

Содержание трития в водных объектах в районах проведения мирных ядерных взрывов

В.С. Репин, К.В. Варфоломеева, А.М. Библин, С.А. Зеленцова, К.А. Седнев, Г.В. Архангельская
Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора
П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия
человека, Санкт-Петербург, Россия

Места проведения мирных ядерных взрывов представляют потенциальную опасность для радиационной обстановки на территориях субъектов Российской Федерации, которая заключается в возможном выносе радиоактивности из полости взрыва в водоносные горизонты и на земную поверхность. В связи с этим важно осуществлять периодический контроль содержания техногенных радионуклидов в источниках питьевого водоснабжения населенных пунктов на территориях, прилегающих к местам проведения мирных ядерных взрывов. Предвестником возможного выноса техногенных радионуклидов является тритий. Наблюдение за его содержанием в водных объектах в районах проведения мирных ядерных взрывов и сопоставление с данными Росгидромета по Российской Федерации в целом позволяет выявить, насколько надежными являются инженерные барьеры между центральной зоной взрыва и окружающей средой с точки зрения выноса радионуклидов в водоносные горизонты. Одним из вариантов оценки надежности барьеров является оценка удельной активности трития в источниках питьевого водоснабжения. В статье представлены результаты исследования 220 проб воды, отобранных из источников питьевого водоснабжения (колодцы, скважины, родники, центральное водоснабжение) и поверхностных вод, располагающихся в границах 167 населенных пунктов 17 субъектов Российской Федерации, на территории которых в период с 1965 по 1988 год было произведено 50 мирных ядерных взрывов. Пробы были отобраны в период с мая по сентябрь 2024 года в населенных пунктах, находящихся в радиусе 30 км от мест проведения мирных ядерных взрывов. Измерения удельной активности трития проводили с помощью радиометра альфа-бета-излучения спектрометрического Quantulus 1220-003. В результате проведенных исследований выявлено, что удельная активность трития в подземных источниках водоснабжения статистически значимо (критерий Стьюдента $p < 0.05$) ниже, чем в поверхностных. Средние уровни удельной активности трития в скважинах, реках и озерах составляют 3,0; 3,45 и 4,31 Бк/кг соответственно. Удельная активность трития в источниках питьевого водоснабжения в районах проведения мирных ядерных взрывов находятся на уровне фоновых значений, регистрируемых Росгидрометом (от 1,1 до 5 Бк/кг).

Ключевые слова: мирные ядерные взрывы, тритий, удельная активность, источники питьевого водоснабжения, населенные пункты, субъекты Российской Федерации.

Tritium content in water bodies in regions of peaceful nuclear explosions

Victor S. Repin, Kseniya V. Varfolomeeva, Artem M. Biblin, Svetlana A. Zelentsova,
Konstantin A. Sednev, Genrietta V. Arkhangelskaya

Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance of Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

Sites of peaceful nuclear explosions pose a potential radiation hazard to the territories of the Russian Federation, primarily due to the possible release of radioactivity from the explosion cavity into aquifers and onto the earth's surface. Therefore, it is essential to conduct regular monitoring of anthropogenic radionuclides in drinking water sources in settlements located near the sites of peaceful nuclear explosions. Tritium serves as an indicator of the potential release of other anthropogenic radionuclides. Monitoring its levels in water bodies in regions where peaceful nuclear explosions were performed, and comparing this data with that from Roshydromet across the Russian Federation, allows for an assessment of the reliability of the engineering barriers between the central explosion zone and the environment with respect to preventing radionuclide migration into aquifers. One method for evaluating the reliability of these barriers is the

Репин Виктор Степанович

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева
Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: v.repin@mail.ru

Viktor S. Repin

Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev

Address for correspondence: Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: V.Repin@mail.ru

assessment of tritium specific activity in drinking water sources. This article presents results of the study involving 220 water samples collected from drinking water sources (wells, boreholes, springs, central water supply systems) and surface waters within 167 settlements across 17 subjects of the Russian Federation, where 50 peaceful nuclear explosions were conducted between 1965 and 1988. The samples were collected between May and September 2024 in the settlements within a 30 km radius of a peaceful nuclear explosion site. Measurements of tritium specific activity were performed using the Quantulus 1220-003 alpha-beta spectrometric radiometer. The research revealed that the specific activity of tritium in underground water sources is significantly lower (Student's test $p < 0,05$) than in surface waters. The average specific activity levels of tritium in boreholes, rivers, and lakes were 3.0, 3.45, and 4.31 Bq/kg, respectively. The specific activity of tritium in drinking water sources within the regions of peaceful nuclear explosions was found to be at the background levels recorded by Roshydromet, ranging from 1.1 to 5 Bq/kg.

Key words: *peaceful nuclear explosions, tritium, specific activity, drinking water sources, settlements, subjects of the Russian Federation.*

Введение

В процессе реализации государственной Программы № 7 «Ядерные взрывы для народного хозяйства» на территории СССР было произведено 124 подземных ядерных взрывов. Места проведения 82 взрывов находятся на территории 19 субъектов Российской Федерации [1].

Центральные зоны (далее – ЦЗВ) мирных ядерных взрывов (далее – МЯВ) представляют собой участки недр, подвергшиеся механическому, термическому и радиационному воздействию, в которых остатки делящихся материалов ядерного заряда, долгоживущие осколки деления и активированные материалы конструкций перемешаны с тысячами тонн расплавленного грунта. Единственным защитным барьером от миграции радионуклидов из линзы расплава во внешнюю среду служат горные породы [2-6]. В связи с тем, что ЦЗВ не окружена защитными барьерами, наличие напорных вод в сочетании со старением и разрушением технологических скважин и связанных с ними конструкций является предпосылкой переноса радионуклидов, которые сохраняют потенциальную опасность в течение многих сотен лет, в водоносные горизонты и на земную поверхность с напорными подземными водами по трещиноватым зонам тектонических разломов вокруг ЦЗВ [7-10].

По степени радиационной опасности все территории объектов мирных ядерных взрывов условно разделяют на три группы:

1 – объекты МЯВ, на территории которых наблюдается выход радионуклидов на земную поверхность (Тайга, Кристалл, Глобус-1, -2, -3, -4, Кама-2, Кратон-3, Буган, Гелий, Грифон, Днепр, Вера);

2 – объекты МЯВ, в которых выход радионуклидов возможен вследствие того, что их ЦЗВ находятся под воздействием напорных водоносных горизонтов (Кварц-3, Кимберлит-1, Рубин-2, Рифт-1, Горизонт-2);

3 – объекты МЯВ, расположенные в зоне действующей или планируемой разработки недр [2].

Тритий характеризуется высокой миграционной способностью [2, 8] и легко попадает в поверхностные воды через трещиноватости полости очага взрыва [9, 11]. Поступление других техногенных радионуклидов из очагов подземных ядерных взрывов в окружающую среду происходит в процессе выщелачивания, то есть перехода из твердой фазы в жидкую. На поверхности ^3H находится преимущественно в форме тритиевой воды ТХО [12], однако на ряде участков ядерных взрывов отмечено наличие трития и в газовой фазе в соотношении газовой и водной фракции 5:2 [13].

