

# СОВРЕМЕННАЯ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЛОЩАДКЕ МИРНОГО ПОДЗЕМНОГО ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА «КРИСТАЛЛ» И РАДИОНУКЛИДЫ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ ПРИЛЕГАЮЩЕЙ ТЕРРИТОРИИ (ЗАПАДНАЯ ЯКУТИЯ)

© 2023 г. С. Ю. Артамонова<sup>а,\*</sup>, Л. Г. Бондарева<sup>б</sup>, М. С. Мельгунов<sup>а</sup>, Г. В. Симонова<sup>в</sup>

<sup>а</sup> *Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,  
630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, д. 3*

<sup>б</sup> *Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана Роспотребнадзора,  
141014, Мытищи, Московской обл.*

<sup>в</sup> *Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,  
634055, Томск, пр. Академический, д. 10/3*

*\*e-mail: artam@igm.nsc.ru*

Поступила в редакцию 22.03.2023, после доработки 21.04.2023, принята к публикации 28.04.2023

Рассматривается радиоэкологическая обстановка на технологической площадке мирного подземного ядерного взрыва «Кристалл» после сооружения насыпи над эпицентром и очистки растительности. Мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения в 2012 г. изменялась от 0.04 до 0.066 мкЗв/ч, содержание радионуклидов в почвах к 2019 г. снизилось до (Бк/кг):  $^{90}\text{Sr}$  2.5–5.3,  $^{239,240}\text{Pu}$  0.03–25.4,  $^{137}\text{Cs}$  <2.0. В 2018–2020 гг. в поверхностной воде активность радионуклидов (Бк/дм<sup>3</sup>) составила: в стоках из-под насыпи  $^3\text{H}$  4–12,  $^{90}\text{Sr}$  0.004–0.4,  $^{239,240}\text{Pu}$  <10<sup>-6</sup>, в местной речной воде  $^3\text{H}$  4–10.2,  $^{90}\text{Sr}$  0.004–0.3. В настоящее время влияние поверхностных стоков объекта «Кристалл» на речную сеть оценено как незначительное. В местной речной воде не более 1/3  $^3\text{H}$  поступает с атмосферными осадками, а остальной  $^3\text{H}$  – из зоны взрыва «Кристалл» преимущественно подземным путем. Не менее 91–96%  $^{90}\text{Sr}$  в местной речной воде обусловлены взрывом «Кристалл»: часть поступает из зоны взрыва подземным путем, часть – это смыв с поверхности ландшафтов.

**Ключевые слова:** поверхностные воды, подземные рассолы, подземный ядерный взрыв, особые радиоактивные отходы, геологическая среда, радионуклиды, тритий, радиостронций, Якутия.

**DOI:** 10.31857/S0033831123050118, **EDN:** XSLBGN

Мирные подземные ядерные взрывы (ПЯВ) проводились в бывшем СССР для решения широкого ряда народно-хозяйственных задач в разных точках страны, их было всего 124 [1]. В результате расплавления и испарения пород в центре взрыва создавалась полость, которую можно рассматривать как подземный пункт размещения особых радиоактивных отходов без защитных барьеров, с весьма длительной продолжительностью существования

(по десятикратному периоду полураспада долгоживущего изотопа  $^{239}\text{Pu}$  – не менее 241 тысячи лет). По проекту допускался выход малой части газообразных продуктов взрыва (первых процентов от общей активности) в атмосферу. В связи с существованием потенциального риска переноса радионуклидов из зоны взрыва во вмещающую геологическую среду и выхода на поверхность Земли актуальность изучения радиоэкологической обстановки на местах



**Рис. 1.** Точки отбора водных проб на технологической площадке ПЯВ «Кристалл» размером  $430 \times 330$  м с глыбово-щебнистой насыпью, перекрывающей навал, возникший на эпицентре взрыва. На переднем плане – р. Улахан-Бысытта. Белыми кружками показаны точки отбора водных проб, проведенных нами (фотография с вертолета, автор фото В.Е. Захаров, 2007 г.).

проведения ПЯВ и прилегающей территории даже по прошествии десятков лет не вызывает сомнений.

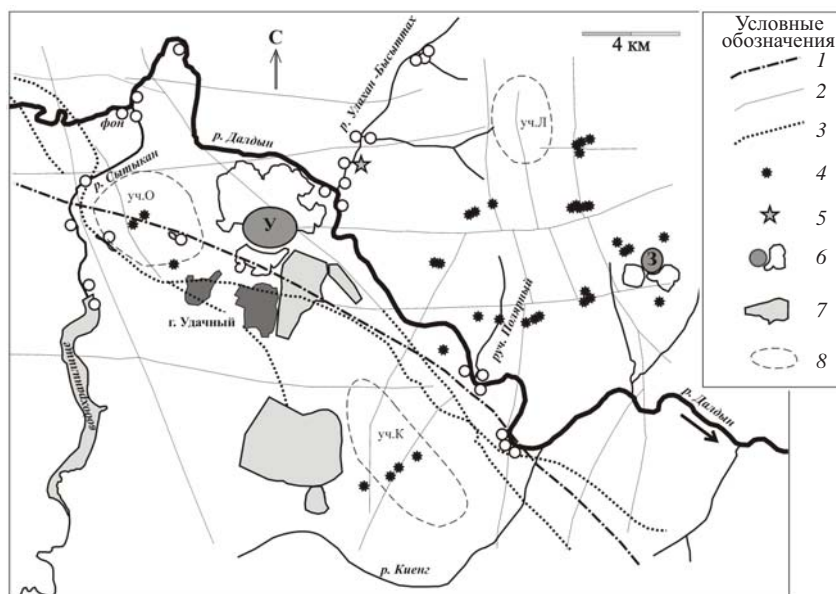
Объект ПЯВ «Кристалл» выбран нами в связи с его расположением в алмазодобывающем районе вблизи г. Удачный. Взрыв «Кристалл» был произведен 2 октября 1974 г. на левом борту р. Улахан-Бысытта в 300 м от уреза воды в многолетне-мерзлых известняках на глубине всего 98 м. Это был первый из 8 запланированных взрывов на рыхление для создания навалов высотой 27–30 м по линейному ряду поперек долины р. Улахан-Бысытта, как основы для строительства плотины хвостохранилища общей длиной 1800 м, шириной по гребню 85 м [1, 2]. Однако получился навал с провалившейся центральной частью, его высота по гребню составила 10–14 м, т.е. в 2 раза ниже расчетной, что послужило официальной причиной для отказа от проведения остальных взрывов [1]. Этот близповерхностный взрыв с проектным выходом около 4% продуктов взрыва мощностью 1.7 кт в тротиловом эквиваленте оказался единственным ПЯВ на рыхление.

В 1992 г. навал на эпицентре взрыва «Кристалл» был засыпан глыбово-щебнистым материалом из пустых пород карьера кимберлитовой трубки «Удачная». В 2006 г. в рамках реабилитационного проекта АО «ВНИПИпромтехнологии» ГК «Росатом» насыпь была наращена, участок вокруг насыпи был очищен от мохово-лишайникового и растительного покровов механизированным способом, при котором почвенный покров получил

повреждения в разной степени вплоть до удаления его верхних слоев. Участок был обнесен забором из металлических столбов и колючей проволоки, а собранный почвенно-растительный материал был размещен за забором по периметру участка. Этот прямоугольный по очертаниям участок размером  $430 \times 330$  м, где по центру расположена глыбово-щебнистая насыпь площадью  $52500 \text{ м}^2$  и высотой 7–20 м, представляет собой так называемую технологическую площадку объекта ПЯВ «Кристалл» (рис. 1).

На сегодняшний день объект «Кристалл» один из наиболее обследованных объектов ПЯВ в Якутии, да и целом в Сибири: первые открытые радиометрические замеры после рассекречивания объекта проведены в 1990 г., первые пробы почв изучены в 1993 г. [3], в начале 2000-х гг. проведен большой комплекс работ по оценке загрязнения почв, растительности [4–6] и рисков возможного облучения местного населения [7]. Пионерные геофизические исследования в 2008, 2019 гг. с применением методов зондирования ЗСБ, электротомографии и наземной магнитной съемки позволили получить данные о состоянии многолетней мерзлоты, геологической ситуации в недрах объекта «Кристалл» и прилегающей территории [8–11].

Проблема водного переноса радионуклидов на объекте «Кристалл» обсуждалась в начале 2000-х гг. сотрудниками ИГД РАН [2], АО ВНИПИпромтехнологии ГК РОСАТОМ [12], но в последние годы были только единичные публикации [13, 14]. Нами поверхностные воды района



**Рис. 2.** Схема отбора проб поверхностных вод в районе объекта ПЯВ «Кристалл» (показаны белыми кружками). Условные обозначения: 1 – разлом «Октябрьский», установленный по геолого-геофизическим данным; 2 – другие разломы по данным сейсморазведки; 3 – разломы, выполненные дайками долеритов; 4 – кимберлитовые трубки, дайки; 5 – объект ПЯВ «Кристалл»; 6 – карьеры на кимберлитовых трубках «Удачная» (У) и «Зарница» (З) и отвалы пустых пород рядом с ними; 7 – хвостохранилища; 8 – участки закачки в многолетнемерзлую толщу дренажных рассолов, поступающих в карьер тр. «Удачная» (уч.О – «Октябрьский», уч.К – «Киенгский», уч.Л. – «Левобережный»).

объекта «Кристалл» изучались в 2008, 2012, 2018–2020 гг., и в настоящей статье рассматриваются результаты этих исследований в совокупности с опубликованными данными других исследователей.

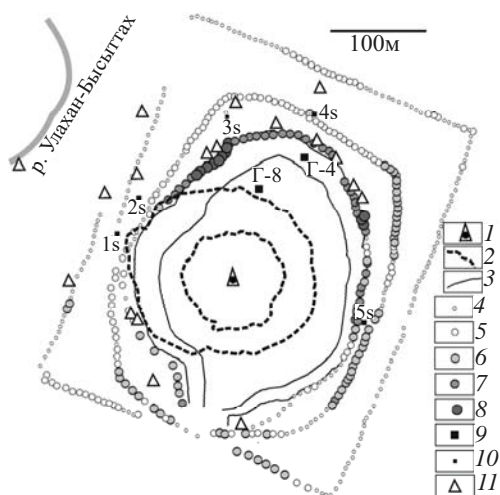
Целью наших исследований является оценка радиоэкологической обстановки на технологической площадке объекта «Кристалл» и оценка водного переноса техногенных радионуклидов с поверхностными стоками технологической площадки ПЯВ «Кристалл» в местную речную сеть.

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Радиационную обстановку на технологической площадке объекта «Кристалл» оценивали путем маршрутных измерений мощности AMBIENTного эквивалента дозы гамма-излучения (МАД, мкЗв/ч) с применением спектрометра МКС-АТ6101Д, проводили также измерения мощности экспозиционной дозы гамма-излучения (МЭД, мкР/ч) с применением СРП-68-01. Географическую привязку точек замеров проводили с помощью GPS-навигатора ETRIX.

