; 4 – geomagnetic variation station; 5 – land geomagnetuc measuring tracks; 6 – electrical resistivity tomography profiles; surface water sampling points in: 7 – 2008; 8 – 2012; 9 – 2018; 10 – 2019; 11 – 2020, 12 – 2021

Отбор крупнообъемной водной пробы в 20 дм³ и концентрирование из нее ⁹⁰Sr позволяли добиться более низкого предела обнаружения 0,01 Бк. Относительная погрешность метода не превышает 20 % с вероятностью $P=0,95$ для активностей более 1 Бк. Определение активности ^{239,240}Pu, ²³⁸Pu в водных пробах проводилось альфа-спектрометрическим методом на восьмиканальном альфа-спектрометре ALPHA-ENSEMBLE-8 (Ametek, ORTEC, США) с кремниевыми детекторами высокого разрешения с предварительной радиохимической подготовкой счетных образцов (аналитики – И.В. Макарова, М.С. Мельгунов) [43]. Водную пробу отбирали объемом в 100 дм³. В качестве внутреннего стандарта использовали метку ²⁴²Pu 0,1 Бк, который вносили в водную пробу перед химическими процедурами. Концентрирование изотопов Pu из 100-литровой исходной пробы позволяет добиться более низких пределов их обнаружения в 0,002 Бк. Относительная погрешность не превышает $\pm 15\%$ с вероятностью $P=0,95$. Подробное описание методики изучения водных проб приведено в [32].

Результаты и их обсуждение

В 2008 г. за пределами технологической площадки объекта «Кристалл» среднее измеренное

значение МЭД на природном склоновом ландшафте и в долине р. Улахан-Бысытта составило 7 мкР/ч, что соответствует местному природному радиационному фону на подстилающих известняках и доломитах, перекрытых сверху почвенным и мохово-лишайниковым покровами, оцениваемому в 5–7 мкР/ч [44]. На технологической площадке вокруг насыпи МЭД в 2008 г. составила в среднем 8,8 мкР/ч при диапазоне от 5,5 до 11,5 мкР/ч, при этом максимальная МЭД, равная 11,5 мкР/ч, была измерена на северо-восточном подножье насыпи. Диапазон МАД в 2012 г. изменялся от 0,04 до 0,066 мкЗв/ч, при этом была выявлена узкая полоса повышенных значений МАД на северном подножье насыпи (рис. 7, а). В 2021 г. характер распределения МЭД совпал с данными предыдущих лет (рис. 7, б). По-видимому, слабое повышение МЭД и МАД на северном подножье насыпи обусловлено краевой зоной погребенного загрязненного участка, примыкающего к навалу с северо-восточной стороны. Можно говорить о постепенном снижении МЭД: если в 2008 г. максимальные значения составляли 11,5 мкР/ч, то в 2021 гг. они не превышали 9–10 мкР/ч, т. е. за 13 лет снижение МЭД составило около 1,5 мкР/ч.

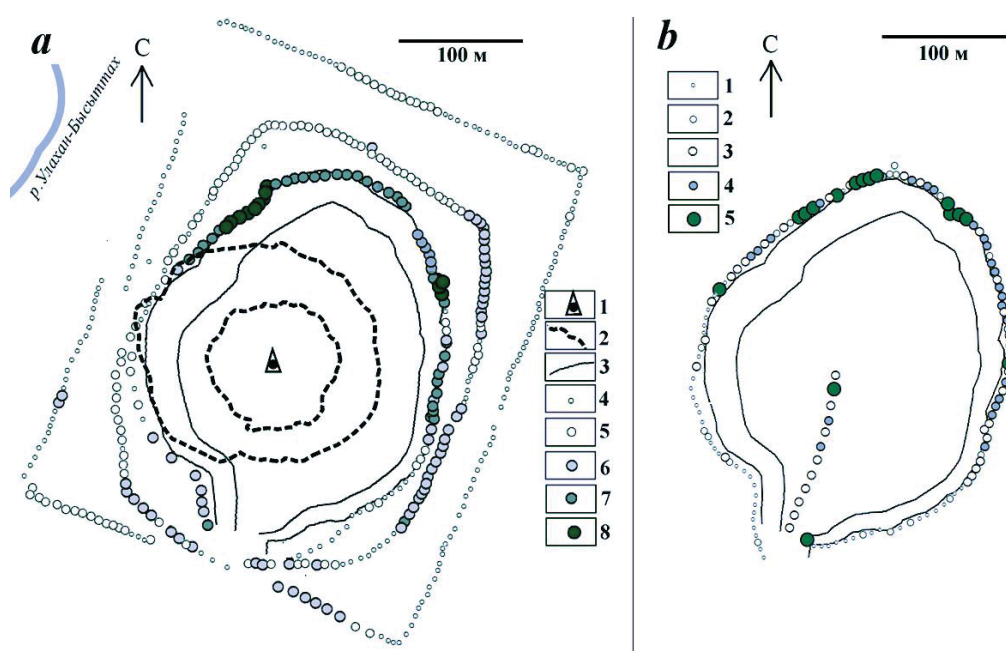


Рис. 7. Распределение МАД в 2012 г. [32] (а) и МЭД в 2021 г. (б) на эпицентре ПЯВ «Кристалл». Условные обозначения (а): 1 – столб-репер устья боевой скважины; 2 – контуры подножья и гребня навала, погребенного под насыпью; 3 – контуры подножья и верхней кромки насыпи; МАД (мкЗв/ч): 4 – $< 0,05$; 5 – $0,05-0,053$; 6 – $0,054-0,057$; 7 – $0,058-0,061$; 8 – $0,062-0,066$; (б): МЭД (мкР/ч): 1 – 6–7; 2 – 7,5; 3 – 8; 4 – 8,5; 5 – 9–10

Fig. 7. Gamma-radiation ambient dose rate (ADR) in 2012 [32] (a) and gamma-radiation exposure dose rate (EDR) in 2021 (b) at the PUNE "Crystal" epicenter. Symbols (a): 1 – benchmark of the emplacement hole; 2 – contours of bottom and ridge of the upthrust dome, filled by the artificial cover; 3 – contours of bottom and upper edge of the block-rubble artificial cover; ADR ($\mu\text{Zv/h}$): 4 – < 0.05 ; 5 – $0.05-0.053$; 6 – $0.054-0.057$; 7 – $0.058-0.061$; 8 – $0.062-0.066$; (b) EDR ($\mu\text{R/h}$): 1 – 6–7; 2 – 7.5; 3 – 8; 4 – 8.5; 5 – 9–10