В связи с тем, что активность ^3H даже на удалении от эпицентров взрыва на десятки километров пребывает в измеримых количествах, он является оптимальным индикатором изучения процесса миграции техногенных радио-

Introduction

In the implementation of the State Program No. 7 "Nuclear Explosions for the National Economy," 82 underground nuclear explosions were conducted on the territory of the Russian Federation across 19 regions [1].

The Central Zones of the Peaceful Nuclear Explosions (PNEs) are areas of the Earth's crust that have undergone significant mechanical, thermal, and radiological impacts. As a result of these explosions, remnants of fissile materials from the nuclear charge, long-lived fission products, and activated materials from the constructions are mixed with thousands of tons of molten rock. The primary barrier preventing the migration of radionuclides from the melt pool into the environment is the surrounding rock formations [2-6]. However, the presence of artesian waters, coupled with the aging and degradation of technological wells and associated structures, constitutes a risk for the transfer of radionuclides, which can remain hazardous for many hundreds of years. This migration can occur through artesian groundwater in fractured tectonic zones surrounding the Central Zones [7-10].

To assess radiological hazards, areas affected by peaceful nuclear explosions are conditionally classified into three groups:

1. Sites where radionuclides have been observed at the surface (e.g., Taiga, Crystal, Globus-1, -2, -3, -4, Kama-2, Kration-3, Bhutan, Gelij, Grifon, Dnepr, Vega);

2. Sites where the potential for radionuclide release exists due to the presence of artesian aquifers affecting the Central Zones (e.g., Kvarts-3, Kimberlit-1, Rubin-2, Rift-1, Gorizont-2);

3. Sites located within areas of ongoing or planned mineral resource development [2].

Tritium is characterized by its high migration capability [2, 8] and can easily enter surface waters through fractures in the explosion cavity [9, 11]. The release of other anthropogenic radionuclides from underground nuclear explosion sites into the environment occurs through leaching, that is, the transition from a solid phase to a liquid phase. On the surface, tritium is predominantly found as tritiated water (THO) [12], although at certain explosion sites, tritium has also been detected in the gaseous phase with a gas-to-water ratio of 5:2 [13].

Due to the fact that the activity of ^3H remains measurable even at distances of several tens of kilometers from explosion epicenters, it serves as an optimal indicator for studying the migration of anthropogenic radionuclides from PNE cavities into the surrounding environment via groundwater. Researching these processes allows to assess the reliability of barriers between the environment and the explosion cavity.

A review of the literature on the potential hazards of radionuclide migration from PNE cavities shows that the primary focus of research has been on analyzing the radiation situation in the immediate vicinity of nuclear explosion sites [14-29]. Special attention has been given to explosions where accidental or

нуклидов из полостей МЯВ с подземными водами в окружающую среду. Изучение этих процессов позволяет оценить степень надежности инженерных барьеров между окружающей средой и полостью взрыва.

Анализ литературы по проблеме потенциальной опасности выноса радионуклидов из полости мирного ядерного взрыва показал, что основное внимание всех исследований приковано к анализу радиационной обстановки в непосредственной близости от мест проведения МЯВ [14-29]. При этом особое место в исследованиях занимали взрывы, где вследствие их проведения имеет место аварийный или запланированный вынос радиоактивности на поверхность: Глобус-1 (Ивановская область), Тайга (Пермский край), Кристалл и Кратон-3 (Республика Саха (Якутия)) [15-20]. Важно отметить, что уровни выносимого на поверхность трития на взрывах Глобус-1 и Днепр-1, 2 достигали в разные годы десятков тысяч (до 110 000 Бк/кг) [15-17], что свидетельствует о высоких уровнях активности данного радионуклида в зонах взрывов. На объектах Кристалл и Кратон-3 содержание трития в пробах воды в разные периоды исследований находилось в пределах от 99 до 320 Бк/кг [9, 18, 19, 29]. В диапазоне от 19 до 170 Бк/кг трития зарегистрированы и для неаварийных взрывов, например, в попутной воде при добыче нефти и газа на взрыве Грифон (Пермский край) [16], а также ряде других взрывов в Республике Саха (Якутия) [10, 18].

Изучению содержания трития в водных объектах в районах проведения мирных ядерных взрывов посвящено ограниченное число исследований, как в России [15, 24-26, 29], так и за рубежом [31-33]. В основном эти публикации посвящены потенциальной опасности выхода техногенных радионуклидов из ЦЗВ МЯВ и содержат ограниченное число данных об уровнях трития в питьевой воде, потребляемой населением, проживающим в районах проведения МЯВ.

Принимая во внимание выше сказанное, следует отметить, что степень изученности всех территорий проведения МЯВ, включая территории, прилегающие к местам проведения мирных ядерных взрывов, является недостаточной. Помимо этого, нарушение в процессе старения герметичности технологических скважин и связанных с ними конструкций в ряде объектов МЯВ [2, 27], а также высокая миграционная способность трития предопределяют актуальность исследований его миграции в водоносные горизонты и источники питьевого водоснабжения населения, проживающего на территориях, прилегающих к местам проведения МЯВ.

Отнесение радиоактивных отходов, образовавшихся в результате выполнения государственной программы вооружения и государственного оборонного заказа, использования атомной энергии и ядерных зарядов в мирных целях, к особым (не извлекаемым) радиоактивным отходам^{1,2} строится на предположении, что связанные с удалением таких отходов расходы (включая расходы на их извлечение, переработку, кондиционирование, перевозку к пункту захоронения и захоронение) превышают совокупный размер

planned releases of radioactivity to the surface occurred, such as Globus-1 (Ivanovo region), Taiga (Perm region), Crystal, and Kraton-3 (Sakha Republic (Yakutia)) [15-20]. It is important to note that the levels of tritium released to the surface at the Globus-1 and Dnepr-1, 2 explosions reached tens of thousands (up to 110,000 Bq/kg) in different years [15-17], indicating high levels of activity of this radionuclide in the explosion zones. At the Crystal and Kraton-3 sites, tritium concentrations in water samples during various study periods ranged from 99 to 320 Bq/kg [9, 18, 19, 29]. Tritium levels ranging from 19 to 170 Bq/kg were also recorded for non-accidental explosions, for instance, in the associated water during oil and gas extraction at the Grifon explosion (Perm region) [16] and in several other explosions in the Sakha Republic (Yakutia) [10, 18].

There have been a limited number of studies on tritium levels in water bodies in areas where peaceful nuclear explosions were conducted, both in Russia [15, 24-26, 29] and abroad [31-33]. These publications primarily focus on the potential hazards of anthropogenic radionuclide migration from The Central Zones of the PNEs and contain limited data on tritium levels in drinking water consumed by populations living near nuclear explosion sites.