Отбор водных проб на технологической площадке объекта «Кристалл» проводили из небольших ручейков, вытекающих из-под насыпи, и из мелких водоемов, сформированных в понижениях мелко-полигонального холмистого микрорельефа (рис. 1). Отбирали пробы из местных водотоков: р. Улахан-Бысытта и ее притоков, р. Далдын, р. Сытыкан, руч. Полярный и двух водоемов, расположенных на водораздельном ландшафте к северо-западу от г. Удачный (рис. 2). Отбор проб верхнего слоя почв (0–5 см глубины) проводили на технологической площадке в 5 точках в 2012 и 2019 г. (рис. 3).

Активность трития в пробах поверхностных вод и подземных рассолов определяли жидкостно-сцинтилляционным методом. Для подготовки водные пробы 2008 г. фильтровали вначале через бумажный фильтр «синяя лента», затем мембранный фильтр с диаметром пор 0.2 мкм, главным образом для устранения возможных взвешенных частиц, которые впоследствии могли помешать в определении содержания трития [15]. Данный прием весьма успешно применялся на аналогичных водных объектах, описанных в работе [16]. Остальные пробы поверхностных вод 2012, 2018–2020 гг. и пробы



**Рис. 3.** Распределение МАД на технологической площадке объекта ПЯВ «Кристалл» в 2012 г. Условные обозначения: 1 – местоположение устья боевой скважины; 2 – контуры подножья и гребня навала, сформированного в результате взрыва, контуры подножья навала и первичной глыбово-щебнистой насыпи 1992 г. примерно совпадали; 3 – контуры подножья и верхней кромки наращенной в 2006 г. насыпи. Мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения в июле 2012 г. (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; точки отбора проб: 9 – почв в 1993 г. [3]; 10 – почв в 2012 и 2019 гг.; 11 – водных стоков в 2012, 2018–2020 гг.

подземных рассолов подвергали дистилляции в присутствии перманганата и гидроксида калия, и дальнейший анализ проводили на отогнанном дистилляте. Необходимо подчеркнуть, что высокая соленость проб подземных рассолов приводит к химическому (примесному) тушению сигналов β-частиц, и только предварительная отгонка подземных рассолов позволяет провести замеры с достаточной эффективностью и получить количественные данные.

Аликвоты профильтрованных пресных водных проб 2008 г. и аликвоты конденсата водяного пара водных проб 2012, 2018–2020 гг. и подземных рассолов объемом по 8 мл из каждой пробы помещали в пластиковые виалы, в каждую из которых добавляли по 12 мл сцинтиллятора Optiphase Hisafe3. После смешивания виалы закрывали пробкой и встряхивали в течение 2 мин до полного смешивания пробы со сцинтилляционным коктейлем. Перед измерением смесь выдерживалась в темном и прохладном месте в течение 24 ч для стабилизации люминесценции. Время измерения одной пробы составляло

от 8 до 24 ч. Удельная активность трития определялась жидкостно-сцинтилляционным методом: в 2008 и 2012 гг. с помощью спектрометра Tri-Carb 2800 (США) (аналитик – к.х.н. Л.Г. Бондарева), в 2018–2020 гг. – с помощью спектрометра-радиометра Quantulus-1220 фирмы Perkin Elmer (США) (аналитик – к.т.н. Г.В. Симонова).

При накопительном измерении в течение от 8 до 24 ч на спектрометре-радиометре Quantulus-1220 минимальная детектируемая активность  $^3\text{H}$  была равна 1 Бк/дм<sup>3</sup>, на спектрометре Tri-Carb 2800 – 2 Бк/дм<sup>3</sup>. Стандартные образцы растворов тритиевой воды в сцинтилляторе для градуировки радиометров готовили на основе стандартов:  $^3\text{H}$  стандарт (Perkin Elmer unquenched LSC standard 1215-111) активностью 204500 dpm (на 1 февраля 2007 г.) для спектрометра-радиометра Quantulus-1220,  $^3\text{H}$  стандарт (Packard Bioscience Ltd) активностью 287400 dpm (на 1 октября 2007 г.) для спектрометра Tri-Carb 2800. Стандартное отклонение величины объемной активности трития в пробах поверхностных вод и подземных рассолов при измерении на спектрометре-радиометре Quantulus-1220 при активности 5–10 Бк/дм<sup>3</sup> менялось в диапазоне от 0.4 до 1.2 Бк/дм<sup>3</sup>, при активности >10 Бк/дм<sup>3</sup> – в диапазоне от 0.5 до 0.9 Бк/дм<sup>3</sup>, на спектрометре Tri-Carb 2800 для обоих диапазонов активности стандартное отклонение составляло от 1 до 5 Бк/дм<sup>3</sup>.

Активность  $^{90}\text{Sr}$  в водных пробах, пробах подземных рассолов и пробах почв определяли бета-радиометрическим методом с предварительной радиохимической подготовкой счетных образцов (аналитик – И.В. Макарова) [17, 18]. Отбор крупнообъемной водной пробы в 20 дм<sup>3</sup> и концентрирование из нее  $^{90}\text{Sr}$  позволяли добиться более низких пределов обнаружения. Концентрирование  $^{90}\text{Sr}$  проводили путем осаждения карбонатных осадков. Для этого в пробу добавляли Са (до достижения концентрации  $\text{Ca}^{2+} > 20$  мг/л), носитель Sr (раствор нитрата стронция  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ , х.ч., ГОСТ 5429, подготовленный добавлением дистиллированной воды, 50 мг в расчете на металл), затем использовали карбонат аммония  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  в присутствии 25%-ного водного аммиака безуглеродистого (б.у.)  $\text{NH}_4\text{OH}$ . Карбонатный осадок вместе с фильтром подвергали дальнейшей обработке по общей схеме, принятой для озоленных твердых проб (почв, грунтов и др.). Для радиохимической подготовки подземных рас-

солов брали 250 см<sup>3</sup> исходных рассолов, добавляли дистиллированную воду и доводили объем раствора до 20 дм<sup>3</sup> для снижения минерализации. Далее обработку раствора проводили по вышеприведенной схеме радиохимической подготовки природных вод.

Пробы почв подвергали озолению при температуре 600°C. В золу массой порядка 60 г вносили носитель стронция (200 мг в расчете на металл). Дальнейшая общая схема подготовки проб (золы почв, карбонатных осадков поверхностных вод и подземных рассолов) заключалась в их растворении в 6 М HCl и удержании в растворе стронция (и кальция) при последовательном удалении иттрия (и других компонентов) путем добавления в раствор аммиака NH<sub>4</sub>OH б.у. и осаждения оксалата иттрия в кислой среде с последующим сбросом осадков. После удаления исходного иттрия в пробу вносили носитель иттрия (раствор хлорида иттрия, приготовленный из соли YCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O х.ч., ТУ 6-09-4773, путем добавления горячей подкисленной дистиллированной воды, для подкисления использовали соляную кислоту, 15 мг в расчете на металл). Пробу выдерживали для достижения радиоактивного равновесия <sup>90</sup>Sr и <sup>90</sup>Y. После этого из пробы извлекали иттрий в виде осадков и переносили на счетную подложку для β-радиометрии. Метод основан на определении активности <sup>90</sup>Sr по активности <sup>90</sup>Y. Измерение активности <sup>90</sup>Y проводили на низкофоновом бета-радиометре РУБ-01П. Выход стронция в процессе пробоподготовки контролировали атомно-абсорбционным методом, выход иттрия – весовым. Содержание <sup>90</sup>Sr определяли через измеренную активность <sup>90</sup>Y с учетом соотношения их периодов полураспада. Предел обнаружения <sup>90</sup>Sr указанным методом составляет 0.01 Бк. Относительная погрешность метода не превышает 20% с вероятностью  $P = 0.95$  для активностей более 1 Бк.

Активность <sup>239,240</sup>Pu, <sup>238</sup>Pu в водных пробах и пробах почв определяли альфа-спектрометрическим методом с предварительной радиохимической подготовкой счетных образцов (аналитики – И.В. Макарова, к.г.-м.н. Мельгунов) [19, 20]. Водную пробу отбирали объемом 100 дм<sup>3</sup>. В качестве внутреннего стандарта использовали метку <sup>242</sup>Pu 0.1 Бк, который вносили в водную пробу перед химическими процедурами. Концентрирование изотопов Pu из 100-литровой исходной пробы по-

зволяет добиться более низких пределов их обнаружения, которое проводили путем соосаждения с гидроксидами Fe, для этого вносили в пробу FeCl<sub>3</sub>, а затем раствор аммиака при pH 8–9. Далее осадки гидроксилов Fe, содержащие изотопы Pu, подвергали поэтапной химической подготовке по общей схеме.

Пробы почв озолляли при 600°C, затем в твердую золу вносили метку <sup>242</sup>Pu 0.1 Бк и далее переводили в раствор путем кислотного выщелачивания. Изотопы Pu концентрировали с гидроксидами Fe аналогично водным пробам. Дальнейшая общая схема подготовки проб включала ряд этапов. Осадки гидроксилов Fe собирали и переводили в раствор с помощью кипящей 7 М HNO<sub>3</sub>. В азотнокислый раствор для перевода плутония в четырехвалентное состояние добавляли NaNO<sub>2</sub>, затем раствор пропускали через анионообменную смолу АВ-17В для удаления мешающих радионуклидов с близкими энергиями альфа-частиц – <sup>228</sup>Th, <sup>241</sup>Am с фильтратом. Переводили остаток в раствор с помощью трилона Б, щавелекислого аммония и 25%-ного хлорида аммония, доводили pH до 3–4 добавлением 7 М HNO<sub>3</sub> и далее раствор подвергали электролизу в течение 30 мин при постоянном токе 2.0 А для высаживания на подложку – диск из коррозионно-стойкой нержавеющей стали.

Детектирование альфа-частиц осуществляли с помощью 8-канального альфа-спектрометра ALPHA-ENSEMBLE-8 (Ametek, ORTEC, США) с кремниевыми детекторами высокого разрешения ENS-U300 (чувствительная площадь 300 мм<sup>2</sup>, разрешение по альфа (ПШПВ) 19 кэВ) и ENS-U450 (чувствительная площадь 450 мм<sup>2</sup>, разрешение по альфа (ПШПВ) 20 кэВ). Время замеров составило от 150000 до 600000 с. Пределы обнаружения метода 0.002 Бк. Относительная погрешность не превышает ±15 % с вероятностью  $P = 0.95$ .