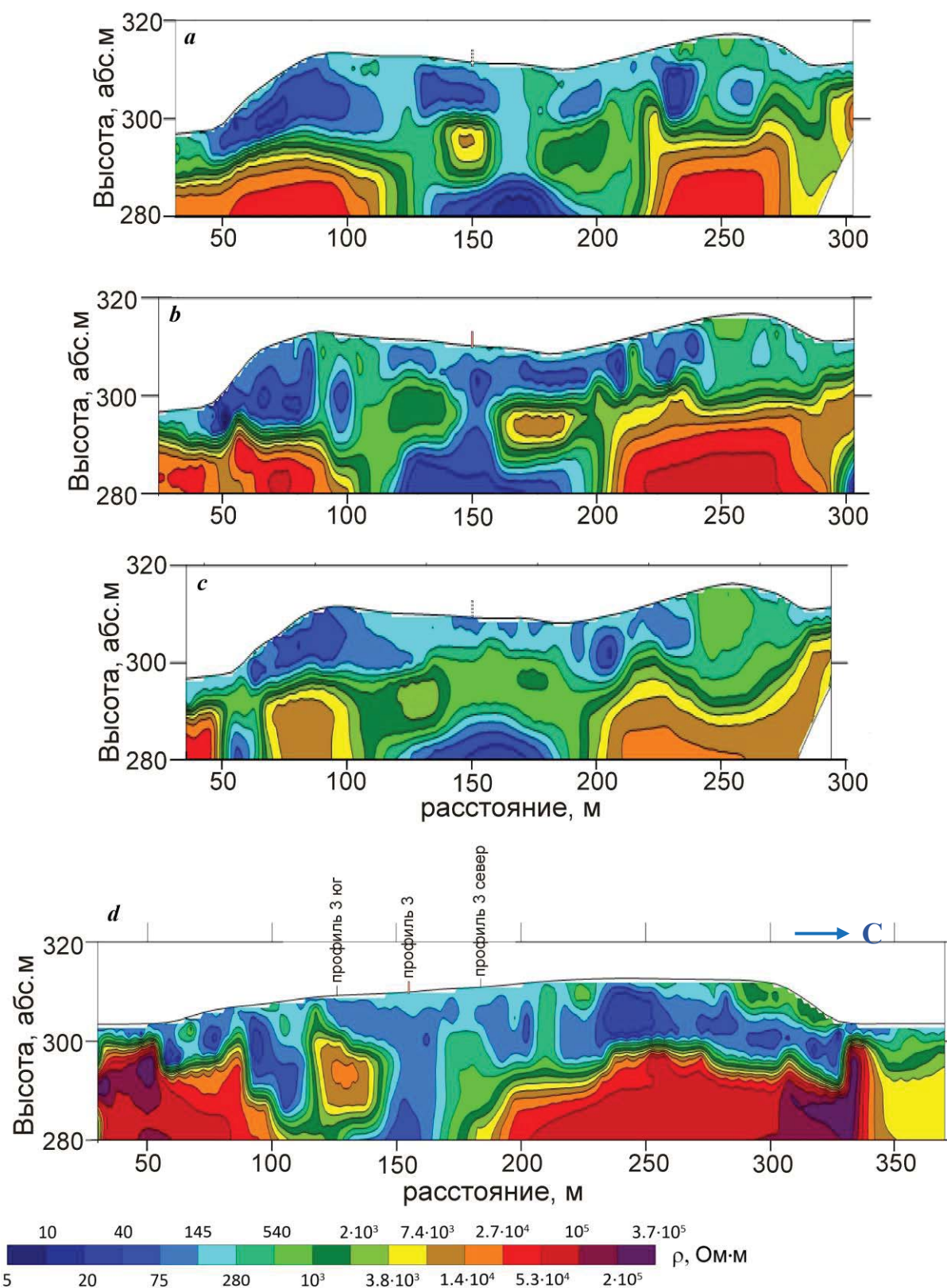


Рис. 8. Геоэлектрический разрез УЭС (Ом·м) насыпи над эпицентром ПЯВ «Кристалл» по профилям 3север (а), 3 (b), 3юг (с), по профилю 5 (d), полученные с использованием трехэлектродной установки (расположение профилей ЭТ, рис. 6)

Fig. 8. Inverted resistivity section (Ohm·m) along profiles 3sever (a), 3 (b), 3yug (c) and along profile 5 (d) by complete pole-dipole measurements (profile location see Fig. 6)

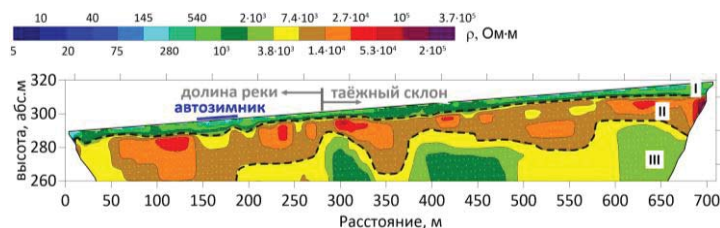


Рис. 9. Слоистое строение геоэлектрического разреза УЭС (Ом·м) на природном ландшафте таежного склона и долины р. Улахан-Бысыттах в 300 м к северу от столба-репера ПЯВ «Кристалл» (установка поле-диполь) [22]

Fig. 9. Layered structure of the inverted resistivity section (Ohm-m) along the profile in the natural landscapes of the taiga slope and the Ulakhan-Bysyttakh River valley, located 300 m north of the PUNE "Crystal" benchmark [22]

Глыбово-щебнистая насыпь, сооруженная в 1992 г. и наращенная в 2006 г. на эпицентре ПЯВ «Кристалл», перекрыла доступ к радиоактивно-загрязненным грунтам, тем самым предотвратила риск случайного распространения этих грунтов с обувью посетителей и т. п., были прекращены процессы эрозии грунтов под открытым небом. В результате на эпицентре объекта «Кристалл» в пределах технологической площадки размером 430×330 м, ограниченной забором, сложилась спокойная радиационная обстановка с низкими МЭД (МАД), сравнимыми с природным радиационным фоном.

В результате зондирований ЭТ получены геоэлектрические разрезы насыпи (рис. 8). В насыпи не просматривается слой с контрастно-высокими УЭС, который бы соответствовал льдогрунтовому слою, намороженному в 2006 г., а характерны УЭС преимущественно 20–280 Ом·м, только локально 540 Ом·м и выше до 2000 Ом·м.

О чем могут говорить эти весьма низкие УЭС в насыпи? Обратимся к результатам зондирований ЭТ на природном ландшафте таежного склона и долины р. Улахан-Бысыттах, в 300 м севернее объекта «Кристалл» [22]: в геоэлектрическом разрезе выделен тонкий поверхностный проводящий слой с УЭС 145–1000 (местами до 2000) Ом·м с мощностью в 1–2 м, обозначенный как слой I (рис. 9).

Зондирования ЭТ показали, что слой I распространен повсеместно и четко просматривается на геоэлектрических разрезах всех профилей зондирований ЭТ. В результате этот слой I отнесен нами к сезонно-талому слою [22], что согласуется с геокриологическими и геотермическими данными [17, 45, 46]. Следовательно, диапазон значений УЭС 145–1000 (местами до 2000) Ом·м в местных условиях таежного ландшафта можно принять за критерий талых пород. А в насыпи, как отметили выше, диапазон УЭС большей частью – в пределах 20–280 Ом·м, что намного ниже 1000 (2000) Ом·м, то есть соответствует местному критерию талых пород. Однако вспомним, что под насыпью находятся погребенные железные объекты: в 1990 г. был сфотографирован крупный фрагмент обсадной колонны, лежащий на навале в субгоризонтальном

положении (рис. 3, б), а также предполагаются остальные фрагменты обсадной колонны в недрах под устьем боевой скважины. Известно, что железные объекты в грунтах могут формировать геоэлектрические проводящие псевдоаномалии весьма низких УЭС [22]. Таким образом, прежде чем говорить о талом и увлажненном состоянии насыпи, нужно ответить на вопрос: не обусловлены ли весьма низкие УЭС в насыпи влиянием железных объектов?

Для разделения геоэлектрических аномалий, вызванных погребенными железными объектами, и геоэлектрических аномалий, имеющих другую природу, была проведена наземная магнитная съемка. Путем вычитания 2633-х значений модулей полного вектора геомагнитного поля $Tvar_i$, измеренных на магнитовариационной станции, и 6296-ти значений модулей полного вектора геомагнитного поля $Tizm_i$, одновременно измеренных в точке магнитной съемки, построена карта аномального магнитного поля $\Delta T_a = Tizm_i - Tvar_i$ (рис. 10, 11, а).

Часть магнитных аномалий вызваны железными объектами, обнаруженными на поверхности Земли (рис. 11, а):

- железные бочка, лист и проволоки, обнаруженные на юго-западе технологической площадки (объекты d, e, f₂) вызывают весьма слабые магнитные аномалии;
- шина от карьерного грузовика БЕЛАЗ, оставленная на северо-восточном подножье насыпи, формирует положительную изометричную аномалию с амплитудой ΔT_a в 800 нТл и диаметром до 25 м (объект с);
- забор из металлических столбов и колючей проволоки (показано контуром бирюзового цвета) создает вытянутые отрицательные аномалии по краям участка магнитной съемки;
- две трубы длиной 30 м, диаметром 102 см, толщиной металла 8 мм, проложенные под насыпной дорогой на глубине примерно 1 м для переброски склоновых стоков (объект b) совместно со столбами забора, проходящего рядом, формирует высокоинтенсивную аномалию линейного простирания с амплитудой ΔT_a 8700 нТл с поперечным размером (при учете фланговых частей) до 45 м, названную южной.

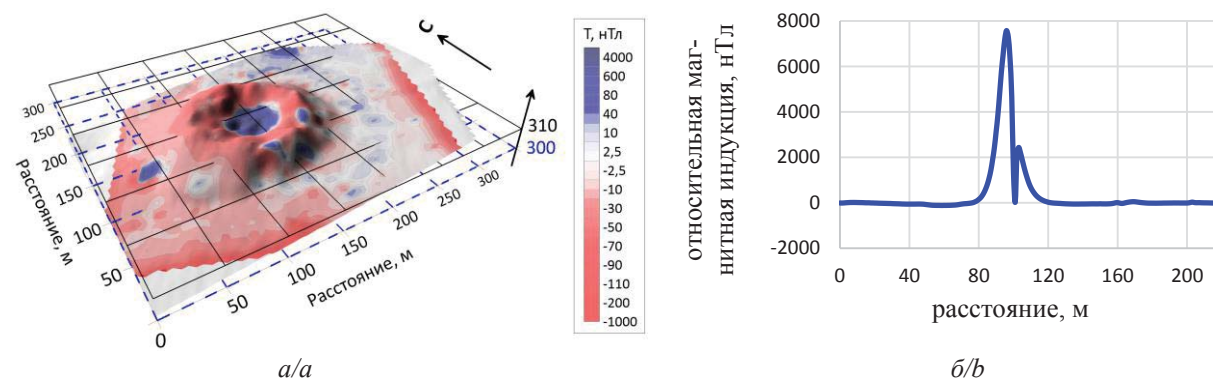


Рис. 10. а) карта аномального магнитного поля ΔT_a (нТл) на эпицентре ПЯВ «Кристалл», наложенная на ЦМР навала; б) график центральной магнитной аномалии в направлении с магнитного севера на юг

Fig. 10. a) map of the anomalous geomagnetic field ΔT_a (nTl) at the epicenter of the PUNE "Crystal", combined with digital elevation model of the dome-shaped mound; b) plot of the central magnetic anomaly in the direction from geomagnetic north to south

Боевая скважина ПЯВ «Кристалл» отличалась большим диаметром ствола, для её обсадки под устьем установили трубу с диаметром 142 см на глубину 6 м, в которую вложили обсадную колонну диаметром 122 см и длиной 38 м, смонтированную путем высокотемпературной сварки из труб с толщиной металла 12 мм. Эти массивные железные объекты, с расчетной массой 416,7 кг/пог. м и 357,5 кг/пог. м, соответственно, должны были, без сомнения, вызывать помехи в геомагнитном поле. Действительно, результаты наземной магнитной съемки показали формирование крупной изометричной магнитной аномалии в центре насыпи (рис. 10) с высокими положительными значениями модуля магнитной индукции ΔT_a до +7700 нТл и шириной (диаметром) 46 м, названной нами центральной. Эту аномалию осложняет узкий отрицательный пик с амплитудой 2400 нТл и шириной по основанию всего 4 м, измеренный у столба-репера (рис. 10, б).