Given the above, it should be noted that the degree of research on all areas where PNEs were conducted, including territories adjacent to peaceful nuclear explosion sites, is insufficient. Additionally, the degradation of the sealing integrity of technological wells and associated structures in several PNEs sites due to aging [2, 27], along with the high migration potential of tritium underscores the relevance of studying its migration into aquifers and drinking water sources for populations living near such sites.

The classification of radioactive waste generated from the execution of state armament programs and state defense orders, as well as the use of nuclear energy and nuclear devices for peaceful purposes, as special (non-retrievable) radioactive waste^{1,2}, is based on the assumption that the costs associated with the removal of such waste (including extraction, processing, conditioning, transportation to disposal sites, and disposal) exceed the cumulative potential environmental damage in the event of the disposal of such radioactive waste at its current location. Since the potential risk of radionuclide migration beyond the explosion zone into aquifers persists, and tritium serves as an optimal indicator for studying the migration of radionuclides from PNEs into the environment via groundwater, monitoring tritium levels in drinking water sources in settlements located near PNEs sites remains highly relevant.

The aim of this study is to assess the tritium content in drinking water sources and surface waters in areas where peaceful nuclear explosions have been conducted within the territories of the Russian Federation.

Materials and Methods

The assessment of tritium content in drinking water sources and surface waters located in areas adjacent to PNEs sites was carried out in collaboration with specialists from the regional branches of the Federal Service for Surveillance on Consumer

¹Федеральный закон от 11.07.2011 №190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [Federal Law of 11.07.2011 №190-FZ «On the Management of Radioactive Waste and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation»] (In Russ.)]

²Постановление Правительства РФ от 19.10.2012 № 1069 "О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов" [Decree No. 1069 of the Government of the Russian Federation dated October 19, 2012. On Criteria for assignment of solid, liquid and gaseous waste to radioactive waste, criteria for assignment of radioactive waste to special radioactive waste and to disposed radioactive wastes and criteria for the classification of disposed radioactive waste»] (In Russ.)]

возможного вреда окружающей среде в случае захоронения таких радиоактивных отходов в месте их нахождения. Так как потенциальная опасность выноса радионуклидов за пределы зоны взрыва в водоносные горизонты сохраняется, а тритий является оптимальным индикатором изучения процесса миграции радионуклидов из полостей МЯВ с подземными водами в окружающую среду, остается актуальным контроль за его содержанием в источниках питьевого водоснабжения в населенных пунктах, расположенных вблизи от мест проведения МЯВ.

Цель исследования – дать оценку содержания трития в источниках питьевого водоснабжения и поверхностных водах в районах проведения мирных ядерных взрывов на территории субъектов Российской Федерации.

Материалы и методы

Оценка содержания трития в источниках питьевого водоснабжения и поверхностных водах, расположенных на территориях, прилегающих к местам проведения МЯВ, выполнена во взаимодействии со специалистами территориальных Управлений и Центров гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора (далее ФБУЗ ЦГиЭ). В период с мая по сентябрь 2024 года специалистами Федерального бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (далее ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева) был организован отбор проб воды из источников питьевого водоснабжения (колодцы, скважины, центральное водоснабжение) и поверхностных вод в населенных пунктах, находящихся в радиусе 30 км от мест проведения МЯВ. Перечень ближайших от МЯВ населенных пунктов, предлагаемых для отбора проб, составляли с использованием ГИС-технологий. Отбор проб воды осуществляли специалисты ФБУЗ ЦГиЭ территорий, определенных Перечнем. Водные пробы отбирали в чистые стеклянные емкости, подкисляли концентрированной азотной кислотой, герметично закрывали и отправляли в испытательный лабораторный центр ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева. Всего было отобрано 220 проб воды, из которых 136 проб – из источников питьевого водоснабжения (колодцы, скважины, родники, центральное водоснабжение) и 84 – из поверхностных вод.

Пробоподготовку воды выполняли посредством дистилляции с целью очистки счетного образца от тушащих сцинтилляцию примесей и природных радионуклидов. Аликвоты полученного дистиллята объемом 9 мл помещали в пластиковые виалы, содержащие 11 мл сцинтилляционного коктейля Optiphase Hisafe III (далее сцинтиллятор). Затем виалы плотно закрывали крышкой и встряхивали в течение 2-х минут до полного смешивания дистиллята с сцинтиллятором. Перед измерением виалы выдерживали в темном и прохладном месте в течение 8-12 часов для ослабления люминесценции.

Удельная активность (далее – УА) трития определялась с помощью радиометра альфа-бета-излучения спектрометрического Quantulus 1220-003 фирмы Perkin Elmer (США). Время измерения одной пробы составляло от 3 до 24 часов. Минимальная детектируемая активность трития при времени измерений 12 часов составляла 1 Бк/кг.

Стабильность работы прибора и эффективность регистрации трития в каждой серии измерений контролировалась посредством измерения стандарта, входящего в комплект прибора, а также эталонной пробы, приготовленной

Rights Protection and Human Wellbeing and the Centers for Hygiene and Epidemiology. Between May and September 2024, specialists from the Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after P.V. Ramzaev (IRH) organized water sampling from drinking water sources (wells, boreholes, centralized water supply) and surface waters in populated areas within a 30 km radius of PNEs. The List of the nearest settlements to the explosion sites for sampling was compiled using GIS technologies. Water samples were collected by specialists from the designated Centers for Hygiene and Epidemiology territories according to the List. Water samples were collected in clean glass containers, acidified with concentrated nitric acid, sealed hermetically, and sent to the Testing Laboratory Center of the IRH. A total of 220 water samples were collected, including 136 samples from drinking water supply sources (wells, boreholes, springs, central water supply) and 84 from surface water.

Water samples were prepared by distillation to purify the counting sample from quenching impurities and natural radionuclides. Aliquots of the resulting distillate, 9 ml in volume, were placed into plastic vials containing 11 ml of Optiphase Hisafe III scintillation cocktail (hereinafter referred to as the scintillator). The vials were then tightly sealed with a lid and shaken for 2 minutes until the distillate and scintillator were thoroughly mixed. Before measurement, the vials were stored in a dark and cool place for 8-12 hours to reduce luminescence.

The specific activity (SA) of tritium was determined using the Quantulus 1220-003 liquid scintillation spectrometer from Perkin Elmer (USA). The measurement time for each sample ranged from 3 to 24 hours. The minimum detectable activity of tritium at a 12-hour measurement time was 1 Bq/kg.

The stability of the instrument and the efficiency of tritium detection in each measurement series were controlled by measuring the standard included with the instrument, as well as a reference sample prepared from a tritium calibration solution in a 9:11 volume ratio with the scintillator.

Determination of tritium SA in water in the counting samples was performed according to the methodology for measuring the activity of alpha- and beta-emitting radionuclides in liquid and solid samples using the Quantulus 1220 liquid scintillation counter at the IRH, Perkin Elmer (Method Certificate No. 45014.15225/RA.RU.311243 dated December 11, 2015).