Для определения активности <sup>137</sup>Cs в пробах почв использовали прямую высокоразрешающую полупроводниковую гамма-спектрометрию (ВПГС) с колодезным полупроводниковым детектором EGPC 192-P21/SHF 00-30A-CLF-FA фирмы EURISYS MEASURES (Франция) [21]. Время измерения в зависимости от активности определяемых изотопов составляло от 1–2 до 24 ч. Пределы обнаружения не хуже 0.03 Бк, что соответствует содержанию <sup>137</sup>Cs

2 Бк/кг. При содержании  $^{137}\text{Cs}$  более 50 Бк/кг с вероятностью  $P = 0.95$  относительная погрешность составляла не более 10%.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На технологической площадке объекта «Кристалл» полевые измерения летом 2012 г. выявили преобладание низкой МАД – от 0.04 до 0.057 мкЗв/ч – и ее слабое повышение от 0.058 до 0.066 мкЗв/ч на северном (в т.ч. северо-западном, северо-восточном) подножье насыпи в виде узкой полосы (рис. 3). Согласно результатам радиометрических замеров, средняя МЭД в 2008 г. составляла 8.6 мкР/ч при диапазоне от 7.0 до 11.5 мкР/ч, а в 2019 г. – 7.7 мкР/ч при диапазоне от 6 до 10 мкР/ч, при этом их распределение на площадке было аналогично распределению МАД в 2012 г.: слабо повышенные МЭД, равные 9–10 мкР/ч, были характерны только для северного подножья насыпи, а на остальной территории площадки значения МЭД составляли всего 6–7 мкР/ч.

Изучение почв в 2012 и 2019 гг. показало практически следовое (малое) содержание техногенных радионуклидов в верхнем слое почв (0–5 см), за исключением пробы, отобранной примерно в 80 м к северу от навала (табл. 1).

В ходе полевых работ нами было обнаружено множество водных стоков, вытекающих из-под насыпи. Результаты анализов активности трития и радиостронция в пробах водных стоков из-под насыпи и из местных рек и ручьев показаны на рис. 4 и 5. Содержание радионуклидов в подземных рассолах приведено в разделе обсуждения результатов.

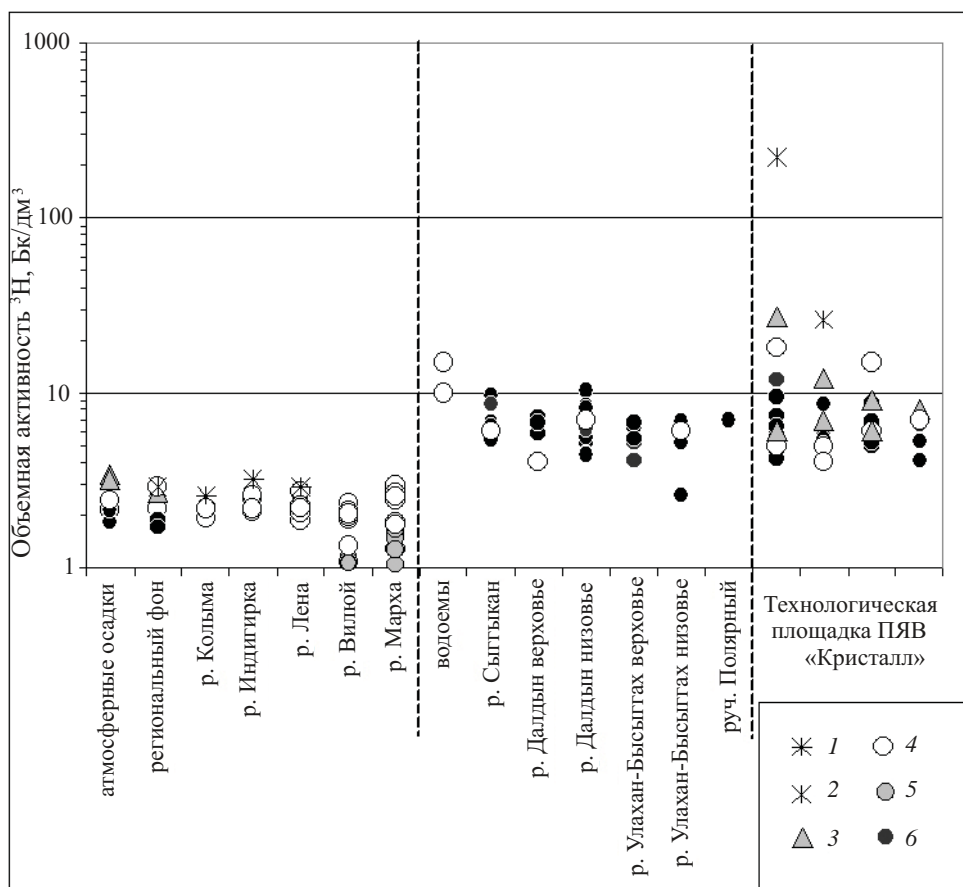
## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### *Реабилитационные мероприятия и радиоэкологическая обстановка на технологической площадке объекта «Кристалл»*

В 1974 г. через 1 ч после взрыва «Кристалл» на появившемся на эпицентре навале мощность экспозиционной дозы гамма излучения (МЭД) оценивалась в 10–12 Р/ч, в 500 м от эпицентра через 2 ч

после взрыва МЭД достигала 0.3 Р/ч, через 24 ч она снизилась до 40000 мкР/ч [1], а далее также стремительно снижалась по мере распада короткоживущих продуктов взрыва. В 1990 г. распределение МЭД на технологической площадке было весьма неоднородным: на навале составляла 50–65 мкР/ч, на остальной территории площадки – преимущественно 6–12 мкР/ч [3]. После сооружения насыпи над навалом в 1992 г., относительно повышенные МЭД 20–25 мкР/ч выявлены в 1993 г. на участке, прилегающем к навалу с северо-восточной стороны [3]. Наличие этого загрязненного участка с мощностью амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (МАД) до 0.22 мкЗв/ч подтвердилось в 2002 г. [12]. В почвах было обнаружено высокое содержание техногенных радионуклидов: активность  $^{137}\text{Cs}$  до 11200,  $^{239,240}\text{Pu}$  до 21600,  $^{241}\text{Am}$  до 2800 Бк/кг, что превышает минимальные значения активности для ТРАО в 1.1, 21.6 и 2.8 раз соответственно (табл. 1) [3, 4, 13, 22]. Наличие в грунтах трития подтверждалось результатами анализа стоков около погребенного навала: в них активность трития в 2002 г. составила 221 Бк/дм<sup>3</sup> [2]. МЭД всего в 20–25 мкР/ч не в полной мере отражала реальную степень загрязненности почв участка, прилегающего к навалу, что впервые было отмечено Собакиным П.И. [23]. Следует полагать, что грунты навала, ставшие недоступными для изучения после их засыпки в 1992 г., содержали еще большее количество техногенных радионуклидов, поскольку их МЭД 50–65 мкР/ч трехкратно превышали МЭД на загрязненном участке, прилегающем к навалу с северо-восточной стороны. Эти вновь полученные данные о содержании радионуклидов в почвах загрязненного участка стали достаточным основанием для придания ПЯВ «Кристалл» статуса аварийного взрыва [24, 25].

Загрязненный участок был погребен при наращении глыбово-щебнистой насыпи в 2006 г. Таким образом, кардинальное улучшение радиоэкологической обстановки на технологической площадке было достигнуто в результате проведения реабилитационных мероприятий – засыпки грунтов навала в 1992 г. и загрязненного участка в 2006 г. Но механизированная очистка растительного покрова с частичным удалением верхнего слоя почв в том же 2006 г., направленная к снижению МЭД на технологической площадке, оценивается не так однозначно.



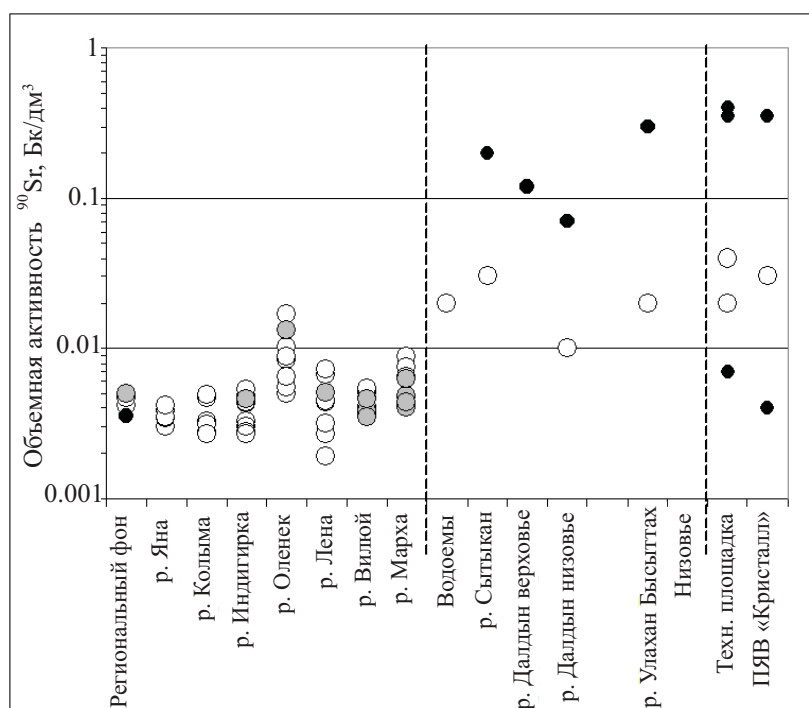
**Рис. 4.** Объемная активность трития ( $\text{Bк/дм}^3$ ) в поверхностных стоках технологической площадки ПЯВ «Кристалл» и в речной воде прилегающей территории в разные годы. Условные обозначения: 1 – 2000 г.; 2 – 2002 г.; 3 – 2008 г.; 4 – 2012–2014 гг.; 5 – 2016 г.; 6 – 2018–2020 гг. Точки отбора проб см. рис. 1–3. Течение р. Улахан-Бысытта от объекта «Кристалл» до устья условно принято за ее низовье, а выше – за ее верховье. Течение р. Далдын выше устья р. Улахан-Бысытта условно принято за ее верховье, ниже – за ее низовье. Для сравнения приведены данные по активности трития в стоках технологической площадки в 2002 г. [2], региональная фоновая активность трития в атмосферных осадках и в речной воде [26–33], активность трития в рр. Колыма, Индигирка, Лена [26, 30], в рр. Вилюй, Марха [34].

Во-первых, собранный почвенно-растительный материал был просто складирован и оставлен за пределами технологической площадки; радиоэкологические последствия этого еще предстоит оценить. Во-вторых, как показали результаты электротомографических зондирований, нарушение растительного и почвенного покровов на технологической площадке привело к двукратному росту мощности сезонно-талого слоя, заметному отеплению подстилающих пород [11], что на поверхности проявилось в виде развития полигонально-холмистого термокарстового микрорельефа.

Наши замеры показали, что в настоящее время на технологической площадке характерны низкие МАД ( $0.04\text{--}0.066\text{ мкЗв/ч}$ ), сравнимые с местным радиационным фоном (рис. 3), поскольку на под-

стилающих известняках и доломитах, укрытых мхово-лишайниковым покровом редкостойной северной тайги, МАД составляет всего  $0.04\text{--}0.06\text{ мкЗв/ч}$ . Выявленное нами в 2012 и 2019 гг. относительное слабое повышение значений МАД (и МЭД) на северном подножье уже наращенной современной насыпи в виде узкой полосы (рис. 3), по-видимому, обусловлено краевой зоной погребенного загрязненного участка.