Последовательная энергетическая фильтрация магнитных данных в программе «КОСКАД 3D» позволила выявить аддитивный характер центральной магнитной аномалии: ее формируют погребенные фрагменты обсадной колонны боевой скважины, а узкий отрицательный пик в центре аномалии вызван влиянием столба-репера [41]. В результате каждый фрагмент обсадной колонны соотнесен с определенными составляющими магнитной аномалии, в том числе установлено, что 12-метровый фрагмент обсадной колонны, оторванный и вытолкнутый на поверхность навала при взрыве (рис. 3, б), ныне залегает там же под насыпью в субгоризонтальном положении и вытянут в субширотном направлении, а остальные находятся под устьем боевой скважины: шестиметровая труба диаметром 144 см предположительно подверглась сильной деформации в виде раздутия, нижняя часть обсадной колонны длиной 26 м остается в стволе

боевой скважины в вертикальном положении (рис. 11, б). Результаты численного моделирования в программе PRIZMA дополнительно подкрепляют эти выводы [41].

Сравнительный анализ магнитных аномалий и распределения УЭС в насыпи показал отсутствие очевидной корреляции магнитных и геоэлектрических аномалий в насыпи (рис. 11). Это позволяет говорить об отсутствии в насыпи значимых искажений геоэлектрических данных, вызванных погребенными железными объектами. Рассмотрим детальнее распределение УЭС в насыпи. У ее поверхности (+310 абс. м) диапазон УЭС, который обозначен палитрой голубого цвета в шкале УЭС, преимущественно 145–280 Ом·м. По мере углубления в насыпь всё больше ярко-синих пятен с УЭС ≤ 75 Ом·м, (уровни от +305 до +300 абс. м) которые, по-видимому, соответствуют участкам переувлажненного щебня: по сравнению с ними материал насыпи у ее поверхности (+310 абс. м) более «сухой». В целом очевидна приуроченность диапазона УЭС 20–280 Ом·м, обозначенного сине-голубой палитрой, именно глыбово-щебнистому материалу насыпи, тогда как диапазон УЭС 280–2000 Ом·м зелёной палитры, по-видимому, соответствуют более плотным материнским грунтам навала, погребенного под насыпью, и естественного склона, и они проявляются преимущественно у подошвы насыпи и в срезах пород естественного склона (рис. 11, с).

Синее пятно низких УЭС ≤ 75 Ом·м, неожиданно расположенное в центре насыпи у ее подошвы на уровне +295 абс. м, можно было бы принять за псевдоаномалию, вызванную погребенными железными объектами. Однако ниже – на срезе +290 абс. м – это синее пятно исчезает вместо того, чтобы стать более интенсивным и широким по мере приближения к железным объектам. В связи с этим можно сделать вывод, что в этом случае мы

наблюдаем скопление воды в глыбово-щебнистым материале, по-видимому, заполнившим провалившуюся центральную часть навала (вспомним первичную кальдерообразную форму навала,

рис. 3, а, 4), а навал, несмотря на уплотнение и размыв грунтов за период, прошедший со времени взрыва, и смятие при создании насыпи, по-видимому, в целом сохранил черты первичной формы.

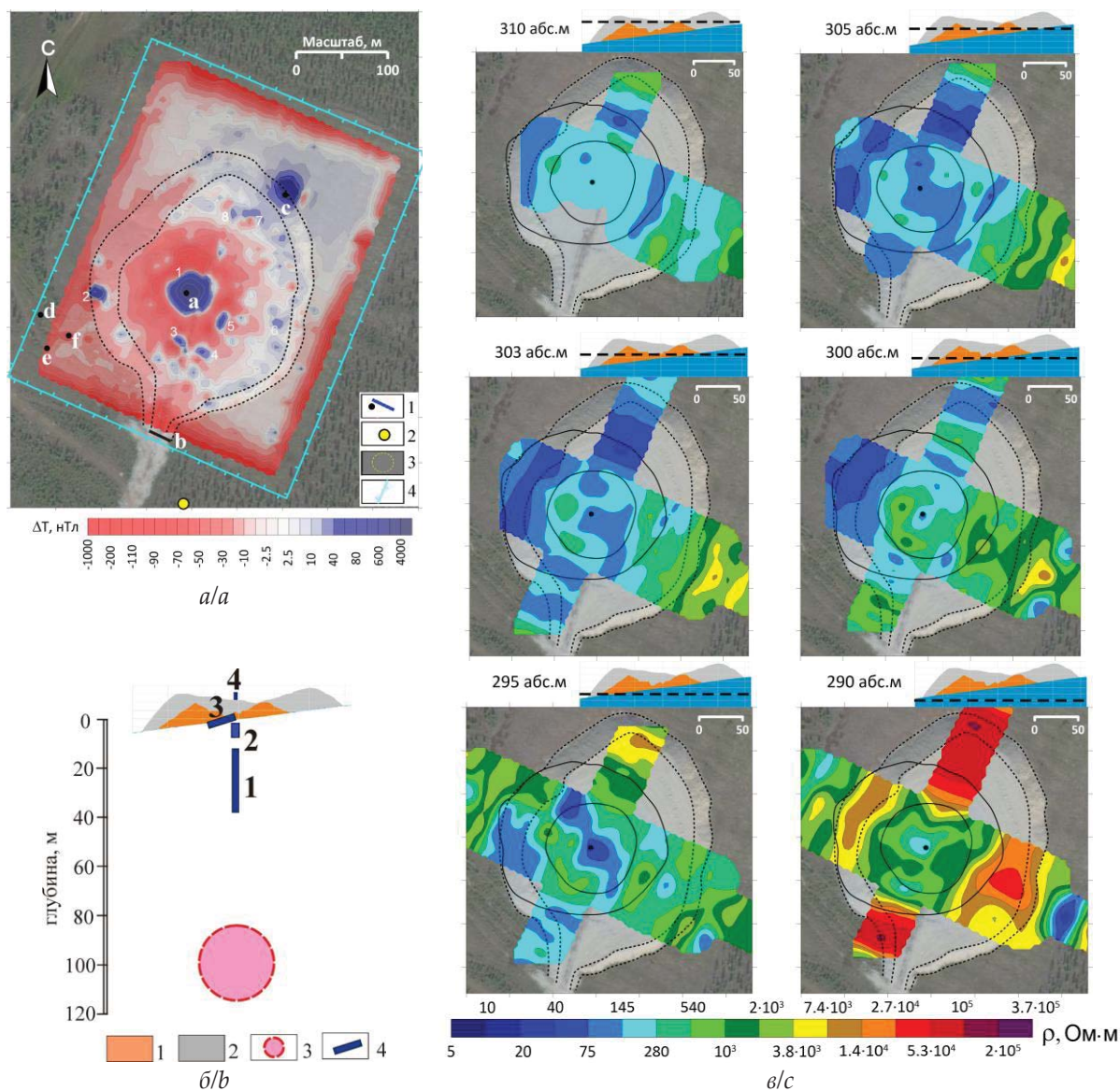


Рис. 11. Магнитные аномалии (нТл) (а), схема предположительного расположения фрагментов обсадной колонны боевой скважины (№ 1–3) и столба-репера (№ 4) (б) и распределение УЭС на разной глубине (Ом·м) (в) на эпицентре ПЯВ «Кристалл». Черным штрихом показаны подножье и верхняя кромка насыпи, черной жирной линией – подножье и гребень навала. Условные обозначения (а): 1 – железные объекты на поверхности: а) столб-репер; б) две трубы под насыпной дорогой; в) шина карьерного грузовика БЕЛАЗ; г) бочки; д) лист; е) проволока; 2 – магнитовариационная станция; 3 – центральная магнитная аномалия; 4 – забор; (б): 1 – навал; 2 – насыпь; 3 – центральная зона взрыва; 4 – железные объекты

Fig. 11. Geomagnetis anomalies (nTl) (a), presumptive location of fragments of the emplacement hole casing (no. 1–3) and benchmark (no. 4) (b) and electrical resistivity distribution (Ohm·m) at different depths (c) at the epicenter PUNE "Crystal". Black dashed line shows contours of the bottom and upper edge of the artificial cover, black fat line shows contours of the bottom and upper edge of the dome-shaped mound. Symbols (a): 1 – iron objects on the land surface: a) benchmark; b) two water run-off tubs under the roadbed; c) car-tire of BELAZ truckful; d) barrels; e) sheet; f) wire; 2 – geomagnetic variation station; 3 – central magnetic anomaly; 4 – paling of the site; (b): 1 – dome-shaped mound; 2 – artificial cover; 3 – center of the explosion; 4 – iron objects

Вместе с тем под насыпью, под устьем боевой скважины на уровне +285 абс. м и ниже, просматриваются как раз геоэлектрические помехи, по нашему мнению, вызванные железными объектами, а именно крупная геоэлектрическая аномалия весьма низких УЭС от 5 до 75 Ом·м (рис. 8) [22], совпадающая по расположению с центральной магнитной аномалией. На эту псевдоаномалию предположительно накладывается геоэлектрическая аномалия весьма низких УЭС, формируемая солеными подземными флюидами (водами), просачивающимися со слабой интенсивностью наверх по ослабленной зоне вокруг боевой скважины, о чем свидетельствуют повышенные концентрации хлоридов, Br, Sr, обнаруженные в водных стоках из-под насыпи [33]. В целом на глубинах от 20 м (+290 абс. м и ниже) под насыпью геоэлектрические разрезы приобретают резко-контрастный характер, что, по-видимому, отвечает сложному строению недр под эпицентром взрыва «Кристалл», которое станет предметом обсуждения в отдельной статье (рис. 8, 11, с).