Results and discussion

During the course of this study, 220 water samples were collected from drinking water sources (wells, boreholes, springs, central water supply systems) and surface water bodies located within 167 settlements, as well as from 9 locations outside these areas. The study sites are situated in 17 regions of the Russian Federation, where 50 peaceful nuclear explosions were conducted between 1965 and 1988. Figure 1 presents a schematic map showing the locations of these PNEs, within a 30-kilometer radius of which the water samples were collected.

Table presents quantitative data on the investigated water supply sources, including the ranges and average values of tritium SA in the analyzed water samples.

Data analysis revealed that tritium concentrations in groundwater sources are significantly lower (Student's t-test $p < 0.05$) than in surface water sources. The average tritium levels in boreholes, rivers, and lakes were 3.0, 3.45, and 4.31 Bq/kg, respectively, which are three orders of magnitude lower than the intervention levels specified by NRB 99/2009³. In the areas where explosions occurred, tritium levels in rivers, lakes, and swamps feeding the rivers were within the background levels recorded by Roshydromet in these regions (ranging from 1.1 to 5 Bq/kg) [34].

из калибровочного раствора трития в объемном соотношении со сцинтиллятором 9:11.

Определение УА трития в воде в счетных образцах выполнены в соответствии с методикой выполнения измерений активности альфа-, бета-излучающих радионуклидов в жидких и твердых пробах с использованием радиометра альфа-, бета-излучения спектрометрического «Quantulus-1220» (Свидетельство об аттестации методики № 45014.15225/RA.RU.311243 от 11 декабря 2015 года).

Результаты и обсуждение

В процессе выполнения данного исследования было отобрано 220 проб воды из источников питьевого водоснабжения и поверхностных вод, располагающихся в границах 167 населенных пунктов, а также 9 точек за их пределами. Объекты исследований расположены в границах 17 субъектов Российской Федерации, на территории которых в период с 1965 по 1988 гг. было произведено 50 мирных ядерных взрывов. На рисунке 1 представлена карта-схема мест проведения МЯВ в радиусе 30 км от которых были отобраны пробы воды.

В таблице представлены количественные данные по исследованным источникам водоснабжения, диапазоны и средние значения УА трития в исследованных пробах воды.

Анализ данных показал, что содержание трития в подземных источниках водоснабжения статистически значимо ниже (критерий Стьюдента $p < 0,05$), чем в поверхностных. Средние уровни трития в скважинах, реках и озерах равны 3,0; 3,45 и 4,31 Бк/кг соответственно, что на три порядка ниже уровней вмешательства по НРБ 99/2009³. В районах проведения взрывов удельная активность трития в реках, озерах и болотах, питающих реки, находится в диапазоне фоновых уровней, регистрируемых Росгидрометом в данных районах (от 1,1 до 5 Бк/кг) [34].

Пробы воды отбирали на различных расстояниях, в связи с этим важно было выяснить, зависит ли удельная активность трития в воде подземных и поверхностных источников водоснабжения от удаленности до мест проведения МЯВ.

На рисунке 2 представлены результаты оценки УА трития в скважинах, колодцах и родниках на различных расстояниях от мест проведения МЯВ.

Анализ данных показал, что связь между удельной активностью трития в воде подземных источников и расстоянием от мирного ядерного взрыва отсутствует (рис.2). Такие данные косвенно свидетельствуют об отсутствии влияния МЯВ на содержание трития в исследованных подземных источниках питьевого водоснабжения.

На рисунке 3 представлены результаты оценки уровней активности трития в поверхностных источниках (реки, озера) на различных расстояниях от мест проведения МЯВ.

Данные, представленные на рисунке 3, показывают отсутствие связи УА трития в воде рек и озер от расстояния до мест проведения МЯВ. Более высокие уровни содержания трития в измеренных пробах воды из поверхностных источников водоснабжения по сравнению с подземными обусловлены глобальными процессами распространения трития в окружающей среде за счет предприятий атомной энергетики, космогенных процессов и промышленного применения источников на основе трития.

The distances at which water samples were collected spanned tens of kilometers. Therefore, it was important to determine whether tritium activity levels in groundwater and surface water sources depend on the distance from the sites of peaceful nuclear explosions.

Figure 2 presents the results of tritium SA assessments in wells, boreholes, and springs at various distances from the PNEs sites.

Data analysis indicated that there is no correlation between the tritium SA in groundwater and the distance from the site of the nuclear explosion (Figure 2). This finding indirectly suggests that the PNEs did not influence tritium concentrations in the groundwater sources of drinking water that were studied.

Figure 3 presents the results of assessing tritium activity levels in surface water sources (rivers, lakes) at various distances from the PNEs sites.

The data in Figure 3 show no correlation between tritium specific activity in the water of rivers and lakes and the distance from the PNEs sites. The higher tritium levels in the measured water samples from surface water sources, compared to groundwater sources, are attributed to global tritium distribution processes in the environment due to nuclear power facilities, cosmogenic processes, and the industrial use of tritium-based sources.

Conclusion

The analysis of the results of 220 water samples collected from various drinking water sources and surface waters within 167 settlements across 17 regions of the Russian Federation, in areas adjacent to 50 peaceful nuclear explosion sites, has shown the following:

1. The average tritium levels in groundwater sources are significantly lower (Student's test $p < 0,05$) than in surface water sources.
2. The average tritium levels in boreholes, rivers, and lakes are 3.0, 3.45, and 4.31 Bq/kg, respectively, which are three orders of magnitude below the intervention levels specified by NRB 99/2009.
3. No significant trends were found in the dependence of tritium levels in groundwater and surface water sources on the distance from the nuclear explosion sites. This indicates either the absence or extremely slow migration of tritium and other anthropogenic radionuclides from the epicentral zones of the explosions.
4. Tritium concentrations in drinking water sources in the areas of nuclear explosions are at background levels, as recorded by Roshydromet.

Authors' personal contribution

Repin V.S. – Proposed the research idea, participated in the organization of water sampling from the regions, contributed to data analysis, and was involved in writing the article.

Varfolomeeva K.V. – Participated in the organization of water sampling, in processing measurement results, analyzing literature data, and writing the introduction and the "Materials and Methods" section.

Biblin A.M. – Contributed to the preparation of cartographic materials, analysis of literature data, and making editorial corrections.

³Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 07.07.2009 № 47 «Об утверждении СанПиН 2.6.1.2523-09» (вместе с «НРБ-99/2009. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности. Санитарные правила и нормативы») (зарегистрировано в Минюсте РФ 14.08.2009 № 14534). [Sanitary rules and norms. SanPiN 2.6.1.2523-09. Norms of the radiation safety (NRB 99/2009). Registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation 14.08.2009 N 14534. (In Russ.)]