Результаты изучения верхнего слоя почв в 2012 и 2019 гг. показали низкое содержание радионуклидов в них, за исключением точки 3s, расположенной приблизительно в 80 м к северу от погребенного навала (табл. 1, рис. 3). В почвах точки 3s в 2012 г. выявлены заметные активности ( $\text{Bк/кг}$ ):  $^{137}\text{Cs}$  24.0,  $^{90}\text{Sr}$  18,  $^{239,240}\text{Pu}$  29.0,  $^{238}\text{Pu}$  0.34, что было соответ-



**Рис. 5.** Объемная активность  $^{90}\text{Sr}$  (Бк/дм<sup>3</sup>) в речной воде и поверхностных стоках технологической площадки ПЯВ «Кристалл» в разные годы. Условные обозначения см. рис. 4. Точки отбора проб см. рис. 1–3. Для сравнения приведены региональная фоновая активность  $^{90}\text{Sr}$  в речной воде [29–33], активность  $^{90}\text{Sr}$  в рр. Яна, Колыма, Индигирка, Оленек, Лена [29–31], в рр. Виллой, Марха [34].

ственно в 5.8, 1.6, 76, 3.5 раз выше активности радионуклидов в остальных точках опробования. Здесь же был обнаружен  $^{241}\text{Am}$  с активностью 4.5 Бк/кг. В 2019 г. содержание  $^{90}\text{Sr}$  в верхнем слое почв заметно снизилось: его активность в среднем стала меньше в 3.5 раза и его распределение по точкам стало более равномерным, а  $^{137}\text{Cs}$  вовсе не обнаружен (<2 Бк/кг). В 2019 г. в почве точки 3s изотоп  $^{241}\text{Am}$  также не обнаружен. Суглинистый состав почв, отсутствие сильных ветров в теплое время (при отсутствии снежного покрова) дают основание считать ветровой снос радионуклидов незначительным. Снижение активности  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{241}\text{Am}$  в верхнем слое почв, по нашему мнению, произошло в результате водного смыва радионуклидов за прошедший семилетний период. Конечно, снижение активности радионуклидов также происходит из-за их радиоактивного распада, но поскольку сравниваемый нами временной отрезок в 7 лет существенно короче периодов полураспада рассматриваемых радионуклидов (самый короткий  $T_{1/2}$  у  $^{90}\text{Sr}$  – 28.8 лет), ра-

диоактивный распад изотопов, по нашему мнению, является незначительным фактором.

Выявлено, что активность  $^{239,240}\text{Pu}$  в почвах двух точек из четырех в 2019 г. сохранилась на уровне 2012 г. (табл. 1), и это дает основание заключить, что формы их нахождения, по-видимому, более устойчивы, и изотопы Pu хуже поддаются водному переносу.

Постепенное снижение МЭД на площадке тоже указывает на водный снос радионуклидов из верхнего слоя почв, что хорошо видно на примере узкой полосы относительно повышенных МЭД на северном подножье насыпи: здесь в 2012 г. МЭД составляли 10–11.5 мкР/ч, а в 2019 г. – всего 9–10 мкР/ч.

Итак, на основании результатов изучения почв и радиометрических замеров можно заключить, что, по-видимому, нарушение почвенного покрова при механизированной очистке в 2006 г., усилило эрозию почв и смыв радионуклидов из верхнего слоя почв технологической площадки объекта «Кристалл». Вместе с тем низкие содержания ра-



**Таблица 1.** Удельная активность радионуклидов в почвах площадки объекта «Кристалл» в разные годы по собственным и опубликованным данным, Бк/кг

1993 г. [3]						
Проба	Место отбора 1993 г.	<sup>137</sup> Cs	<sup>90</sup> Sr	<sup>239+240</sup> Pu	<sup>60</sup> Co	<sup>241</sup> Am
Г-8*	Северное подножье навала, в 100 м от знака эпицентра взрыва по азимуту 15°, загрязненный участок (ныне погребено под насыпью)	11200	–	21600	2720	2800
Г-4*	В 60 м к северо-востоку от навала, в 150 м от знака эпицентра взрыва по азимуту 30°, загрязненный участок (ныне погребено под насыпью)	27	–	53	6.5	–
С-29	Технологическая площадка, точное место неизвестно	75	58	–	–	–
С-28	Технологическая площадка, точное место неизвестно	41	51	–	–	–
1999–2002 гг. [13]						
Пробы	Технологическая площадка	–	–	830	–	–
2002 г. [4]						
Пробы	Загрязненный участок к северо-востоку от навала, 4 пробы (ныне погребено под насыпью)	540– 2100	240–800	–	43–400	120–1100
2001–2003 гг. [22]						
Пробы	Около северного подножья насыпи (ныне погребено под насыпью)	1520.6	–	–	–	–
2012 г.*						
1s	Западное подножье навала (насыпи)	3.5	9	0.13	–	–
3s	В 80 м к северу от навала	24.0	18	29.0	–	4.5
4s	В 100 м к северо-востоку от навала	5.8	13	0.76	–	–
5s	Восточное подножье насыпи, примерно в 60 м от навала	3.1	12	0.25	–	–
2019 г.*						
1s	Западное подножье навала (насыпи)	<2.0	5.0	~0.07	–	–
2s	Западное подножье навала (насыпи)	<2.0	4.3	0.08	–	–
3s	В 80 м к северу от навала	<2.0	5.3	25.4	–	–
4s	В 100 м к северо-востоку от навала	<2.0	3.6	~0.03	–	–
5s	Восточное подножье насыпи, примерно в 60 м от навала	<2.0	2.5	0.3	–	–
Критерии ТРАО, Бк/кг		10000	100000	1000	10000	1000

\* Точки отбора показаны на рис. 3.

дионуклидов в верхнем слое почв наряду с мощностью амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения, сравнимого с природным радиационным фоном, дают нам основание говорить об установлении в настоящее время спокойной радиоэкологической обстановки на технологической площадке объекта «Кристалл».

*Радионуклиды в поверхностных стоках технологической площадки объекта «Кристалл»*

Все эти годы глыбово-щебнистая насыпь высотой до 20 м, перекрывающая грунты и почвы, при-

равненные к ТРАО, защищала их от активной эрозии. При сооружении насыпи рассчитывали, что в насыпи и под ней со временем восстановится многолетняя мерзлота за счет подтягивания подошвы сезонно-талого слоя, тем самым появятся условия для долговременной надежной иммобилизации радионуклидов в погребенных грунтах [1, 24, 35]. Но результаты зондирований методом электротомографии показали, что насыпь находится в талом состоянии [11]. Значит, насыпь не могла и не может препятствовать водному переносу радионуклидов из загрязненных грунтов. Кроме того, возможен выход радионуклидов из второго источника – цен-

тральной зоны взрыва по ослабленной зоне вокруг боевой скважины [36].

Известно, что еще в 2002 г. (за шесть лет до начала наших исследований) активность трития и  $^{90}\text{Sr}$  в стоке из-под насыпи составляла 221 и 25.9 Бк/дм<sup>3</sup>, а в рывтине ниже по склону – 26.4 и 4.7 Бк/дм<sup>3</sup> соответственно [2]. Отметим, что эта активность трития ниже уровня вмешательства (УВ) в питьевой воде, равного 7600 Бк/кг, а активность  $^{90}\text{Sr}$  в 20–100 раз ниже минимального значения активности, принятого для жидких РАО, равного 490 Бк/кг.

В стоках, вытекающих во множестве из-под насыпи, нами в 2008 г. и последующие годы выявлено низкое содержание трития и радиостронция. Активность трития в этих стоках была в 280–1900 раз (в среднем в 1190 раз) ниже УВ. Активность  $^{90}\text{Sr}$  в этих стоках в 12–1225 раз (в среднем в 312 раз) ниже УВ радиостронция, равного 4.9 Бк/кг. Таким образом, в настоящее время тритий и  $^{90}\text{Sr}$  в стоках технологической площадки не представляют опасности для населения. Несмотря на концентрирование изотопов Рц из крупнообъемных проб воды по 100 дм<sup>3</sup>, нам не удалось обнаружить их: в поверхностных стоках технологической площадки активности  $^{238,239}\text{Pu}$  и  $^{238}\text{Pu}$  были ниже 10<sup>-6</sup> Бк/дм<sup>3</sup>. Это согласуется с выводом об устойчивой форме нахождения изотопов Рц и их низкой водоподвижности в почвах технологической площадки, полученным на основе изучения проб почв.

Активность трития в поверхностных стоках технологической площадки распределена неравномерно, его максимальные активности в основном наблюдаются в стоках, выходящих из-под юго-западного и северо-западного склонов насыпи. Ниже по течению активность трития в стоках быстро снижается практически до фонового уровня, по-видимому, из-за разбавления: если в 2008 г. в стоке у насыпи была установлена активность 27 Бк/дм<sup>3</sup>, то в ~50 м ниже по склону у края технологической площадки активность трития снизилась до 6.0–12.0 Бк/дм<sup>3</sup>. За все время изучения минимальная активность трития в 4 Бк/дм<sup>3</sup> была установлена в 2012 г. в ручейке около северо-западной оконечности насыпи.

В 2008, 2012, 2018, 2019, 2020 гг. максимальная активность трития в стоках из-под насыпи составила (Бк/дм<sup>3</sup>): 27, 18, 12, 11.9, 6.4 соответственно, т.е. видим неуклонное снижение активности трития. В

период с 2002 до 2008 г. произошло более резкое снижение максимального значения активности трития в стоках технологической площадки. В целом с 2002 до 2020 г. максимальная активность трития в стоках из-под насыпи снизилась почти в 35 раз.

Несмотря на разную выборку проб в разные годы, тенденция снижения активности трития проявилась и в этом усредненном показателе. Средняя активность трития в водных пробах технологической площадки в 2008, 2012, 2018, 2019, 2020 гг. составила (Бк/дм<sup>3</sup>): 10.7 (5 проб), 8.6 (7 проб), 9.2 (2 пробы), 6.1 (13 проб), 6.3 (5 проб) соответственно. Таким образом, в настоящее время активность трития в поверхностных стоках технологической площадки снизилась практически до местного фонового уровня, оцениваемого в 5.8–6.7 Бк/дм<sup>3</sup>.

В поверхностных условиях тритий находится преимущественно в форме тритиевой воды  $^1\text{H}^3\text{HO}$  ( $^3\text{H}_2\text{O}$ ) [37], что обеспечивает его высокую подвижность по сравнению с остальными техногенными радионуклидами. Следует полагать, что в силу этого свойства водный перенос трития за прошедшие годы мог идти с высокой интенсивностью и беспрепятственно, что, по-видимому, за годы, прошедшие после взрыва, уже привело к убыли трития в источнике – в грунтах и почвах, погребенных под насыпью, следовательно, к уменьшению его содержания в стоках из-под насыпи. Помимо этого, активность трития постоянно снижалась в результате естественного радиоактивного распада, поскольку у него довольно короткий период полураспада  $T_{1/2}$  – 12.3 года (почти в три раза короче, чем у  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ). По расчетам, активность трития, появившегося в результате взрыва «Кристалл», из-за распада уже к 1987 г. уменьшилась вдвое, в 2008–2009 гг. осталось около 15%, а к настоящему времени – всего около 7.5% от первоначальной активности трития.