Итак, в результате сравнительного анализа магнитных и геоэлектрических данных можно сделать вывод, что погребенные железные объекты в насыпи не вызывают значимые геоэлектрические помехи и весьма низкие УЭС в насыпи: преимущественно 20–280 Ом·м, только локально 540 Ом·м и выше — до 2000 Ом·м, обусловлены талым и переувлажненным состоянием насыпи. К сожалению, расчеты на постепенное восстановление многолетней мерзлоты в насыпи и под ней за счет зимнего промерзания и подтягивания подошвы сезонно-талого слоя, проведенные в [6, 25, 28], не оправдались, хотя ранее, до

получения этих результатов ЭТ зондирований и наземной магнитной съемки в 2019 г., автор С.Ю. Артамонова вполне допускала возможное промерзание насыпи после ее наращивания и намораживания льдогрунтового слоя в 2006 г. [47]. Весьма низкие УЭС в насыпи свидетельствуют об очень сильной увлажненности насыпи, по-видимому, превосходящей обычную увлажненность сезонно-талого слоя местных природных ландшафтов, и накоплении в ней свободной воды, стекающей под действием силы тяжести в виде множества водных стоков из-под насыпи. Во время полевых работ 2008, 2012, 2018–2021 гг. даже в период длительных засух и летом, и поздней осенью наблюдалась постоянная увлажненность в подножье насыпи, откуда буквально сочилась вода, наблюдалось множество мелких водоемов и водных стоков из-под насыпи (рис. 12). Нами сделано предположение, что в теле глыбово-щебнистой насыпи ввиду ее грубого гранулометрического состава идет свободная конвекция воздуха, которая при наличии естественного градиента температуры воздуха и температуры пород (обломочного материала) приводит к конденсации атмосферной влаги в насыпи, в результате насыпь стала работать как постоянный генератор воды. Именно этим процессом логично объяснить вышеописанную постоянную практически равномерную по объему высокую увлажненность глыбово-щебнистого материала насыпи, наличие множества водных стоков из-под насыпи в любую погоду, в том числе в период длительных засух. Предполагается, что насыпь накапливает наибольшие объемы воды из атмосферной влаги при достижении наибольших градиентов температур «воздух–порода» в летние жаркие периоды.



а/а



б/б

Рис. 12. Водные стоки, вытекающие из-под насыпи на эпицентре ПЯВ «Кристалл» в августе 2019 г. (а) и в октябре 2021 г. (б)
Fig. 12. Water runoff under the artificial cover at the epicenter PUNE "Crystal" on August 2019 (a) and on October 2021 (b)

Можно говорить о непригодности крупнообломочных глыбово-щебнистых отложений для захоронения ОРАО в криолитозоне в условиях резко-континентального климата в силу свободного просачивания через них атмосферных осадков и свободной конвекции воздуха. Еще в начале 2000-х гг. подчеркивалась необходимость использования суглинков при строительстве захоронения ОРАО с намораживанием льдогрунтового блока-монолита в центре насыпи по примеру природных криогенных объектов – булгунняхов (гидролакколитов) – и гидро- и термоизоляции [25]. По-видимому, при захоронении ОРАО на эпицентре ПЯВ «Кристалл» намораживание в насыпи 60-сантиметрового льдогрунтового слоя в 2006 г. оказалось недостаточным, или оно было проведено с отклонениями от проектных параметров. По крайней мере, какие-либо признаки наличия (сохранения) льдогрунтового слоя в насыпи на объекте «Кристалл» и подтягивания многолетней мерзлоты в тело насыпи нами по результатам ЭТ не обнаружены. Использование крупнообломочного материала вместо суглинков и отказ от намораживания льдогрунтового блока-монолита в центре насыпи, по-видимому, были главными ошибочными решениями при строительстве насыпи, не приведшими к ожидаемой криогенной иммобилизации радионуклидов в этом захоронении.

Несомненно, в силу высокой фильтрационной способности глыбово-щебнистая насыпь промывается метеорными и тальными водами, а свободная конвекция воздуха постоянно образует воду в насыпи за счет конденсации атмосферной влаги, тем самым они способствуют накоплению влаги в насыпи и создают условия для водной миграции радионуклидов из погребенных под насыпью грунтов и радионуклидов, возможно, поступающих из ЦЗВ с подземными водами или при эманации газовых флюидов по ослабленной зоне вокруг нее.

При оценке водного переноса радионуклидов из-под насыпи наше внимание в первую очередь было обращено на изучение активности трития ^3H – тяжелого изотопа водорода с безбарьерной миграционной способностью – в силу его химических свойств, способности к миграции в виде воды, а также радиостронция ^{90}Sr . В 2002 г. активность ^3H и ^{90}Sr в водном стоке из-под насыпи составляла 221 и 25,9 Бк/дм³, а в рывтине ниже по склону – 26,4 и 4,7 Бк/дм³, соответственно [21]. В 2008 г. в водном стоке из-под насыпи нами была установлена активность 27 Бк/дм³, которая ниже по склону быстро уменьшалась практически до фонового уровня: в ~50 м у края технологической площадки активность трития составила всего 6,0–12,0 Бк/дм³. По-видимому, по мере движения водные стоки из-под насыпи существенно разбавляются метеорны-

ми и грунтовыми водами (водами сезонно-талого слоя), в результате активность трития в стоках снижается практически до фонового уровня. За все время изучения минимальная активность трития, равная 4 Бк/дм³, была определена в 2012 г. в ручейке около северо-западного подножья насыпи. Согласно результатам наших исследований, в 2008, 2012, 2018, 2019, 2020 гг. максимальная активность трития в стоках из-под насыпи составила (Бк/дм³): 27, 18, 12, 11,9, 6,4, соответственно, т. е. наблюдалось неуклонное снижение активности трития с каждым годом (рис. 13, а). В 2020 г. по сравнению с 2002 г. максимальная активность трития в водных стоках снизилась почти в 35 раз. Наиболее сильное снижение активности трития в водных стоках наблюдалось после наращивания насыпи в 2006 г. – с 221 Бк/дм³ в 2002 г. до 27 Бк/дм³ в 2008 г., т. е. восьмикратное снижение активности трития. Объяснение этого снижения активности трития возможным промерзанием насыпи после 2006 г. [47] было ошибочным. Вряд ли глыбово-щебнистая талая насыпь могла стать барьером против миграции трития, имеющего безбарьерную миграционную способность в форме молекул воды (НТО и др.) в поверхностных условиях, против которого сложно придумать геохимический или физико-механический барьер, разве что только превратить его в лед. Но, согласно результатам зондирований ЭТ, насыпь и навал находятся в талом состоянии, а зондирования методом ЭТ и ЗСБ показали, что многолетняя мерзлота на эпицентре ПЯВ «Кристалл» деградировала [20, 22]. Следовательно, снижение активности трития в водных стоках можно объяснить двумя причинами: 1) в силу высокой подвижности тритий из ОРАО после взрыва за прошедшие годы мог мигрировать с водными стоками с высокой интенсивностью и беспрепятственно, и к настоящему времени его запасы уже могли иссякнуть, и потому мы наблюдаем его низкие активности в водных стоках; 2) активность трития постоянно снижалась в результате естественного радиоактивного распада: при довольно коротком периоде полураспада $T_{1/2}$ – 12,3 года от первоначальной активности трития к настоящему времени в результате радиоактивного распада осталось всего около 6,2 % (на 17.04.2024).