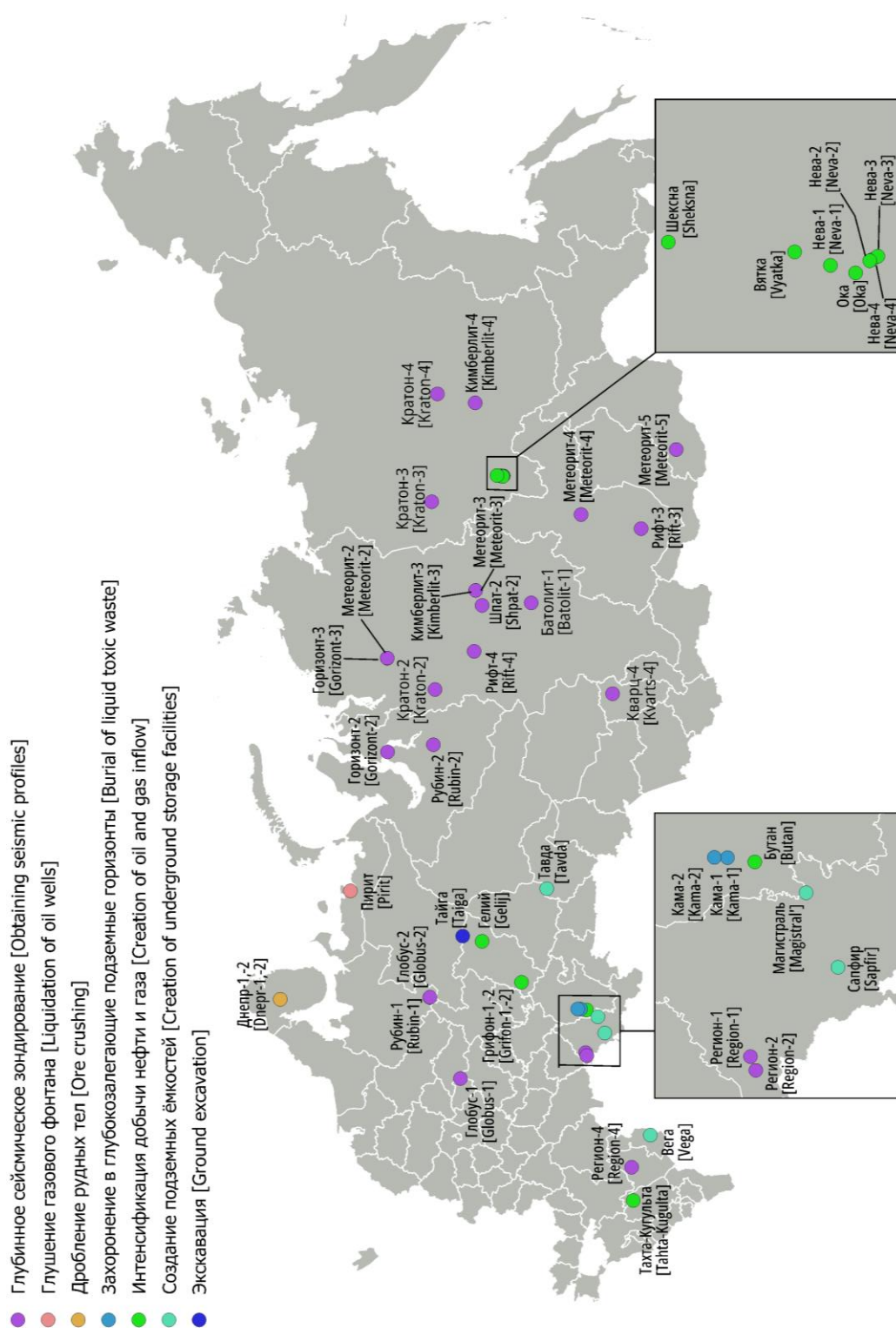


Рис. 1. Карта-схема мест проведения МЯВ, вошедших в программу данного исследования
[Fig. 1. Location of the sites of peaceful nuclear explosions included in the research program]

Удельная активность трития в пробах воды, отобранных из разных водных объектов, расположенных в радиусе 30 км от мест проведения МЯВ

[Table

Specific activity of tritium in water samples taken from different water bodies located within a radius of 30 km from peaceful nuclear explosions sites]

Источник водоснабжения [Water Supply Source]	Количество проб, шт. [Number of Samples, pcs.]	Удельная активность, Бк/кг [Specific Activity, Bq/kg]	
		Диапазон [Range]	Среднее (ст. откл) [Mean (Std. Dev.)]
Скважина [Borehole]	48	1,11 – 5,56	3,00 (0,96)
Колодец [Well]	34	<1,00 – 5,00	3,16 (1,04)
Родник [Spring]	5	1,67 – 2,89	2,42 (0,48)
Река [River]	68	<1,00 – 6,33	3,45 (1,26)
Пруд, озеро, водохранилище [Pond, Lake, Reservoir]	15	2,96 – 6,56	4,31 (1,07)
Болото [Swamp]	1	–	2,44
Централизованное водоснабжение [Centralized Water Supply]	49	<1,00 – 7,44	2,87 (1,05)

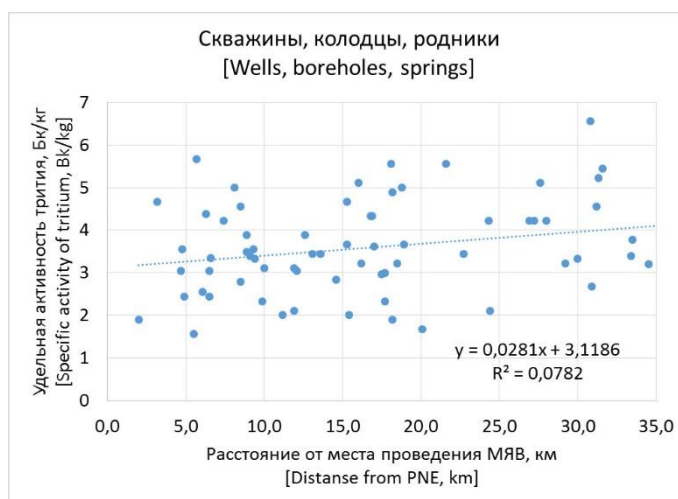


Рис. 2. Удельная активность трития в воде подземных источников, расположенных на различных расстояниях от МЯВ
[Fig. 2. The specific activity of tritium in underground water sources at various distances from the peaceful nuclear explosions' sites]

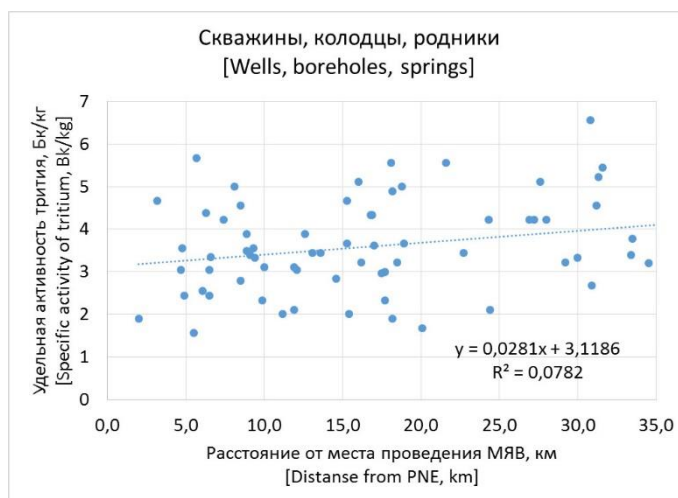


Рис. 3. Удельная активность трития в воде поверхностных источников, расположенных на различных расстояниях от МЯВ
[Fig. 3. Specific activity of tritium in the water of surface sources located at different distances from the peaceful nuclear explosions' sites]

Заключение

Анализ результатов исследования 220 проб воды, отобранных из разных источников питьевого водоснабжения и поверхностных вод, располагающихся в границах 167 населенных пунктов 17 субъектов Российской Федерации, отобранных на территориях, прилегающих к местам проведения 50 МЯВ, показал:

1. Средние значения удельной активности трития в подземных источниках водоснабжения статистически значимо ниже (критерий Стьюдента $p < 0,05$), чем в поверхностных.