Нами в 2012–2020 гг. в стоках из-под насыпи было выявлено гораздо более низкое содержание  $^{90}\text{Sr}$ , изменяющееся в пределах от 0.004 до 0.4 Бк/дм<sup>3</sup>, что в 12 и более раз ниже уровня вмешательства, принятого для питьевой воды (4.9 Бк/кг) (рис. 5). Активность  $^{90}\text{Sr}$ , равная 0.4 Бк/дм<sup>3</sup>, была определена в 2018 г. в стоке из-под юго-западного склона насыпи, а в 2020 г. здесь же измерена близкая активность в 0.35 Бк/дм<sup>3</sup>, хотя в 2019 г. активность составила всего 0.004 Бк/дм<sup>3</sup> (ниже в 100 раз) (рис. 5). Как уже отмечали, ни один радионуклид, в

т.ч. радиостронций, не может сравниться с тритием по способности мигрировать в поверхностных условиях: следует предполагать, что механизм и формы водного переноса  $^{90}\text{Sr}$  более сложные и зависят от множества факторов, и, как следствие, его концентрации в водных стоках изменяются в более широком диапазоне в разное время отбора.

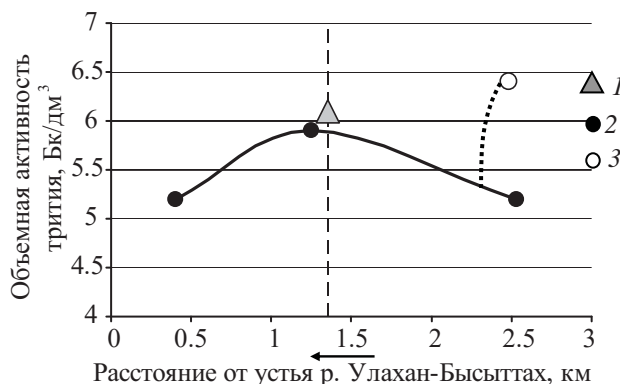
*Влияние поверхностных стоков технологической площадки объекта «Кристалл» на местную речную сеть*

В 2019 г. при средней активности трития  $6.1 \pm 0.9$  Бк/дм<sup>3</sup> в поверхностных стоках технологической площадки активность трития в р. Улахан-Бысыттах рядом с объектом «Кристалл» составила  $5.9 \pm 0.8$  Бк/дм<sup>3</sup> при его одинаковой активности выше и ниже по течению (около устья) в  $5.2 \pm 0.6$  Бк/дм<sup>3</sup> (рис. 6). Следует отметить, за годы изучения не было существенного различия в активности трития в низовье и верховье р. Улахан-Бысыттах, она была практически одинакова (рис. 4). В 2018 г. в р. Улахан-Бысыттах рядом с объектом «Кристалл» активность  $^{90}\text{Sr}$  составила 0.3 Бк/дм<sup>3</sup> под местным влиянием стоков с технологической площадки, в которых активность  $^{90}\text{Sr}$  достигала 0.4 Бк/дм<sup>3</sup>.

По-нашему мнению, в настоящее время ввиду низкого содержания радионуклидов в поверхностных стоках технологической площадки их влияние на р. Улахан-Бысыттах слабое и локального масштаба.

*Распространение радионуклидов в речной воде прилегающей территории*

В 2019 г. активность трития в р. Далдын в 500 м выше устья р. Улахан-Бысыттах составила  $5.9 \pm 0.8$  Бк/дм<sup>3</sup>, а после вливания р. Улахан-Бысыттах на 500 м ниже устья р. Улахан-Бысыттах выросла до  $7.5 \pm 0.9$  Бк/дм<sup>3</sup>. Но откуда это повышение активности трития? Ведь в низовье р. Улахан-Бысыттах активность трития в 2019 г. составляла всего  $5.2 \pm 0.6$  Бк/дм<sup>3</sup>. Тем более, р. Далдын – большая река, главный водоток в районе, и, по нашей оценке, ее расход примерно в 15–20 раз превышает расход ее притока – р. Улахан-Бысыттах. Следовательно, должно было происходить разбавление концентраций, и это слабое повышение активности трития



**Рис. 6.** Средняя объемная активность трития на технологической площадке объекта «Кристалл» (1) и объемная активность трития в р. Улахан-Бысыттах (2) и ее левом притоке в 1.2 км выше по течению от объекта «Кристалл» (3) в 2019 г. (Бк/дм<sup>3</sup>). Штриховой линией показано местоположение объекта «Кристалл», разделяющее реку на ее условные верхнее и нижнее течения. Стрелкой показано направление течения р. Улахан-Бысыттах.

нельзя объяснить вливанием поверхностного стока р. Улахан-Бысыттах.

По нашему мнению, тритий в р. Далдын поступает, по-видимому, не только с поверхностным стоком р. Улахан-Бысыттах, но еще и с подземными стоками из зоны взрыва. С предположением о подземном распространении трития из зоны взрыва (с последующим поступлением в местные водотоки) согласуется активность трития в  $6.4 \pm 0.7$  Бк/дм<sup>3</sup>, обнаруженная в безымянном мелком ручье – притоке р. Улахан-Бысыттах в 1.2 км выше по течению от объекта «Кристалл»: она превышает среднюю активность трития в стоках технологической площадки ( $6.1$  Бк/дм<sup>3</sup>) и в р. Улахан-Бысыттах около своего устья ( $5.2$  Бк/дм<sup>3</sup>) (рис. 6).

В том же 2019 г. в р. Далдын в 10 км ниже устья Улахан-Бысыттах нами была определена активность трития  $8.2$  Бк/дм<sup>3</sup>, а в руч. Полярный – левом притоке р. Далдын –  $7.1$  Бк/дм<sup>3</sup>, что превышает активности трития в р. Улахан-Бысыттах и его безымянном притоке. Эти пики активности трития, по-нашему мнению, указывают на наличие подземных путей распространения трития, приводящие к подобным положительным вариациям его активности в р. Далдын около устья р. Улахан-Бысыттах и ниже по течению.

Местная фоновая точка нами выбрана в верховье р. Далдын примерно в 9 км выше по течению от промзоны г. Удачного и самого города, а также и от объекта «Кристалл», в 500 м выше устья пра-

вого притока – р. Сытыкан. Такое местоположение фоновой точки исключает возможное влияние поверхностных техногенных стоков г. Удачный и объекта «Кристалл» (рис. 2). Лабораторные анализы подтвердили удачный выбор фоновой точки – местная речная вода отличается особой химической чистотой [36]. Вместе с тем местная фоновая активность трития в 2019 г. составила  $6.7 \text{ Бк/дм}^3$ , в другие годы изменялась в пределах от  $5.8$  до  $6.7 \text{ Бк/дм}^3$ , т.е. она оказалась одного порядка, как и в р. Улахан-Бысытта, находящейся под влиянием поверхностных стоков технологической площадки объекта «Кристалл». Местная фоновая активность трития в речной воде примерно в 3 раза превышает региональный фоновый уровень трития в речной воде и атмосферных осадках, оцениваемые в 2020–2021 г. на уровне  $1.71$ – $1.89$  и  $1.81$ – $2.15 \text{ Бк/дм}^3$  соответственно [33, 38] (рис. 4).

Местная фоновая активность  $^{90}\text{Sr}$  в р. Далдын в 2020 г. составила  $0.12 \text{ Бк/дм}^3$ , что в 3 раза ниже активности  $^{90}\text{Sr}$  в стоках технологической площадки, равной  $0.35 \text{ Бк/дм}^3$ , но в 34 раза выше регионального фонового уровня, равного  $0.0035 \text{ Бк/дм}^3$  [33, 38]. В 2018 г. вне зоны влияния поверхностных стоков технологической площадки, а именно в нижнем течении р. Сытыкан определена активность  $^{90}\text{Sr}$  в  $0.2 \text{ Бк/дм}^3$ , превышающая региональный фоновый уровень в 57 раз. Активность  $^{90}\text{Sr}$  в речной воде района изучения колеблется в широком диапазоне значений и часто многократно превышает активность  $^{90}\text{Sr}$  в фоновых реках и других реках Якутии, удаленных от района ПЯВ «Кристалл» (рис. 5). По-нашему мнению, повышенная активность  $^{90}\text{Sr}$  в местной речной воде обусловлена влиянием объекта «Кристалл», но при этом влияние поверхностных стоков технологической площадки имеет локальный характер, т.е. распространение  $^{90}\text{Sr}$  в местной речной воде обусловлено другими процессами.

#### *Различие местного и регионального фонового уровней радионуклидов в речной воде*

За региональный фоновый уровень трития и  $^{90}\text{Sr}$  в речной воде нами принята средняя активность трития на трех мониторинговых гидропостах: в дельте р. Лена (г/п Хабарова), реках Индигирка, Колыма, и средняя активность  $^{90}\text{Sr}$  на пяти мониторинговых гидропостах: в дельте р. Лена (г/п Хабарова),

реках Оленек, Яна, Индигирка, Колыма. За региональный фоновый уровень трития в атмосферных осадках принята средняя объемная активность трития в атмосферных осадках по данным четырех метеостанций (Верхоянск, Оленек, Тикси, Якутск) [26–33, 38–43] (рис. 4). Аналитические работы этих мониторинговых исследований проводили в лаборатории НПО «Тайфун» ФС по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды РФ с высокой достоверностью.

Активности трития в реках Колыма, Индигирка, в дельте р. Лена близки между собой и, например, в 2000 г. составили ( $\text{Бк/дм}^3$ )  $2.6$ ,  $3.2$  и  $2.9$ , в 2014 г. –  $2.0$ ,  $2.3$  и  $2.2$  соответственно [26, 30]. В р. Марха в  $400 \text{ км}$  к юго-востоку от объекта «Кристалл» и р. Вилюй активность трития также соответствует региональному фоновому уровню, в 2016 г. она была даже немного ниже регионального фонового уровня (рис. 4) [34].

В зоне сплошной многолетней мерзлоты питание вышеназванных северных рек Якутии, включая р. Далдын с притоками, главным образом обеспечивается за счет талых вод и атмосферных осадков, доля грунтовых и подземных вод в их питании очень мала. Следовательно, активность трития в фоновой речной воде формируется в основном за счет трития, выпадающего с атмосферными осадками, поскольку тритий в талых водах в целом все тот же атмосферный тритий, выпавший со снегом и накопленный за зиму в снежном покрове (рис. 7). Близость значений активности трития в атмосферных осадках и фоновой речной воде, а также наличие положительной корреляционной связи между этими показателями с коэффициентом  $0.64$  подтверждает заключение, что активность трития в фоновой речной воде Севера Якутии формируется главным образом за счет атмосферного трития (рис. 7).