Следует полагать, что механизм и формы водного переноса ^{90}Sr более сложные, чем у трития, и зависят от множества факторов, и, как следствие, его концентрации в водных стоках, по-видимому, изменяются в более широком диапазоне в разное время отбора. В 2002 г. активность ^{90}Sr в водных стоках составляла 25,9 Бк/дм³ [23], а в 2012 г. она составила всего 0,4 Бк/дм³, то есть активность снизилась в 64,8 раза (рис. 13, б). Сооружение насыпи на эпицентре объекта «Кристалл» могло значи-

тельно снизить интенсивность водной миграции ^{90}Sr , поскольку поверхность карбонатной щебени и глинистых частиц при медленном просачивании водных стоков могла адсорбировать ^{90}Sr или связывать его в результате катионного обмена $\text{Sr}^{2+} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+}$. В последующие годы изучения водных стоков активность ^{90}Sr изменялась в одних и тех же пределах: от 0,004 до 0,4 Бк/дм³, тренд на дальнейшее снижение активности ^{90}Sr в водных стоках из-под насыпи явно пока не выявлен (рис. 13, б). В 2018 г. активность ^{90}Sr , равная 0,4 Бк/дм³, была определена в стоке из-под юго-западного склона насыпи, там же в 2019 г. она составила всего

0,004 Бк/дм³ (ниже в 100 раз), а в 2020 г. здесь же измерена близкая к данным 2018 г. активность в 0,35 Бк/дм³. Источником трития и радиостронция в водных стоках из-под насыпи могут быть как погребенные грунты эпицентра взрыва, приравненные по содержанию радионуклидов к твердым радиоактивным отходам, так и ОРАО центральной зоны взрыва, откуда радионуклиды могут выходить по возможно потерявшему герметичность стволу боевой скважины и (или) по ослабленной зоне вокруг нее. Подробный анализ распространения ^3H и ^{90}Sr в водных стоках объекта «Кристалл» и речной воде прилегающей территории приведен в [32].

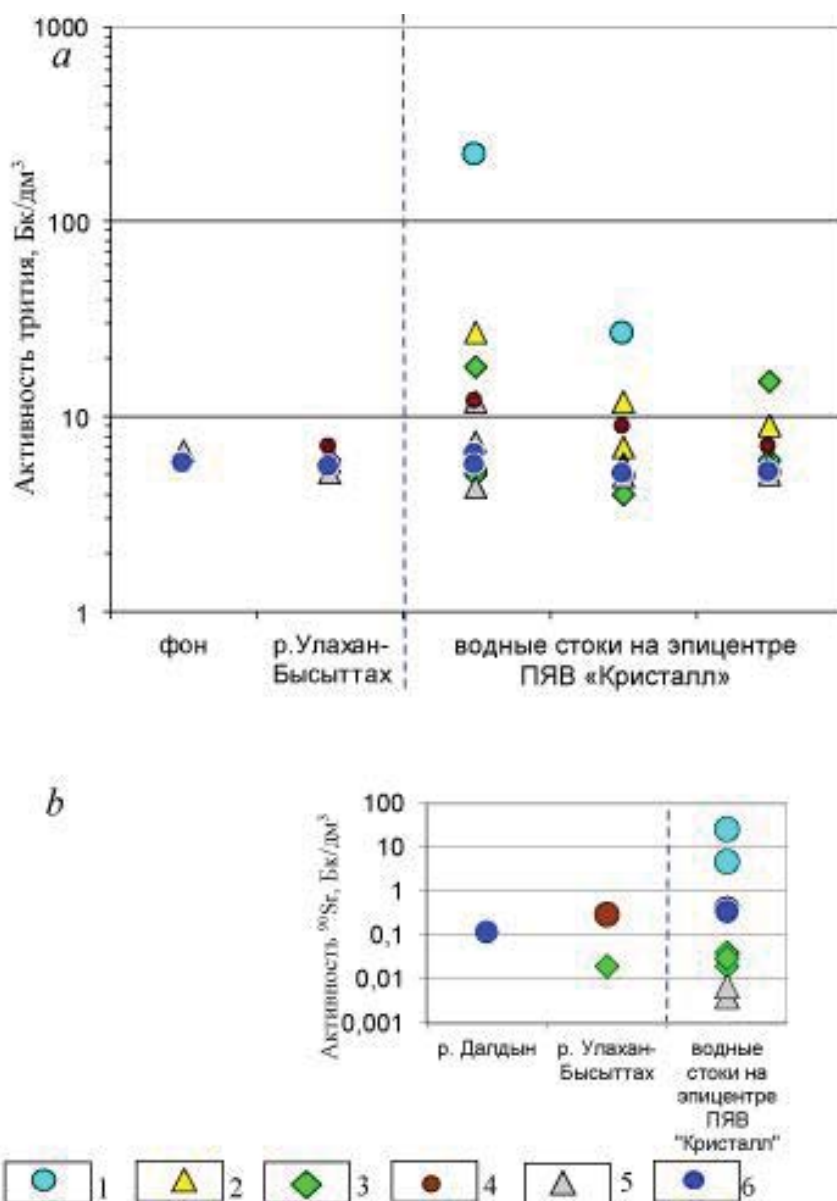


Рис. 13. Активность ^3H (а) и ^{90}Sr (б) (Бк/дм³) в водных стоках объекта «Кристалл», в р. Улахан-Бысытта и в фоновой точке р. Далдын. Условные обозначения: годы пробоотбора: 1 – 2002 г. [21], 2 – 2008 г., 3 – 2012 г., 4 – 2018 г., 5 – 2019 г., 6 – 2020 г.

Fig. 13. Activity of tritium ^3H (a) and radiostryptonium ^{90}Sr (b) (Bq/L) in surface water of the "Crystal" site, Ula Khan-Bysyttakh and Daldyn rivers. Symbols: years of water samplings: 1 – 2002 [21], 2 – 2008, 3 – 2012, 4 – 2018, 5 – 2019, 6 – 2020

Несмотря на значительное содержание изотопов Рu в погребенных грунтах эпицентра взрыва – до 21600 Бк/кг, согласно [23], и концентрирование изотопов Рu из крупнообъемных проб воды по 100 дм³, нам не удалось обнаружить их в водных стоках: активности ^{238,239}Рu и ²³⁸Рu были ниже 10⁻⁶ Бк/дм³. Этот факт дает основание говорить об устойчивой форме нахождения изотопов Рu в захороненных грунтах и почвах под насыпью, этот вывод дополнительно подкрепляется результатами изучения почв окрестностей насыпи в 2012 и 2019 гг. [32]. По-видимому, можно говорить также об отсутствии значимого выноса изотопов Рu с подземными флюидами из центральной зоны взрыва (признаки выхода соленых подземных флюидов обсуждались в статье [33]).

Итак, в настоящее время из необустроенного захоронения ОРАО на эпицентре ПЯВ «Кристалл», представляющего собой глыбово-щебнистую насыпь, идет слабоинтенсивный водный вынос радионуклидов: активность ³Н в водных стоках из-под насыпи составляет всего 4–12 Бк/дм³, ⁹⁰Sr – 0,004–0,4 Бк/дм³, что в 630–1900 раз и 12–1200 раз ниже соответствующих уровней вмешательства в питьевой воде (УВ_{вода}), равных 7600 и 4,9 Бк/кг соответственно. Изотопы ^{239,240}Рu и ²³⁸Рu в водных стоках из-под насыпи не обнаружены (<0,000001 Бк/дм³).

Заключение

Впервые подготовлены ЦМР первоначального навала, образовавшегося на эпицентре ПЯВ «Кристалл», и глыбово-щебнистой насыпи над ним, представляющей собой необустроенное приповерхностное захоронение ОРАО, и оценены их объемы: около 143 и 624 тыс. м³, соответственно.

Сооружение глыбово-щебнистой насыпи в 1992 г. и ее наращение в 2006 г. в рамках реабилитационных работ через 18 лет и 32 года после взрыва, соответственно, привели к кардинальному улучшению радиоэкологической обстановки на эпицентре ПЯВ «Кристалл»: 1) был перекрыт свободный доступ людей и животных к грунтам и почвам, приравненным к твердым РАО, тем самым был предотвращен риск случайного распространения радионуклидов в среду обитания людей; 2) были прекращены процессы эрозии грунтов эпицентра под открытым небом; 3) в настоящее время установилась спокойная радиоэкологическая обстановка, мощность экспозиционной дозы гамма-излучения составляет 6–8 мкР/ч, что практически соответствует природному радиационному фону, равному 5–7 мкР/ч, на таежных ландшафтах, развитых на местных подстилающих известняках и доломитах. Небольшое повышение МЭД до 9–10 мкР/ч у северного подножья насыпи, по-видимому, обу-

словлено краевой зоной погребенного загрязненного участка.