2. Средние значения удельной активности трития в скважинах, реках и озерах равны 3,0; 3,45 и 4,31 Бк/кг соответственно, что на три порядка ниже уровня вмешательства по НРБ 99/2009.

3. Не выявлено определенных тенденций зависимости уровней трития в подземных и поверхностных источниках от расстояния до места проведения МЯВ, что свидетельствует об отсутствии или чрезвычайно низких темпах выноса трития, а, значит, и других техногенных радионуклидов из эпицентральных зон взрывов.

4. Содержание трития в источниках питьевого водоснабжения в районах проведения МЯВ находятся на уровне фоновых значений, регистрируемых Росгидрометом в воде поверхностных водоемов и водотоков.

Сведения о личном вкладе авторов

Репин В.С. предложил идею исследования, участвовал в организации отбора проб воды из регионов, участвовал в анализе полученных данных и написании статьи.

Варфоломеева К.В. участвовала в организации сбора проб воды из регионов, в оформлении результатов измерений, анализе литературных данных, написании введения и раздела «Материалы и метода».

Библин А.М. участвовал в подготовке картографических материалов, анализе литературных данных, внесении редакционных правок.

Зеленцова С.А. участвовала в организации сбора проб воды из регионов, в оформлении результатов измерений, анализе литературных данных, написании введения и раздела «Материалы и метода».

Седнев К.А. участвовал в анализе литературных данных, подготовке проб и измерениях трития, подготовке картографических материалов.

Архангельская Г.В. участвовала в редактировании статьи.

Благодарности

Авторы выражают благодарность специалистам ФБУЗ ЦГиЭ и Управлений Роспотребнадзора Республики Башкортостан, Республики Калмыкия, Республики Саха (Якутия), Забайкальского края, Красноярского края, Пермского края, Ставропольского края, а также Архангельской, Астраханской, Ивановской, Иркутской, Кемеровской, Костромской, Мурманской, Оренбургской, Свердловской, Тюменской областей и Ямало-Ненецкого АО за их активное участие в отборе проб и их отправке в ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Zelentsova S.A. – Participated in the organization of water sampling, processing measurement results, analyzing literature data, and writing the introduction and the "Materials and Methods" section.

Sednev K.A. – Participated in the analysis of literature data, preparation of samples and tritium measurements, and preparation of cartographic materials.

Arkhangelskaya G.V. – Participated in the editing of the article.

Acknowledgments

The authors express their gratitude to the specialists from the regional branches of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing and the Centers for Hygiene and Epidemiology of the Republics of Bashkortostan, Kalmykia, Sakha (Yakutia), Zabaykalsky, Krasnoyarsk, Perm, and Stavropol Krai, and the Arkhangelsk, Astrakhan, Ivanovo, Irkutsk, Kemerovo, Kostroma, Murmansk, Orenburg, Sverdlovsk, Tyumen Regions, and the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug for their active participation in the sampling and dispatch of samples to the IRH.

Conflicts of interest

The authors declare no conflict of interest.

Sources of funding

This article was prepared as part of the research project "Improvement and Development of Environmental Monitoring Methods in Areas of Peaceful Nuclear Explosions. Radiation and Hygienic Characterization of Drinking Water Supply Sources."

References

1. Logachev VA, ed. Nuclear explosions in the USSR and their impact on the health of the population of the Russian Federation. Moscow: Izdat Publisher; 2008. 470 p. (In Russian).
2. Kasatkin VV, Ilyichev VA, Kamnev EN, Kasatkin AV, Samorodova TS. Geological and radioecological problems of the objects formed by peaceful nuclear explosions – special radwaste repositories. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 2012; 113(5): 289-293. (In Russian).
3. Kasatkin VV, Ilyichev VA, Myasnikov K, Klishin VI. The state of radiation safety of industrial nuclear explosions facilities conducted at fuel and energy complex enterprises in the Russian Federation. In: Proceedings of the International Conference "Problems of ensuring radiation safety in the fuel and energy complex". St. Petersburg; 2003. P. 231-237. (In Russian).
4. Lopatin VV, Ilyichev VA, Kasatkin VV. Protective measures to eliminate the consequences of the accident at the Globus-1 underground nuclear explosion facility in the Ivanovo region. In: Proceedings of the International Conference "Radioactivity after nuclear explosions and accidents": volume. 2. Radioactive pollution of the environment after nuclear explosions and accidents. Monitoring, databases, pollution fields and their dynamics. St. Petersburg: Hydrometeoizdat; 2006. P. 221-224. (In Russian).
5. Kasatkin VV, Akhunov VD, Mamonov BP, Ilyichev VA. Dynamics of contamination of the Taiga underground nuclear explosion facility and protective measures for radiation safety. In: Proceedings of the International Conference "Radioactivity after nuclear explosions and accidents": volume 2. Radioactive pollution of the environment after nuclear explosions and accidents. Monitoring, databases, pollution fields and their dynamics. St. Petersburg: Hydrometeoizdat; 2006. P. 223-225. (In Russian).
6. Vasiliev AP, Dubasov YuV, Ilyichev VA, Kasatkin VV, Myasnikov KV, Prihodko NK, et al. Nuclear explosive technologies:

Сведения об источнике финансирования

Статья подготовлена в рамках выполнения НИР «Совершенствование и развитие методов мониторинга объектов окружающей среды в районах проведения мирных ядерных взрывов. Радиационно-гигиеническая характеристика источников питьевого водоснабжения».