Фоновое содержание трития в атмосферных осадках на территории России по данным 2011 г. оценивалось в диапазоне  $1.44$ – $3.0 \text{ Бк/дм}^3$  [44]. С данными оценками согласуются мониторинговые данные по метеостанциям Верхоянск, Оленек, Тикси, Якутск: средняя активность трития в атмосферных осадках в 2011 г. составила  $3.02 \text{ Бк/дм}^3$ , со временем она постепенно снизилась до  $1.81 \text{ Бк/дм}^3$  в 2020 г. (рис. 7) [26–33, 38–43]. Между тем, по данным Степанова В.Е. и соавторов, в эти годы ак-

тивность трития в атмосферных осадках г. Якутска изменялась от 1.81 до 18.8 Бк/дм<sup>3</sup> при среднем значении 9.7 Бк/дм<sup>3</sup> [13], что существенно превышает данные мониторинга. Возможно, широкий разброс значений обусловлен весьма коротким временем замера – всего в течение 180 с в 10 подходов для каждой пробы: если бы авторы привели данные воспроизводимости, это улучшило бы понимание их результатов [13]. Вместе с тем, невозможно согласиться с выводом авторов о космогенном происхождении трития с активностью до 18.8 Бк/дм<sup>3</sup> в атмосферных осадках [13].

Доля природного космогенного трития в атмосферных осадках очень мала: до ядерных испытаний его естественное содержание в дождевой воде колебалось от 0.5 до 4 ТЕ, или 0.06–0.48 Бк/дм<sup>3</sup> при ТЕ 0.12 Бк/дм<sup>3</sup> [45] (и не может достигать 18.8 Бк/дм<sup>3</sup>). В настоящее время основную часть трития, циркулирующего в атмосфере–гидросфере, составляют остатки трития, поступившего в период ядерных испытаний и крупных аварий на АЭС, а также определенная доля трития постоянно поступает со сбросами и выбросами штатно работающих объектов атомной промышленности [45]. При отсутствии новых аварийных поступлений содержание трития в атмосфере–гидросфере со временем должно снижаться из-за распада остаточного трития ядерных испытаний и аварийных поступлений, что мы и видим в динамике изменения мониторинговых данных, приведенных на рис. 7: региональная фоновая активность трития в атмосферных осадках Якутии постепенно, но неуклонно снижалась с 3.3–3.4 Бк/дм<sup>3</sup> в 2005–2006 гг. до 1.81–2.15 Бк/дм<sup>3</sup> в 2020–2021 гг. Следом также постепенно снижается региональный фоновый уровень трития в речной воде Якутии. Это показывает, что речная вода формируется в основном за счет атмосферных осадков и талых вод (Бк/дм<sup>3</sup>): в 2006 г. фоновый уровень трития составлял 3.1, в 2012 г. – 2.91, в 2020 г. – уже только 1.89 (рис. 7) [29, 33, 40].

Таким образом, местная фоновая активность трития в речной воде района ПЯВ «Кристалл», равная 5.8–6.7 Бк/дм<sup>3</sup>, примерно в 3 раза превышает региональный фоновый уровень трития в атмосферных осадках и в речной воде (рис. 4). Следовательно, в ней примерно 1/3 трития обеспечивается за счет поступления с атмосферными осадками, а остальные 2/3 части – локального происхождения, которые

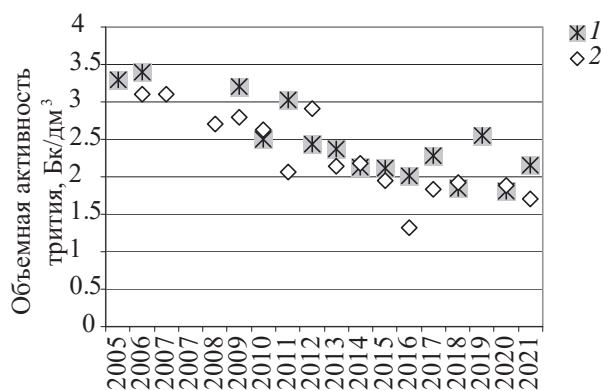


Рис. 7. Региональный фоновый уровень трития (Бк/дм<sup>3</sup>) в атмосферных осадках (1) и в речной воде (2) Республики Саха (Якутия) за последние 15 лет наблюдений, по данным ежегодных отчетов [26–33, 38–43].

мы связываем с влиянием объекта «Кристалл», поскольку других местных источников трития в районе нет (вдали от промышленных центров атомной промышленности).

Обсудим региональный фоновый уровень <sup>90</sup>Sr и его распространение в фоновых реках Якутии, потому что это поможет нам понять особенности распределения <sup>90</sup>Sr в районе объекта ПЯВ «Кристалл». В 2000–2021 гг. региональный фон <sup>90</sup>Sr колебался в пределах от 0.0031 до 0.005 Бк/дм<sup>3</sup> [26–33, 38–43]. Активность <sup>90</sup>Sr в реках Яна, Колыма, Индигирка практически идентична, и в 2014 г. в среднем она составляла 0.0036, 0.0036, 0.0039 Бк/дм<sup>3</sup> [30]. Диапазон активности <sup>90</sup>Sr в р. Лена шире, чем в вышеперечисленных трех реках, и средняя активность <sup>90</sup>Sr в 2014 г. составила 0.0044 Бк/дм<sup>3</sup>. Но от этих фоновых рек сильно отличается р. Оленек – средняя активность <sup>90</sup>Sr в ней почти в 2 раза выше, в том же 2014 г. она составила 0.0088 Бк/дм<sup>3</sup> (в 2012 г. 0.0084, в 2016 г. 0.0133 Бк/дм<sup>3</sup>) (рис. 5).

По нашему мнению, распределение активности <sup>90</sup>Sr в фоновых реках Якутии свидетельствуют о том, что его основным источником являются ландшафты, ставшие депонирующей средой глобальных выпадений, откуда <sup>90</sup>Sr доставляется за счет площадного смыва. Радиостронций не может циркулировать беспрепятственно в системе гидросфера–атмосфера, как тритий, поскольку в первую очередь на него действует испарительный барьер. За период, когда не проводятся ядерные испытания и нет аварийных выбросов, запасы <sup>90</sup>Sr в атмосфере иссякли и можно считать, что в настоящее время он

с атмосферными осадками не выпадает. Вместе с тем, при глобальных выпадениях во время ядерных испытаний и аварийных поступлений радионуклидов в атмосферу почвенно-растительный покров стал накопителем долгоживущих радионуклидов, в том числе  $^{90}\text{Sr}$ , откуда радиостронций смывается постепенно и поступает в водотоки. Реки Яна, Колыма, Индигирка расположены близко друг от друга и в стороне от испытательных полигонов, поэтому мы и наблюдаем в них практически идентичную активность  $^{90}\text{Sr}$ . Большая протяженность и обширная площадь питания р. Лены обуславливают, по-видимому, более широкий диапазон активности  $^{90}\text{Sr}$ , но ее значения тоже в целом близки к активности  $^{90}\text{Sr}$  в реках Яна, Колыма, Индигирка (рис. 5).

А р. Оленек расположена близко к Новоземельскому испытательному полигону. Согласно доминирующим ветрам, бассейн р. Оленек, по нашему предположению, чаще оказывался на пути движения радиоактивных облаков при ядерных испытаниях на полигоне, и плотность выпадений в пределах бассейна р. Оленек, по-видимому, был существенно выше; следовательно, площадной смыв  $^{90}\text{Sr}$  с ландшафтов и формируемая им активность в р. Оленек выше, чем в вышеназванных реках. По нашему мнению, р. Оленек необходимо было исключить из расчетов средней фоновой активности  $^{90}\text{Sr}$  в речной воде Якутии (из расчетов регионального фонового уровня).

Дополнительно нами рассмотрены активность  $^{90}\text{Sr}$  в р. Вилюй и его притоке р. Марха. В р. Вилюй выше устья р. Марха активность  $^{90}\text{Sr}$  в 2012 г. составила 0.005, в 2016 г. – 0.0039 Бк/дм<sup>3</sup>, что в целом соответствует региональному фоновому уровню [34]. В р. Марха ниже устья р. Далдын активность  $^{90}\text{Sr}$  в 2012 г. была немного выше регионального фонового уровня и составила 0.0064 Бк/дм<sup>3</sup>, что, по мнению авторов, обусловлено влиянием стоков из зон взрывов «Кристалл» и «Кратон-3», расположенных в бассейне р. Марха и его притока р. Далдын выше по течению от места исследований [34].

#### *Основные пути распространения радионуклидов в речной воде района ПЯВ «Кристалл»*

Каким образом формируется активность трития и  $^{90}\text{Sr}$  в местных водотоках, превышающая регио-

нальный фоновый уровень в речной воде? Каковы основные пути их распространения?

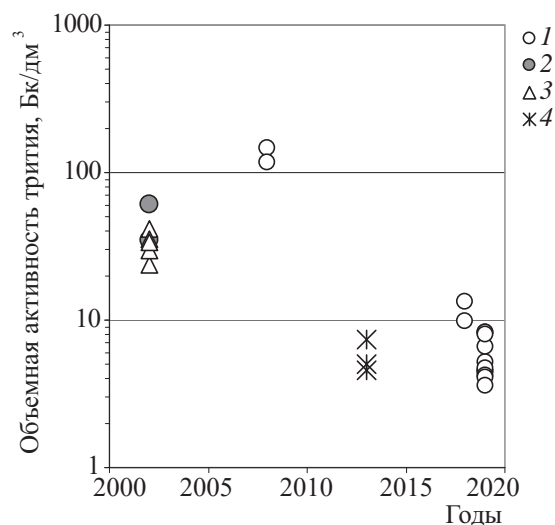
Вначале рассмотрим тритий, отличающийся безбарьерной способностью к водной миграции. В первую очередь можно предположить, что источником трития до сих пор являются местные ландшафты, аккумулировавшие его по пути движения радиоактивного облака в день взрыва. Известно, что радиоактивное облако шириной 400 м, оконтуренное по изолинии МЭД 0.5 Р/ч (по состоянию через 24 ч после взрыва), двигалось вначале по азимуту 70°, затем развернулось на север, и оно было прослежено на расстоянии до 12 км [1, 24]. Следовательно, главной депонирующей средой выпадений могли стать таежные ландшафты по левому борту р. Улахан-Бысыттах – вверх по реке от объекта «Кристалл». Но, согласно результатам наших исследований, для верховья р. Улахан-Бысыттах нехарактерно существенное повышение активности трития, установлено локальное повышение активности трития в безымянном мелком ручье в 1.2 км выше по течению от объекта «Кристалл» (рис. 6). В настоящее время тритий в местных водотоках распределен с небольшими вариациями, но в целом довольно равномерно, независимо от положения точки отбора относительно технологической площадки объекта «Кристалл» и предполагаемого пути следования радиоактивного облака (рис. 4). Значит, в настоящее время нет значимого сноса трития с таежных ландшафтов бассейна р. Улахан-Бысыттах. Известно, что из радиоактивного облака сперва выпадают тяжелые и крупные частицы [1], а легкому тритию в виде паров  $^1\text{H}^3\text{HO}$ , по нашему мнению, свойственна дальняя миграция и рассеяние в атмосфере. Выпадения трития, по-видимому, были весьма незначительными, и к настоящему времени они практически исчезли вследствие радиоактивного распада и интенсивного смыва трития с поверхности ландшафтов за прошедший период со времени взрыва.