Путем последовательной энергетической фильтрации данных наземной магнитной съемки и численного моделирования удалось определить аддитивный характер крупной магнитной аномалии в центре насыпи, формируемой фрагментами обсадной колонны боевой скважины, и примерное расположение этих железных объектов под насыпью. Сравнительный анализ распределения УЭС и магнитных аномалий позволил выявить, что фрагменты обсадной колонны боевой скважины вызывают геоэлектрическую проводящую псевдоаномалию с УЭС от 5 до 75 Ом·м под насыпью, но не влияют на распределение УЭС в теле самой насыпи. В насыпи весьма низкие УЭС: преимущественно 20–280 Ом·м, локально 540–2000 Ом·м, предположительно обусловлены талым и весьма увлажненным состоянием глыбово-щебнистого материала, слагающего насыпь. К сожалению, расчеты на восстановление многолетней мерзлоты в насыпи и под ее телом за счет зимнего промерзания и подтягивания подошвы сезонно-талого слоя не оправдались. Крупнообломочный состав насыпи способствует просачиванию талых и метеорных вод через тело насыпи, а также свободной конвекции воздуха в насыпи, которая приводит к постоянной конденсации атмосферной влаги при наличии градиента температур поступающего в насыпь воздуха и пород насыпи, и, как следствие, к накоплению воды в насыпи и появлению множества водных стоков из-под насыпи, что подтверждают полевые наблюдения и пространственное распределение весьма низких УЭС в насыпи. По мнению авторов, насыпь стала генератором воды из атмосферной влаги. Насыпь также не препятствует выходу подземных вод и эманации газов из ЦЗВ по ослабленной зоне вокруг боевой скважины в силу своего талого состояния. Использование крупнообломочного материала вместо суглинков и отказ от намораживания льдогрунтового блока-монолита в центре насыпи по аналогии с природными криогенными объектами – булгунями (гидролакколитами), по-видимому, были главными ошибочными решениями при строительстве насыпи, не приведшими к восстановлению многолетней мерзлоты в насыпи и под ее телом и к ожидаемой криогенной иммобилизации радионуклидов в захоронении. Тем не менее в настоящее время водная миграция радионуклидов из-под насыпи характеризуется как слабоинтенсивная: в водных стоках из-под насыпи активность ³Н составляет всего 4–12 Бк/дм³, ⁹⁰Sr – 0,004–0,4 Бк/дм³, что в 630–1900 раз и в 12–1200 раз ниже уровней вмешательства в питьевой воде (УВ_{вода}), соответственно, согласно нормам радиационной безопасности [48], изотопы ^{239,240}Рu и ²³⁸Рu не обнаружены (<0,000001 Бк/дм³).

Согласно этим показателям в настоящее время нет необходимости для дополнительных мер по укреплению или модификации насыпи. Источником трития и радиостронция в водных стоках из-под насыпи могут быть как погребенные грунты эпицентра, приравненные по содержанию радионуклидов к твердым радиоактивным отходам, так и ОРАО центральной зоны взрыва, откуда радионуклиды могут выходить по возможно потерявшему герметичность стволу боевой скважины и (или) по ослабленной зоне вокруг боевой скважины. Снижение активности трития в водных стоках из-под насыпи можно объяснить двумя причинами: 1) в силу высокой подвижности тритий из ОРАО мог мигрировать с водными стоками с высокой интенсивностью и беспрепятственно еще в первые годы после взрыва, и его запасы в настоящее время уже могли иссякнуть, и потому мы наблюдаем в водных стоках низкие активности; 2) активность трития постоянно снижалась в результате естественного радиоактивного распада: при довольно коротком периоде полураспада $T_{1/2} = 12,3$ года от первоначальной активности трития к настоящему времени, в резуль-

тате радиоактивного распада осталось всего около 6,2 %. Низкие активности ^{90}Sr в водных стоках из-под насыпи можно объяснить тем, что сооружение насыпи могло действительно повлиять на них, а именно снизить интенсивность водной миграции ^{90}Sr , поскольку поверхность карбонатной щебени и глинистых частиц при медленном просачивании водных стоков может адсорбировать ^{90}Sr и связывать его в результате катионного обмена $\text{Sr}^{2+} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+}$. Низкие миграционные способности изотопов Pu и их отсутствие в водных стоках из-под насыпи можно объяснить устойчивой формой нахождения изотопов Pu в захороненных ОРАО, что также подтверждается результатами изучения почв эпицентра ПЯВ «Кристалл» в грунтах и почвах под насыпью [32].

Несмотря на сложившуюся спокойную радиоэкологическую обстановку на эпицентре ПЯВ «Кристалл», принимая во внимание талое и весьма увлажненное состояние насыпи – необустроенного приповерхностного захоронения ОРАО, необходимо продолжение мониторинговых исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рихванов Л.П. Радиоактивные элементы в окружающей среде и проблемы радиоэкологии. – Томск: STT, 2009. – 430 с.
2. Utilization of recycled cement powder as a solidifying agent for radioactive waste immobilization / Ji-Hyun Kim, Eun-A Seo, Do-Gyeum Kim, Chul-Woo Chung // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 289. – Iss. 2. – ID 123126. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061821008862> (дата обращения 09.03.2024).
3. Marsh A., Williams L., Lawrence J.A. The important role and performance of engineered barriers in a UK geological disposal facility for higher activity radioactive waste // Progress in Nuclear Energy. – 2021. – Vol. 137. – ID 103736. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0149197021001037> (дата обращения 09.03.2024).
4. Krauskopf K.B. Radioactive waste disposal and geology. – London, New York: Chapman and Hall Ltd, 1988. – 145 p. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-009-1201-4> (дата обращения 09.03.2024).
5. Malkovsky V., Yudin S., Ojovan M. Forecast of ^{241}Am migration from a system of deep horizontal boreholes // Sustainability. – 2023. – Vol. 15. – Iss. 20. – ID 15134. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/20/15134> (дата обращения 09.03.2024).
6. Мирные ядерные взрывы: обеспечение общей и радиационной безопасности при их проведении / под рук. проф. В.А. Логачева. – М: ИздАТ, 2001. – 512 с.
7. Адушкин В.В., Спивак А.А. Подземные взрывы. – М.: Наука, 2007. – 579 с.
8. Artamonova S.Y., Kozhevnikov N.O., Antonov E.Y. Permafrost and groundwater settings at the site of “Kraton-3” peaceful underground nuclear explosion (Yakutia) from TEM data // Russian Geology and Geophysics. – 2013. – Vol. 54. – P. 555–565. URL: http://geoelectriclab.com/storage/app/media/AntonovPublication/gg-2013-54-5-555_Eng.pdf (дата обращения 25.03.2024).
9. Анализ возможностей оценки размеров охранных зон мирных ядерных взрывов на основе количественных закономерностей деформации земных недр / В.С. Репин, В.П. Рамзаев, А.М. Библин, К.В. Варфоломеева, С.А. Зеленцова, К.А. Седнев, В.А. Ильичев, А.В. Касаткин, В.В. Касаткин // Радиационная гигиена. – 2023. – Т. 16. – № 4. – С. 134–147. URL: <https://www.radhyg.ru/jour/article/view/997/867> (дата обращения 09.03.2024).
10. Состояние радиационной безопасности объектов мирных ядерных взрывов на территории РС(Я) / В.В. Касаткин, В.А. Ильичев, К.В. Мясников, В.И. Клишин, Б.П. Мамонов // Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия): Матер. II Республиканской научно-практ. конф. – Якутск, 2004. – Якутск: ЯФ ГУ «Изд-во СО РАН», 2004. – С. 82–100. URL: <https://disk.yandex.ru/i/gBqGQduEF081cw> (дата обращения 09.03.2024).
11. Радиоактивное загрязнение и проект реабилитации участка «Глобус-1» / В.В. Касаткин, Е.Н. Камнев, В.И. Клишин, В.А. Ильичев // Безопасность окружающей среды. – 2009. – № 1. – С. 82–86.
12. Rosen Klas, Haak Enok. Resource requirement for countermeasures and clearing at nuclear accidents in Swedish agriculture (Resursbehov för motåtgärder och sanering vid kärnenergiolyckor i svenskt jordbruk). – Karstad: Räddningsverket, 2006. – 95 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/271765389_Resource_requirement_for_countermeasures_and_clearing_at_nuclear_accidents_in_Swedish_agriculture_Resursbehov_for_motatgarder_och_sanering_vid_karnenergiolyckor_i_svenskt_jordbruk_In_Swedish_with_Engl?channel=doi&linkId=54d0fb830cf298d656695dea&showFulltext=true (дата обращения 09.03.2024).
13. Four-year decline in radioactive cesium transfer to perennial Gramineae candidate bioenergy crops in a field polluted by radioactive fallout from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in 2011 / Makoto Kobayashi, Hisaya Matsunami, Shinichi Tsuruta, Hiroko Sato, Shotaro Ando // Grassland Science. – 2016. – Vol. 62. – Iss. 3. – P. 194–200. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/grs.12121> (дата обращения 09.03.2024).