Литература

1. Ядерные взрывы в СССР и их влияние на здоровье населения Российской Федерации / Колл. авторов под руководством проф. В.А. Логачева. М.: ИздАТ, 2008. 470 с.
2. Касаткин В.В. Георадиоэкологические проблемы объектов мирных ядерных взрывов – пунктов размещения особых радиоактивных отходов // Атомная энергия. 2012. Т. 113, № 5. С. 289-293.
3. Касаткин В.В., Ильичев В.А., Мясников К.В., Клишин В.И. Состояние обеспечения радиационной безопасности объектов промышленных ядерных взрывов, проведенных на предприятиях ТЭК в Российской Федерации. Матер. конф. «Проблемы обеспечения радиационной безопасности в ТЭК», Санкт-Петербург, 8-11 апреля 2003. СПб. С. 231- 237.
4. Лопатин В.В., Ильичев В.А., Касаткин В.В. и др. Защитные мероприятия по ликвидации последствий аварии на объекте подземного ядерного взрыва Глобус-1 в Ивановской области. Сборник докладов и тезисов межд. конф. «Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий». Т. 2. Радиоактивное загрязнение окружающей среды после ядерных взрывов и аварий. Мониторинг, базы данных, поля загрязнения и их динамика. Под ред. Израэля Ю.А. СПб: Гидрометеиздат, 2006. С. 221-224.
5. Касаткин В.В., Ахунов В.Д., Мамонов Б.П., Ильичев В.А. Динамика загрязнения объекта подземного ядерного взрыва Тайга и защитные мероприятия по радиационной безопасности. Сборник докладов и тезисов межд. конф. «Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий». Т. 2. Радиоактивное загрязнение окружающей среды после ядерных взрывов и аварий. Мониторинг, базы данных, поля загрязнения и их динамика. Под ред. Израэля Ю.А. СПб: Гидрометеиздат, 2006. С. 223-225.
6. Васильев, А.П., Дубасов В.А., Ильичев В.В. и др. Ядерные взрывные технологии: эксперименты и промышленные применения. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2017. 508 с.
7. Приходько Н.К., Ильичев В.А., Касаткин В.В. Закономерности миграции радионуклидов в массивах горных пород // Горный журнал. 2003. № 4-5. С. 112-114.
8. Артамонова С.Ю. Геотехногенные системы подземных ядерных взрывов на территории Якутии (1974-1987 гг.): геоэкологические модели и особенности переноса радионуклидов и сопутствующих элементов. Диссертация на соискание степени доктора геолого-минералогических наук. Томск, 2015. 339 с.
9. Репин В.С., Рамзаев В.П., Библин А.М. и др. Анализ возможностей оценки размеров охранных зон мирных ядерных взрывов на основе количественных закономерностей деформации земных недр // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 4. С. 134-147. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-134-147.
10. Бондарева Л.Г., Чеботина М.Я., Артамонова И.Г., Тананаев И.Г. Тритий. Теория, практика, последствия: монография. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра, 2024. 359 с.
11. Мурзадилов Т.Д. Принципы ртутотметрической томографии границ областей наведенной трещиноватости от подземных ядерных взрывов // Вестник НЯЦ РК. 2020. № 3. С. 113-121.
12. Рихванов Л.П. Радиоактивные элементы в окружающей среде и проблемы радиоэкологии. Учебное пособие. Томск: STT, 2009. 430 с.
- experiments and industrial applications. Snezhinsk: RFNCVNIITF; 2017. 508 p. (In Russian).
7. Prikhodko NK, Ilyichev VA, Kasatkin VV. Patterns of migration of radionuclides in rock massifs. *Gornyi zhurnal = Mining journal*. 2003;4-5; 112— 114. (In Russian).
8. Artamonova SYu. Geotechnogenic systems of underground nuclear explosions on the territory of Yakutia (1974-1987): geoeological models and features of the transfer of radionuclides and related elements. Dissertation for the degree of Doctor of Geological and Mineralogical Sciences. Tomsk; 2015. 339 p. (In Russian).
9. Repin VS, Ramzaev VP, Biblin AM, Varfolomeeva KV, Zelensova SV, Sednev K.A, et al. Estimation of the protected zone sizes for peaceful nuclear explosions based on quantitative patterns of the Earth's interior deformation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(4): 134-147. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-134-147. (In Russian).
10. Bondareva LG, Chebotina MYa, Artamonova IG, Tananaev IG. Tritium. Theory, practice, consequences. Monograph. Apatity: Publishing house of the Kola Scientific Center; 2024. 359 p. (In Russian).
11. Murzadilov TD. Principles of mercury-metric tomography of the borders of underground nuclear explosions induced fracture regions. *Vestnik NYaTs RK = NNC RK Bulletin*. 2020;(3): 113-121. (In Russian).
12. Rikhvanov LP. Radioactive elements in the environment and problems of radioecology. Textbook. Tomsk: STT; 2009. P. 430. (In Russian).
13. Apenko AV, Romanov AM, Tokaev DN, Frolov Z.N. Distribution of gaseous tritium at underground nuclear explosion sites of semipalatinsk test site. *Vestnik NYaTs RK = NNC RK Bulletin*. 2019;(2): 75-80. DOI: 10.52676/1729-7885-2019-2-75-80. (In Russian).
14. Kasatkin VV, Kasatkin AV, Ilyichev VA, Sedov NS, Samorodova TS. Stages for reclassifying Globus-1 peaceful nuclear explosion object as a site for preserving special radwastes. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 2014;116(3): 157-161. (In Russian) DOI: 10.1007/s10512-014-9841-0.
15. Golubov BN, Sapozhnikov YuA. "Globus-1" Underground Nuclear Explosion and Its Radionuclides Long-Range Migration to the Underground Drinking Water Sources in Kineshma District of Ivanovo Region. *Elektronnoe nauchnoe izdanie Al'manah Prostranstvo i Vremya = Electronic Scientific Edition Almanac Space and Time*. 2016;13(1): 22. Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28796042> (Accessed: 31.03.2024). (In Russian).
16. Logachev VA, ed. Modern Radioecological Situation in Areas of Peaceful Nuclear Explosions on the Territory of the Russian Federation. Moscow: IzdAT Publisher; 2005. 256 p. (In Russian).
17. Ramzaev VP, Biblin AM, Repin VS, Khramtsov EV, Varfolomeeva KV. Tritium contamination of surface and ground waters at the "Dnepr" peaceful underground nuclear explosions site. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(1): 6-26. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-6-26. (In Russian).
18. Golubev B. Migration of radionuclides from the cavities of the underground thermonuclear release "Kristall" into a diamond mining quarry "Successful". In: Sapozhnikov Yu, Goralchuk A. Collection of reports and abstracts of the Republican Scientific and Practical Institute of Conference "Radiation safety of the Republic of Sakha (Yakutia)". Yakutsk; 2004. P. 182-192. URL: <https://disk.yandex.ru/i/FHfq-PGFGybsXA> (Accessed: 14.06.2023). (In Russian).
19. Artamonova SYu, Bondareva LG, Melgunov MS, Simonova GV. Modern radioecological situation at the technological site of the peaceful underground nuclear explosion "Kristall" and radionuclides in the surface waters of the adjacent territory (Western Yakutia). *Radiochimiya = Radiochemistry*. 2023;65(5): 482-500. DOI: 10.31857/S0033831123050118. (In Russian).