Что касается  $^{90}\text{Sr}$ , его водный смыв с местных ландшафтов в речную систему, по-нашему мнению, продолжается, и он может быть существенным даже в настоящее время по аналогии с бассейном р. Оленек. К сожалению, ограниченный объем дан-

ных нам пока не дает возможности оценить вклад площадного смыва  $^{90}\text{Sr}$  с местных ландшафтов, особенно в пределах бассейна р. Улахан-Бысытта, в общую активность  $^{90}\text{Sr}$  в местной речной воде.

Между тем, в геологической среде района развита сложная система тектонических разломов (рис. 2), есть талики под крупными водотоками, как р. Далдын (данные Климовского и Готовцева, 1994 г.). С применением зондирования методом электротомографии выявлено, что в окрестностях объекта «Кристалл» многолетняя мерзлота претерпела локальную деградацию [11]. Для геологической среды района характерна сложная система подземных водоносных горизонтов, насыщенная субнапорными межмерзлотными водами и напорными криопэгами и подмерзлотными подземными рассолами [46].

Как отмечали выше, вариации активности трития в ручье-притоке р. Улахан-Бысытта, также в р. Далдын около устья р. Улахан-Бысытта можно объяснить влиянием подземных стоков из зоны взрыва. Активность трития в  $6.7 \text{ Бк/дм}^3$  на местной фоновой точке в  $\sim 9 \text{ км}$  выше по течению от объекта «Кристалл», сравнимую со средней активностью трития ( $6.1 \text{ Бк/дм}^3$ ) в стоках технологической площадки, можно объяснить только распространением трития с подземными водами и последующим поступлением в поверхностный водоток. В подземных рассолах, поступающих в карьер (и в рудник) кимберлитовой трубки «Удачная», расположенный в  $4 \text{ км}$  от объекта «Кристалл», впервые был выявлен тритий в количестве  $61$  и  $41.8 \text{ Бк/дм}^3$  в 2002 г. двумя независимыми московскими лабораториями [2, 12] (рис. 8). В подземных рассолах карьера и гидрогеологических скважинах рядом с карьером в 2002 г. также был обнаружен  $^{90}\text{Sr}$  с активностью  $1.6\text{--}18.8$  и  $5.7\text{--}8.5 \text{ Бк/дм}^3$  [2]. Этот факт подкрепляет нашу точку зрения о подземном пути распространения радионуклидов в местной геологической среде. В подземных рассолах, поступающих в карьер и рудник, нами также были выявлены эти радионуклиды: активность трития в 2008 г. составила  $146$  и  $117$ , в 2018 г. –  $9.9\text{--}13.4$ , в 2019 г. –  $3.6\text{--}8.2 \text{ Бк/дм}^3$ ; активность  $^{90}\text{Sr}$  в 2008 г. составила  $0.14\text{--}1.47$ , в 2012 г. –  $0.37\text{--}3.9$ , в 2018 г. –  $0.1\text{--}0.2 \text{ Бк/дм}^3$  (рис. 8) (вопрос о содержании радионуклидов в подземных рассолах района нами более подробно будет обсуждаться в отдельной статье). Как видим, по сравнению с 2002–2008 гг. в настоящее время активность трития



**Рис. 8.** Объемная активность трития в подземных рассолах, поступающих в карьер и рудник кимберлитовой трубки «Удачная» в разные годы,  $\text{Бк/дм}^3$ . Условные знаки: 1 – наши данные, 2 – данные Касаткина В.А. [12], 3 – данные Голубова Б.Н. [2], 4 – данные Степанова В.Е. [13].

в подземных рассолах, поступающих в рудник трубки «Удачная», значительно уменьшилась: по-видимому, интенсивность распространения трития из зоны взрыва по естественным водопроницаемым структурам в геологической среде со временем ослабевает. По нашему мнению, это может быть из-за его естественного радиоактивного распада. Наши данные 2012 и 2018 гг. согласуются с опубликованными данными 2013 г. [13]. В подземных рассолах также видна тенденция снижения активности  $^{90}\text{Sr}$ , но, по-видимому, более медленного, чем у трития.

Подземные рассолы, содержащие радионуклиды в той или иной мере, постоянно откачивали из карьера (и рудника) с последующим размещением путем закачки через нагнетательные скважины в межмерзлотные пласты на специально отведенных трех водораздельных участках (рис. 2). Вблизи участка закачки Октябрьский: в двух искусственных водоемах в 2012 г. и в нижнем течении р. Сытыкан в 2018 г. нами обнаружена активность трития, равная  $10$ ,  $15$  и  $9.6 \text{ Бк/дм}^3$  соответственно, что превышало среднюю активность трития в поверхностных стоках технологической площадки, равную  $8.6$  в 2012 г. и  $6.9 \text{ Бк/дм}^3$  в 2018 г. Активность радиостронция в обоих водоемах в 2012 г. составила по  $0.02 \text{ Бк/дм}^3$ , а в р. Сытыкан в 2018 г. –  $0.2 \text{ Бк/дм}^3$ . Известно, что высокоминерализованные подземные рассолы, закачанные в многолетнемерзлые породы, образуют

линзы растущих таликов, «разъедая» лед во вмещающих мерзлых породах [47]. По нашему мнению, развитие этих техногенных таликов способствует распространению не только самих захороненных рассолов, но и радионуклидов, содержащихся в них. По-видимому, повышенные активности трития и  $^{90}\text{Sr}$  в водоемах и в р. Сытыкан (рис. 2) обусловлены вероятнее всего поступлением радионуклидов из подземных рассолов, захороненных на участке Октябрьский, нежели их переносом из зоны взрыва, расположенной в ~10 км от точек отбора проб. Постепенное медленное просачивание трития и  $^{90}\text{Sr}$  с подземными водами (рассолами), в т.ч. с захороненными в межмерзлотные пласты рассолами, может обеспечивать присутствие радионуклидов в местных водотоках, формируя их общий уровень в местной речной воде, превышающий региональный фоновый уровень.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Грунты и почвы на эпицентре взрыва «Кристалл», погребенные под глыбово-щебнистой насыпью, остаются потенциальными источниками для водной миграции радионуклидов. Механизированная очистка растительного покрова вокруг насыпи в 2006 г. нарушила почвенный покров, что усилило не только деградацию многолетней мерзлоты, но и, по-видимому, эрозию почв и водную миграцию радионуклидов: в верхнем слое почв по данным 2019 г. содержание  $^{137}\text{Cs}$  стало меньше 2 Бк/кг, а содержание  $^{90}\text{Sr}$  составило от 2.5 до 5.3 Бк/кг. На основании того, что в верхнем слое почв содержание  $^{239,240}\text{Pu}$  практически не изменилось за период с 2012 по 2019 г. и в 2019 г. составило 0.3–25.4 Бк/кг и что изотопы  $^{239,240}\text{Pu}$  в поверхностных стоках технологической площадки не обнаружены ( $<10^{-6}$  Бк/дм<sup>3</sup>), нами сделан вывод об устойчивой форме нахождения  $^{239,240}\text{Pu}$  в грунтах и почвах и их низкой водоподвижности.

В поверхностных стоках технологической площадки активность трития со временем неуклонно уменьшается, в них в настоящее время содержание радионуклидов низкое:  $^3\text{H}$  не более 12,  $^{90}\text{Sr}$  не более 0.4 Бк/дм<sup>3</sup>, а изотопы  $^{239,240}\text{Pu}$  не обнаружены ( $<10^{-6}$  Бк/дм<sup>3</sup>). На основании этого сделан вывод об их слабом и локальном влиянии на реки Улахан-

Бысытгах и Далдын. Данные изучения местной речной воды подтвердили этот вывод.

Местный фоновый уровень  $^3\text{H}$  в речной воде в 3 раза превышает региональный фоновый уровень. До 1/3 трития в местной речной воде обусловлено поступлением трития из атмосферных осадков, а источником остального трития, распространяющегося в настоящее время в основном подземным путем, является объект «Кристалл».

Местный фоновый уровень  $^{90}\text{Sr}$  в речной воде до 34 раз превышает региональный фоновый уровень. Содержание  $^{90}\text{Sr}$  в местной речной воде распределено неравномерно, оно обусловлено смывом радионуклида с поверхности местных ландшафтов и поступлением с подземными рассолами. Обнаружение трития и  $^{90}\text{Sr}$  в подземных рассолах, поступающих в карьер и рудник кимберлитовой трубки «Удачная», подкрепляет вывод о подземном пути распространения радионуклидов. Закачка дренажных рассолов в межмерзлотные пласты на водораздельных участках могла способствовать их более широкому распространению.

Необходимо подчеркнуть, что в настоящее время все измеренные в поверхностной воде активности трития в 280–1900,  $^{90}\text{Sr}$  – в 12–1200 раз ниже уровня вмешательства для питьевой воды и не представляют опасности для населения и работников горнодобывающих компаний. Вариации активности радионуклидов в местной речной воде представляют интерес только в научном плане для анализа геоэкологической обстановки в районе объекта «Кристалл».

Вместе с тем, нужно подчеркнуть, что почвенно-растительный материал, собранный при очистке в 2006 г. и складированный за пределами технологической площадки, в полной мере еще не изучен и радиоэкологические последствия подобного складирования требуют отдельной оценки.

### ВКЛАД АВТОРОВ

Постановка задачи, организация исследований, полевые работы, литературный обзор, написание статьи, подготовка рисунков, выводы – Артамонова С.Ю., проведение аналитических работ, участие в написании раздела «Методы и материалы», обсуждение статьи – Бондарева Л.Г., Мельгунов М.С., Симонова Г.В.



## БЛАГОДАРНОСТИ

Аналитические работы проведены в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН при ИГМ СО РАН (г. Новосибирск), в ТомЦКП СО РАН (г. Томск), АЦ СФУ (г. Красноярск).

## ФОНДОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН (№122041400237-8, №122041400193-7) и при поддержке гранта РФФИ № 18-45-140020 «Особенности ядерного техногенеза на примере объекта мирного подземного ядерного взрыва «Кристалл»» (рук. Артамонова С.Ю.), 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.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мирные ядерные взрывы: обеспечение общей и радиационной безопасности при их проведении / кол. авторов под рук. проф. В.А. Логачева. М.: ИздАТ, 2001. 512 с.
2. Голубов Б.Н., Сапожников Ю.А., Горальчук А.В. // Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия): Матер. II Республиканской научно-практической конф. Якутск, 2004 г. Якутск: Изд-во СО РАН, 2004. С. 182–192. <https://disk.yandex.ru/i/gVqGQduEF081cw>, дата обращения 14.01.2023)
3. Бурцев И.С., Колодезникова Е.Н. Радиационная обстановка в алмазонасных районах Якутии. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1997. 52 с. (<https://yadi.sk/i/Kmp2f2-scGdTLw>, дата обращения 14.01.2023)
4. Рамзаев В.П., Голиков В.Ю., Мишин А.С., Травникова И.Г., Кадука М.В., Кравцова О.С., Брук Г.Я., Кайдановский Г.Н., Басалаева Л.А., Гедеонов А.Д., Булатенков Ю.В., Петровский В.В., Королева Т.М., Странд П., Браун Дж. // Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия): Матер. II Республиканской научно-практической конф. Якутск, 2004 г. Якутск: Изд-во СО РАН, 2004. С. 123–133.
5. Чевычелов А.П., Собакин П.И., Молчанова И.В. // Почвоведение. 2006. № 12. С. 1512–1519.
6. Gedeonov A.D., Petrov E.R., Kuleshova I.N., Savopulo M.L., Shkroev V.Yu., Alexeev V.G., Arkhipov V.I., Burtsev I.S. // J. Environ. Rad. 2002. Vol. 60, N 1–2. P. 221–234.
7. Рамзаев В.П., Травникова И.Г., Басалаева Л.Н., Брук Г.Я., Голиков В.Ю., Мишин А.С., Браун Дж.Е., Странд П. // Радиационная гигиена. 2008. Т. 1, № 2. С. 14–19.
8. Артамонова С.Ю., Бондарева Л.Г., Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О. // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2012. № 2. С. 143–158.
9. Артамонова С.Ю., Шейн А.Н., Потапов В.В., Кожевников Н.О., Новикова П.Н., Ушницкий В.Е. // Изв. Томского политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331, № 12. С. 158–172.
10. Потапов В.В., Антонов Е.Ю., Шейн А.Н., Артамонова С.Ю., Кожевников Н.О. // 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 г. Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН, 2020. С. 556–564.
11. Artamonova S., Shein A., Potapov V., Kozhevnikov N., Ushnitsky V. // Energies. 2022. Vol. 15, N 1. Article 301.
12. Касаткин В.В., Ильичев В.А., Мясников К.В., Клишин В.И., Мамонов Б.П. // Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия): Матер. II Республиканской научно-практической конф. Якутск, 2004 г. Якутск: Изд-во СО РАН, 2004. С. 82–100.
13. Степанов В.Е., Игнатьева Г.А., Осипов В.Ю., Далбаева Е.А. // Радиохимия. 2017. Т. 59, № 3. С. 285–288.
14. Артамонова С.Ю. // Астраханский вестник экологического образования. 2019. № 4 (52). С. 4–13.
15. Бондарева Л.Г., Помозова Н.В. // Журн. Сиб. федер. ун-та. Сер.: Химия. 2009. Т. 2, № 1. С. 56–60.
16. Bondareva L., Schultz M.K. // Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 2015. Vol. 22, N 22. P. 18127–18136.
17. МИ – Методика измерений удельной активности стронция-90 ( $^{90}\text{Sr}$ ) в пробах почв, грунтов, донных отложений и горных пород бета-радиометрическим методом с радиохимической подготовкой. Номер в Федеральном реестре ФР.1.40.2013.15383, Свидетельство об аттестации 40181.3Г175/01.00294-2010.
18. МИ – Методика измерений объемной активности стронция-90 ( $^{90}\text{Sr}$ ) 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.
19. МИ – Методика измерений объемной активности изотопов плутония ( $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ) 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.
  20. МИ – Методика измерений удельной активности изотопов плутония ( $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ) в пробах почв, грунтов, донных отложений и горных пород альфа-спектрометрическим методом с радиохимической подготовкой. Номер в Федеральном реестре ФР.1.40.2013.15395, Свидетельство об аттестации 40181.3Г186/01.00294-2010.
  21. *Melgunov M.S., Gavshin V.M., Sukhorukov F.V., Kalugin I.A., Bobrov V.A.* // Chem. Sustain. Develop. 2003. Vol. 11, N 6. P. 859–870.
  22. *Афанасьев В.В., Мордосов И.И., Степанов В.Е., Колодезников В.Е.* // Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия): Матер. II Республиканской научно-практической конф. Якутск, 2004 г. Якутск: Изд-во СО РАН, 2004. С. 223–231.
  23. *Собакин П.И., Чевычелов А.П., Ушницкий В.Е.* // Радиационная биология. Радиоэкология. 2004. Т. 44, № 3. С. 283–288.
  24. *Киселев В.В., Бурцев И.С.* Ликвидация последствий аварийных подземных ядерных взрывов в зоне многолетней мерзлоты. Якутск: Изд-во ЯНУ СО РАН, 1999. 148 с. <https://disk.yandex.ru/i/J0PHqSdWs0woag>, дата обращения 14.01.2023
  25. *Мясников К.В., Касаткин В.В., Ильичев В.А., Ахунов В.Д.* // Труды Междунар. конф. «Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях». М., 24–26 апреля 2000 г. СПб.: Гидрометеоздат, 2000. С. 35.
  26. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2000 году. Якутск, 2001. 104 с. ([https://disk.yandex.ru/d/Ik\\_Hr38ksgWZHQ](https://disk.yandex.ru/d/Ik_Hr38ksgWZHQ), дата обращения 15.01.2023)
  27. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2002 году. Якутск, 2003. 43 с. ([https://disk.yandex.ru/d/Ik\\_Hr38ksgWZHQ](https://disk.yandex.ru/d/Ik_Hr38ksgWZHQ), дата обращения 15.01.2023)
  28. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2008 году Якутск, 2009. 254 с. ([https://disk.yandex.ru/d/Ik\\_Hr38ksgWZHQ](https://disk.yandex.ru/d/Ik_Hr38ksgWZHQ), дата обращения 14.01.2023)
  29. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2012 году. Якутск, 2013. 301 с. (<https://minpriroda.sakha.gov.ru/doklady-o-sostojanii-okruzhajuschej-sredy>, дата обращения 14.01.2023)
  30. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2014 году. Якутск, 2015. 444 с. (<https://minpriroda.sakha.gov.ru/doklady-o-sostojanii-okruzhajuschej-sredy>, дата обращения 14.01.2023)
  31. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2016 году. Якутск, 2017. 631 с. (<https://minpriroda.sakha.gov.ru/doklady-o-sostojanii-okruzhajuschej-sredy>, дата обращения 14.01.2023)
  32. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2018 году. Якутск, 2019. 669 с. (<https://minpriroda.sakha.gov.ru/doklady-o-sostojanii-okruzhajuschej-sredy>, дата обращения 14.01.2023)
  33. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2020 году. Якутск, 2021. 677 с. (<https://minpriroda.sakha.gov.ru/doklady-o-sostojanii-okruzhajuschej-sredy>, дата обращения 14.01.2023)
  34. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2016 г.: ежегодник ФГБУ НПО «Тайфун». Обнинск, 2017. 398 с. ([https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/130/ezhegodnik\\_ro\\_2016.pdf](https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/130/ezhegodnik_ro_2016.pdf), дата обращения 14.01.2023)
  35. *Лобанов В.В., Мищенко Ю.В., Целлер Е.В.* // Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия): Матер. II Республиканской научно-практической конф. Якутск, 2004 г. Якутск: Изд-во СО РАН, 2004. С. 100–107.
  36. *Артамонова С.Ю., Ушницкий В.Е., Троицкий Д.Ю., Шуваева О.В., Полякова Е.В.* // 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 г. Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН, 2020. С. 298–310. (<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44165954>, дата обращения 14.01.2023)
  37. *Рихванов Л.П.* Радиоактивные элементы в окружающей среде и проблемы радиоэкологии: учебное пособие. Томск: СГТУ, 2009. 430 с.
  38. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2021 году. Якутск, 2022. 776 с. (<https://minpriroda.sakha.gov.ru/doklady-o-sostojanii-okruzhajuschej-sredy>, дата обращения 14.01.2023)

39. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2005 году. Якутск, 2006. 164 с. ([https://disk.yandex.ru/d/Ik\\_Hr38ksgWZHQ](https://disk.yandex.ru/d/Ik_Hr38ksgWZHQ), дата обращения 15.01.2023)
40. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2006 году. Якутск, 2007. 358 с. ([https://disk.yandex.ru/d/Ik\\_Hr38ksgWZHQ](https://disk.yandex.ru/d/Ik_Hr38ksgWZHQ), дата обращения 15.01.2023)
41. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2007 году. Якутск, 2008. 209 с. ([https://disk.yandex.ru/d/Ik\\_Hr38ksgWZHQ](https://disk.yandex.ru/d/Ik_Hr38ksgWZHQ), дата обращения 15.01.2023)
42. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2013 году. Якутск, 2014. 329 с. (<https://minpriroda.sakha.gov.ru/doklady-o-sostojanii-okruzhajuschej-sredy>, дата обращения 14.01.2023)
43. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2019 году. Якутск, 2020. 678 с. (<https://minpriroda.sakha.gov.ru/doklady-o-sostojanii-okruzhajuschej-sredy>, дата обращения 14.01.2023)
44. Поляков В.А., Пятницкий Н.В. // Разведка и охрана недр. 2011. № 8. С. 39–44.
45. Ливанцова С.Ю., Снакин В.В. // Жизнь Земли. 2014. Т. 35–36. С. 261–269.
46. Алексеев С.В. Криогидрогеологические системы Якутской алмазоносной провинции. Новосибирск: Гео, 2009. 319 с.
47. Дроздов А.В. Природные и техноприродные резервуары промышленных стоков в криолитозоне (на примере Якутской части Сибирской платформы). Якутск: СВФУ, 2011. 416 с.

## 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<sup>a,\*</sup>, L. G. Bondareva<sup>b</sup>, M. S. Melgunov<sup>a</sup>,  
G. V. Simonova<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS,  
Novosibirsk, 630090 Russia

<sup>b</sup> Erissman Federal Scientific Center for Hygiene, Mytishchi, Moscow oblast, 141014 Russia

<sup>c</sup> Insitute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, 634055 Russia  
\*e-mail: artam@igm.nsc.ru

Received: March 22, 2023, accepted April 21, 2023, accepted April 28, 2023

The radioecological situation at the site of the peaceful underground nuclear explosion «Crystal» after removal land cover and installation of the artificial cover of rock from nearby quarry above the epicenter is considered. In 2012 the ambient dose equivalent rate of gamma radiation varied from 0.04 to 0.066  $\mu\text{Sv/h}$ , in 2019 the content of radionuclides in soils was (Bq/kg):  $^{90}\text{Sr}$  2.5–5.3,  $^{239,240}\text{Pu}$  0.03–25.4,  $^{137}\text{Cs}$  <2.0. In 2018–2020 the activity of radionuclides in surface water was (Bq/dm<sup>3</sup>): in runoff from under the artificial cover  $^3\text{H}$  4–12,  $^{90}\text{Sr}$  0.004–0.4,  $^{239,240}\text{Pu}$  <10<sup>-6</sup>, in local river water  $^3\text{H}$  4–10.2,  $^{90}\text{Sr}$  0.004–0.3. At present, the impact of surface runoff from the «Crystal» site on the river network is assessed as insignificant. No more than 1/3 of  $^3\text{H}$  in the local river water comes with precipitation, and the rest of  $^3\text{H}$  comes from the «Crystal» explosion zone, mainly by an underground route. At least 91–96% of  $^{90}\text{Sr}$  in the local river water is due to the «Crystal» explosion: part of it comes from the explosion zone by an underground route, part is washed off from the surface of landscapes.

**Keywords:** surface waters, underground brines, underground nuclear explosion, special radioactive waste, geological environment, radionuclides, tritium, radiostromium, Yakutia