14. Дутов А.И., Пузанова Л.А. Агроэкологические аспекты возрождения сельскохозяйственного хозяйства на территории, загрязненной радионуклидами (на примере Чернобыльской катастрофы) // Вестник Удмуртского университета. Сер. Биология, науки о Земле. – 2022. – Т. 32. – № 2. – С. 140–148. URL: <https://journals.udsu.ru/biology/article/view/6942> (дата обращения 09.03.2024).
15. Чуйков Ю.С., Досмухамедова Г.Г. Объект «Вега» и последствия ядерных взрывов в мирных целях // Астраханский вестник экологического образования. – 2006. – № 1–2 (8–9). – С. 46–71. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obekt-vega-i-posledstviya-yadernyh-vzryvov-v-mirnyh-tselyah-obzor> (дата обращения 09.03.2024).
16. Храмов Е.В. Радиационная обстановка на территории проведения мирного ядерного взрыва «Глобус-1» после выполнения реабилитационных работ // Радиационная гигиена. – 2019. – Т. 12. – № 3. – С. 58–68. URL: <https://www.radhyg.ru/jour/article/view/642> (дата обращения 09.03.2024).
17. 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 09.03.2024).
18. Шварцев С.Л. Источники кальция, стронция и бария крепких и сверхкрепких рассолов хлоридно-кальциевого типа (в связи с формированием последних) // Геология и геофизика. – 1973. – № 6. – С. 23–30.
19. Алексеев С.В. Криогидрогеологические системы Якутской алмазоносной провинции. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2009. – 319 с.
20. 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 09.03.2024).
21. 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 09.03.2024).
22. 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 09.03.2024).
23. Бурцев И.С., Колодезникова Е.Н. Радиационная обстановка в алмазоносных районах Якутии (препринт). – Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1997. – 52 с. URL: <https://yadi.sk/i/Kmp2f2-scGdTLw> (дата обращения 14.01.2023).
24. Современная радиационно-гигиеническая обстановка в регионе проведения мирных подземных ядерных взрывов «Кратон-3» и «Кристалл» на территории РС(Я) / В.П. Рамзаев, В.Ю. Голиков, А.С. Мишин, И.Г. Травникова, М.В. Кадука, О.С. Кравцова, Г.Я. Брук, Г.Н. Кайдановский, Л.А. Басалаева, А.Д. Гедеев, Ю.В. Булатенков, В.В. Петровский, Т.М. Королева, П. Странд, Дж. Браун // Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия): Матер. II Республиканской научно-практ. конф. – Якутск, 2004. – Якутск: ЯФ ГУ «Изд-во СО РАН», 2004. – С. 123–133. URL: <https://disk.yandex.ru/i/gBqGQduEF081cw> (дата обращения 09.03.2024).
25. Киселев В.В., Бурцев И.С. Ликвидация последствий аварийных подземных ядерных взрывов в зоне многолетней мерзлоты. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 1999. – 148 с. URL: <https://disk.yandex.ru/i/J0PHqSdWs0woag> (дата обращения 14.01.2023).
26. Аварийные ситуации на объектах мирных ядерных взрывов в России / К.В. Мясников, В.В. Касаткин, В.А. Ильичев, В.Д. Ахунов // Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях: Матер. Междунар. конф. – М., 24–26 апреля 2000. – СПб: Гидрометеиздат, 2000. – С. 35.
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 24.03.2024).
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 09.03.2024).
29. 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://www.elibrary.ru/item.asp?id=9466514> (дата обращения 09.03.2024).
30. 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, I.N. Kuleshova, M.L. Savopulo, V.Yu. Shkroev, V.G. Alexeev, V.I. Arkhipov, L.S. Burtsev // J. of Environ. Radioact. – 2002. – Vol. 60. – Iss. 1–2. – P. 221–234. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X01001059?via%3Dihub> (дата обращения 09.03.2024).
31. Surface ground contamination and soil vertical distribution of ¹³⁷Cs around two underground nuclear explosion sites in the Asian Arctic, Russia / V. Ramzaev, A. Mishine, V. Golikov, J.E. Brown, P. Strand // J. Environ. Radioact. – 2007. – Vol. 92. – Iss. 3. – P. 123–143. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0265931X06001858> (дата обращения 09.03.2024).
32. 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).

33. Химический состав поверхностных вод объекта «Кристалл» и содержание в них урана в 2019 г. / С.Ю. Артамонова, В.Е. Ушницкий, Д.Ю. Троицкий, О.В. Шуваева, Е.В. Полякова // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-Сибирь. Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология: Матер. XVI Междунар. конф. – Новосибирск 20–24 апреля 2020. – Новосибирск: Изд-во ИНГТ СО РАН, 2020. – С. 298–310. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44165954> (дата обращения 09.03.2024).
34. Manual for RES2DMOD. URL: <https://www.geotomosoft.com/downloads.php> (дата обращения 09.03.2024).
35. Oni T., Falade A., Oso O. Application of electrical resistivity tomography in engineering site characterization: a case study of Igarra, Akoko Edo, Southwestern Nigeria // *Malaysian Journal of Geosciences*. – 2022. – Vol. 6. – Iss. 2. – P. 84–87. URL: <https://myjgeosc.com/mjg-02-2022-84-87/> (дата обращения 09.03.2024).
36. Contribution of Python-based BERT software for landslide monitoring using Electrical Resistivity Tomography datasets. A case study in Tghat-Fez (Morocco) / O. Jabrane, D.E. Azzab, P. Martínez-Pagán, M. Martínez-Segura, H. Mahjoub, M. Charroud // *Data Brief*. – 2022. – Vol. 46. – ID 108763. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36478686/> (дата обращения 09.03.2024).
37. Geoelectric structure of the subaquatic cryolithozone in Uomullakh-Kyuel lagoon (Laptev sea) / V.V. Olenchenko, A.N. Faguet, P. Overduin, M. Angelopoulos // *Earth's Cryosphere*. – 2023. – № 5. – P. 39–53. URL: https://sibran.ru/en/journals/issue.php?ID=187429&ARTICLE_ID=187433 (дата обращения 09.03.2024).
38. Manual for ZondRes2D. URL: <http://zond-geo.com/software/> (дата обращения 09.03.2024).
39. Coscad3D.ru. URL: www.coscad3d.ru (дата обращения 09.03.2024).
40. Долгаль А.С. Влияние сферичности Земли на результаты аэромагнитных измерений над платобазальтами (на примере Норильского района) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 33. – № 11. – С. 26–33. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41469499> (дата обращения 09.03.2024).
41. 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 09.03.2024).
42. МИ – Методика измерений объемной активности стронция-90 (⁹⁰Sr) в пробах природных вод (пресных и минерализованных) бета-радиометрическим методом с радиохимической подготовкой. Номер в Федеральном реестре ФР.1.40.2014.18554, Свидетельство № 40074.4Ж212/01.00294-2010 от 30 июня 2014 г.
43. МИ – Методика измерений объемной активности изотопов плутония (²³⁸Pu, ²³⁹+²⁴⁰Pu) в пробах природных вод альфа-спектрометрическим методом с радиохимической подготовкой. Номер в Федеральном реестре ФР.1.40.2013.15394, Свидетельство об аттестации 40073.3Г185/01.00294-2010.
44. Artamonova S.Yu. Radioecological situation within area of pacific underground nuclear explosion «Kraton-3» (1978, Northwestern Yakutia) // *Chemistry for Sustainable Development*. – 2012. – Vol. 20. – № 2. – P. 105–117. URL: https://sibran.ru/en/journals/issue.php?ID=119894&ARTICLE_ID=135105 (дата обращения 09.03.2024).
45. Климовский И.В., Готовцев С.П. Криолитозона Якутской алмазодобывающей провинции. – Новосибирск: ВО Наука, 1994. – 165 с. URL: <https://e.nlr.ru/open/90015> (дата обращения 09.03.2024).
46. Микуленко К.И., Чомчоев А.И., Готовцев С.П. Геолого-географические условия проведения и последствия подземных ядерных взрывов на территории Республики Саха (Якутия). – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2006. – 196 с.
47. Артамонова С.Ю. Третий как индикатор радиэкологической обстановки в районе мирного подземного ядерного взрыва «Кристалл» // *Астраханский вестник экологического образования*. – 2019. – № 4 (52). – С. 4–13. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39244027> (дата обращения 09.03.2024).
48. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ 99/ 2009). – М., 2009. – 116 с. URL: <https://dosmotr.ru/upload/iblock/df0/%D0%A1%D0%B0%D0%BD%D0%9F%D0%B8%D0%9D%202.6.1.2523-09.pdf> (дата обращения 09.03.2024).

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>

Александр Николаевич Шеин, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; ведущий научный сотрудник Научного центра изучения Арктики, Россия, 629008, г. Салехард, ул. Республики, 20. A.N.Shein@yandex.ru

Поступила в редакцию: 19.04.2024

Поступила после рецензирования: 16.06.2024

Принята к публикации: 10.02.2025

REFERENCES

1. Rikhvanov L.P. *Radioactive elements in the environment & challenges of the radioecology*. Tomsk, STT Publ., 2009. 430 p. (In Russ.)
2. Kim Ji-Hyun, Seo Eun-A, Kim Do-Gyeum, Chung Chul-Woo. Utilization of recycled cement powder as a solidifying agent for radioactive waste immobilization. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 289, Iss. 2, ID 123126.
3. Marsh A., Williams L., Lawrence J.A. The important role and performance of engineered barriers in a UK geological disposal facility for higher activity radioactive waste. *Progress in Nuclear Energy*, 2021, vol. 137, ID 103736.

4. Krauskopf K.B. *Radioactive waste disposal and geology*. London, New York, Chapman and Hall Ltd, 1988. 145 p.
5. Malkovsky V., Yudinsev S., Ojovan M. Forecast of ^{241}Am migration from a system of deep horizontal boreholes. *Sustainability*, 2023, vol. 15, Iss. 20, ID 15134.
6. *Peaceful nuclear explosion: common and radiation safety arrangements*. Ed. by V.A. Logachev. Moscow, Izdat Publ., 2001. 512 p. (In Russ.)
7. Adushkin V.V., Spivak A.A. *Underground explosions*. Moscow, Nauka Publ., 2007. 579 p. (In Russ.)
8. Artamonova S.Y., Kozhevnikov N.O., Antonov E.Y. Permafrost and groundwater settings at the site of “Kraton-3” peaceful underground nuclear explosion (Yakutia) from TEM data. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, pp. 555–565.
9. Repin V.S., Ramzaev V.P., Biblin A.M., Varfolomeeva K.V., Zelentsova S.A., Sednev K.A., Ilyichev V.A., Kasatkin A.V., Kasatkin V.V. Estimation of the protected zone sizes for peaceful nuclear explosions based on quantitative patterns of the Earth’s interior deformation. *Radiation Hygiene*, 2023, vol. 16, no. 4, pp. 134–147. (In Russ.)
10. 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, Yakutsk Division SB RAS Publ., 2004. pp. 82–100. (In Russ.)
11. Kasatkin V.V., Kamnev E.N., Klishin V.I., Ilichev V.A. Radioactive contamination and the Project of Remediation of «Globus-1» site. *Environmental Safety*, 2009, no. 1, pp. 82–86. (In Russ.)
12. Rosen Klas, Haak Enok. *Resource requirement for countermeasures and clearing at nuclear accidents in Swedish agriculture* (Resursbehov för motåtgärder och sanering vid kärnenergiolyckor i svenskt jordbruk). Karstad, Räddningsverket Publ., 2006. 95 p.
13. Kobayashi M., Matsunami H., Tsuruta S., Sato H., Ando S. Four-year decline in radioactive cesium transfer to perennial Gramineae candidate bioenergy crops in a field polluted by radioactive fallout from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in 2011. *Grassland Science*, 2016, vol. 62, Iss. 3, pp. 194–200.
14. Dutov A.I., Puzanova L.A. Agroecological aspects of agriculture restoration on area contaminated by radionuclides (on the example of Chernobyl accident). *Bulletin of Udmurt University. Biology, geosciences div.*, 2022, vol. 32, no. 2, pp. 140–148. (In Russ.)
15. Chuikov Yu.S., Dosmukhamedova G.G. Object «Vega» and peaceful nuclear explosions consequences. *Astrakhan Bull. of ecological education*, 2006, no. 1–2 (8–9), pp. 46–71. (In Russ.)
16. Khrantsov E.V. Radiation state on the territory of peaceful nuclear explosion «Globus-1» site after rehabilitation works. *Radiation Hygiene*, 2019, vol. 12, no. 3, pp. 58–68. (In Russ.)
17. Fedorov A.N., Shestakova A.A., Torgovkin Ya.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, no. 2, pp. 36–49. (In Russ.)
18. Shvartsev S.L. Calcium, strontium and barium sources in strong and ultra-strong brines of the calcium chlorid type (in connection with the formation of the latter). *Geology and Geophysics*, 1973, no. 6, p. 23–30. (In Russ.)
19. Alekseev S.V. *Cryohydrogeologic systems of Yakutsk Diamond-Bearing Province*. Novosibirsk, Academic «Geo» Publ., 2009. 319 p. (In Russ.)
20. Artamonova S.Yu., Bondareva L.G., Antonov E.Yu., Kozhevnikov N.O. Geoeologic model of «Crystal» peaceful underground nuclear explosion area (Yakutia). *Environmental Geosciences*, 2012, Iss. 2, pp. 143–158. (In Russ.)
21. 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, Yakutsk Division SB RAS Publ., 2004. pp. 182–192. (In Russ.)
22. 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.
23. 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.)
24. Ramzaev V.P., Golikov V.Yu., Mishin A.S., Travnikova I.G., Kaduka M.V., Kravtsova O.S., Bruk G.Ya., Kaidanovskii G.N., Basalaeva L.A., Gedeonov A.D., Bulatenkov Yu.V., Petrovskii V.V., Koroleva T.M., Strand P., Braun D. Modern radiation-hygienic state in area of peaceful underground nuclear explosion «Kraton-3» and «Crystal» on the territory RS (Ya). *Radiation safety in the Republic Sakha (Yakutia). Proc. of II Republic Scientific-practical Conference*. Yakutsk, Yakutsk Division SB RAS Publ., 2004. pp. 123–133. (In Russ.)
25. 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.)
26. Myasnikov K.V., Kasatkin V.V., Ilichev V.A., Akhunov V.D. Emergency situation on the objects of peaceful nuclear explosions in Russia. *Radioactivity within nuclear explosions and accidents. Proc. of Inter. Conference*. St Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 2000. p. 35. (In Russ.)
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.)
28. Lobanov V.V., Mishhenko Yu.V., Seller 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, Yakutsk Division SB RAS Publ., 2004. pp. 100–107. (In Russ.)
29. Chevychelov A.P., Sobakin P.I., Molchanova I.V. Radioactive contamination of Permafrost – affected soils with ^{137}Cs and ^{90}Sr , the products of an accidental underground nuclear explosion. *Eurasian soil science*, 2006, vol. 39, no. 12, pp. 1362–1369.

30. Gedeonov A.D., Petrov E.R., Kuleshova I.N., Savopulo M.L., Shkroev V.Yu., Alexeev V.G., Arkhipov V.I., Burtsev L.S. Residual radioactive contamination at the peaceful underground nuclear explosion sites «Craton-3» and «Crystal» in the Republic of Sakha (Yakutia). *J. of Environ. Radioact.*, 2002, vol. 60, Iss. 1–2, pp. 221–234.
31. Ramzaev V., Mishine A., Golikov V., Brown J. E., Strand P. Surface ground contamination and soil vertical distribution of ^{137}Cs around two underground nuclear explosion sites in the Asian Arctic, Russia. *J. Environ. Radioact.*, 2007, vol. 92, Iss. 3, pp. 123–143.
32. 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.
33. Artamonova S.Yu., Ushnitskii V.E., Troitskii D.Yu., Shuvaeva O.V., Polyakova E.V. Chemical composition of Surface water of the «Crystal» site and Uranium content in it in 2019. *INTEREXPO Geo-Siberian Subsoil use. Engineering and technologies for searching, exploration and development of deposits. Economy. Geoecology. Proc. of XVI International Conference*. Novosibirsk, 20–24 April 2020. Novosibirsk, IPGG SB RAS Publ., 2020. pp. 298–310. (In Russ.)
34. *Manual for RES2DMOD*. Available at: <https://www.geotomosoft.com/downloads.php> (accessed 9 March 2024).
35. Oni T., Falade A., Oso O. Application of electrical resistivity tomography in engineering site characterization: a case study of Igarra, Akoko Edo, Southwestern Nigeria. *Malaysian Journal of Geosciences*, 2022, vol. 6, Iss. 2, pp. 84–87.
36. Jabrane O., Azzab D.E., Martínez-Pagán P., Martínez-Segura M., Mahjoub H., Charroud M. Contribution of Python-based BERT software for landslide monitoring using Electrical Resistivity Tomography datasets. A case study in Tghat-Fez (Morocco). *Data Brief.*, 2022, vol. 46, ID 108763.
37. Olenchenko V.V., Faguet A.N., Overduin P., Angelopoulos M. Geoelectric structure of the subaquatic cryolithozone in Uomullakh-Kyuel lagoon (Laptev sea). *Earth's Cryosphere*, 2023, no. 5, pp. 39–53.
38. *Manual for ZondRes2D*. Available at: <http://zond-geo.com/software/> (accessed 9 March 2024).
39. *Coscad3D.ru*. Available at: www.coscad3d.ru (accessed 9 March 2024).
40. Dolgal A.S. Effect of Earth sphericity on the results of aeromagnetic measurements over platobasalts (on the example of Norilsk region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 33, no. 11, pp. 26–33. (In Russ.)
41. 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.)
42. *MI – Methodology for Measuring the Volumetric Activity of Strontium-90 (^{90}Sr) in Natural Water Samples (Fresh and Mineralized) Using the beta Radiometric Method with radiochemical Preparation. Number in the Federal Register FR.1.40.2014.18554, Certificate no. 40074.4Zh212/01.00294-2010 dated June 30, 2014.* (In Russ.)
43. *MI – Methodology for Measuring the Volumetric Activity of Plutonium Isotopes (^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$) in Natural Water Samples Using the alpha Spectrometric Method with Radiochemical Preparation. Number in the Federal Register FR.1.40.2013.15394, Certificate of Attestation 40073.3G185/01.00294-2010* (In Russ.)
44. Artamonova S.Yu. Radioecological situation within area of pacific underground nuclear explosion «Kraton-3» (1978, Northwestern Yakutia). *Chemistry for Sustainable Development*, 2012, vol. 20, no. 2, pp. 105–117.
45. Klimovskii I.V., Gotovtsev S.P. *Permafrost of the Yakut Diamond-Bearing Province*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1994. 165 p. (In Russ.)
46. Mikulenko K.I., Chomchoev A.I., Gotovtsev S.P. *Geological-geographical conditions of underground nuclear explosions and their consequences on the territory of Republic Sakha (Yakutia)*. Yakutsk, YaCC SB RAS Publ., 2006. 196 p. (In Russ.)
47. Artamonova S.Yu. Tritium as the indicator of the radioecological situation of the site of the peaceful underground nuclear explosion «Crystal». *Astrakhan Bulletin for Environmental Education*, 2019, no. 4 (52), pp. 4–13.
48. *SanPiN 2.6.1.2523-09. Radiation Safety Standards*. Moscow, 2009. 116 p. (In Russ.)

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>

Aleksandr N. Shein, Cand. Sc., Associate Professor, Senior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademician Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; Leading Researcher, Arctic Research Center of the Yamal-Nenets Autonomous District, 20, Respubliki street, Salekhard, 629008, Russian Federation. A.N.Shein@yandex.ru

Received: 19.04.2024

Revised: 16.06.2024

Accepted: 10.02.2025