13. Апенько А.В., Романов А.М., Токаев Д.Н., Фролов З.Н. Распределения газового трития на участках подземных ядерных взрывов семипалатинского испытательного полигона // Вестник НЯЦ РК. 2019. №2. С. 75-80. DOI: 10.52676/1729-7885-2019-2-75-80.
14. Касаткин В.В., Касаткин А.В., Ильичев В.А. и др. Этапы перевода объекта использования ядерного заряда в мирных целях «Глобус-1» в пункт консервации особых радиоактивных отходов // Атомная энергия. 2014. Т. 116, № 3. С. 157-161. ISSN 0004-7163. URL: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1030/1011 (Дата обращения: 14.06.2024).
15. Голубов Б.Н., Сапожников Ю.А. Подземный ядерный взрыв "Глобус-1" и дальняя миграция его радионуклидов к подземным источникам питьевого водоснабжения Кинешемского района Ивановской области // Электронное научное издание Алманах Пространство и Время. 2016. Т. 13, № 1. С. 14. URL: 2227-9490e-aprov_e-ast13-1.2016.91 (Дата обращения: 14.06.2024).
16. Современная радиозэкологическая обстановка в местах проведения мирных ядерных взрывов на территории Российской Федерации / Колл. авторов; под рук. проф. В.А. Логачева. М.: ИздАТ, 2005. 256 с. URL: http://elib.biblioatom.ru/text/sovremennaya-radioekologicheskaya-obstanovka-rf_2005/go,0/ (Дата обращения: 14.06.2024).
17. Рамзаев В.П., Библин А.М., Репин В.С. и др. Загрязнение тритием поверхностных и подземных вод в месте проведения мирных подземных ядерных взрывов серии «Днепр» // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 1. С. 6-26. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-6-26.
18. Голубов Б.Н., Сапожников Ю.А., Горальчук А.В. Миграция радионуклидов из полости подземного термоядерного взрыва «Кристалл» в алмазодобывающий карьер «Удачный». Сб. докладов и тезисов Республиканской науч.-практ. конф. «Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия)», Якутск, 2004. С. 182-192. URL: <https://disk.yandex.ru/i/FHfq-PGFGybsXA> (Дата обращения: 14.06.2024).
19. Артамонова С.Ю., Бондарева Л.Г., Мельгунов М.С., Симонова Г.В. Современная радиозэкологическая обстановка на технологической площадке мирного подземного ядерного взрыва «Кристалл» и радионуклиды в поверхностных водах прилегающей территории (западная Якутия) // Радиохимия. 2023. Т. 65, № 5. С. 482-500. DOI: 10.31857/S0033831123050118.
20. Ramzaev V, Mishin A, Golikov V, et al. Radioecological studies at the Kraton-3 underground nuclear explosion site in 1978-2007: a review // Journal of environmental radioactivity. 2009;100(12): 1092-1099. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2009.04.002. Epub 2009 May 17. PMID: 19446936.
21. Храмов Е.В. Радиационная обстановка на территории проведения мирного ядерного взрыва «Глобус-1» до выполнения реабилитационных работ // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2. С. 81-88. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-81-88.
22. Храмов Е.В., Репин В.С., Библин А.М. и др. Радиационно - гигиеническая характеристика охранных зон мирных ядерных взрывов в Архангельской области // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 1. С. 111-123. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-111-123.
23. Ramzaev V., Repin V., Medvedev A. et al. Radiological investigations at the "Taiga" nuclear explosion site: Site description and in situ measurements // Journal of environmental radioactivity. 2011. Vol. 102. P. 672-680. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2011.04.003.
24. Библин А.М., Храмов Е.В., Репин В.С. и др. Радиационная обстановка в районе проведения мирного ядерного взрыва «Пирит» // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 149-161. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-149-161.
25. Ramzaev V, Mishin A, Golikov V, Argunova T, Ushnitski V, Zhuravskaya A, et al. Radioecological studies at the Kraton-3 underground nuclear explosion site in 1978-2007: a review. *Journal of environmental radioactivity*. 2009;100(12): 1092-1099. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2009.04.002. Epub 2009 May 17. PMID: 19446936.
26. Khrantsov EV. Radiation situation on the territory of the peaceful nuclear explosion «Globus-1» after performing the rehabilitation works. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(3): 58-68. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-3-58-68. (In Russian).
27. Khrantsov EV, Repin VS, Biblin AM, Varfolomeeva KV, Ivanov SA. Radiation-hygienic characteristic of the protected zones of peaceful nuclear explosions in the Arkhangelsk region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(1): 111-123. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-111-123. (In Russian).
28. Ramzaev V, Repin V, Medvedev A, Khrantsov E, Timofeeva M, Yakovlev V. Radiological investigations at the "Taiga" nuclear explosion site: Site description and in situ measurements. *Journal of environmental radioactivity*. 2011;102: 672-680.
29. Biblin AM, Khrantsov EV, Repin VS, Ivanov SA, Varfolomeeva KV, Sednev KA, et al. Radiation situation at the "Pirit" peaceful underground nuclear explosion site. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;5(4): 149-161. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-149-161.
30. Biblin AM, Varfolomeeva KV, Sednev KA, Ivanov SA, Repin VS, Georgieva AG. Modern radiation-hygienic state of the territories of the Globus-4 and Gorizont-1 peaceful nuclear explosions in the Komi Republic. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(1): 121-130. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-121-130.
31. Titov AV, Shandala NK, Isaev DV, Belskikh IS, Semenova MP, Doronova TA, et al. Radiation Survey in the Area of Peaceful Nuclear Explosion «Takhta-Kugulta». *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2021;66(2): 13-22. DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-2-13-22. (In Russian).
32. Kasatkin AV, Ilyichev VA, Kasatkin VV, Larina AI. Ensuring radiation safety at objects of peaceful nuclear explosions. *Gornyi zhurnal = Mining journal*. 2021;3: 80-85. (In Russian).
33. Titov AV, Shandala NK, Belskikh IS, Isaev DV, Gushchina JV, Doronova TA, et al. The Radiation Situation in the Area of the Meteorit-5 Peaceful Nuclear Explosion. *Radioaktivnye ot-khody = Radioactive Waste*. 2021;16: 94-102. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-94-102. (In Russian).
34. Ramzaev VP, Travnikova IG, Basalaeva LN, Bruk GYa, Golikov VYu, Mishin AS, et al. On influence of the underground nuclear explosions Crystal and Kraton-3 on radiological situation in the nearest settlements. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2008;1(2): 14-19. (In Russian).
35. Ershov VV. Possible effects on the ecological and hydrological situation of the territories of underground nuclear explosions. *Razvedka i okhrana nedr = Prospect and protection of mineral resources*. 2023;3: 37-42. DOI: 10.53085/0034-026X_2023_04_37. (In Russian).
36. Aktayev M, Subbotin S, Aidarkhanov A, Aidarkhanova A, Timonova L, Larionova N. Characterization of geological and lithological features in the area proximal to tritium-contaminated groundwater at the Semipalatinsk test site. *PLoS ONE*. 2024;19(3): e0300971. DOI: 10.1371/journal.pone.0300971.
37. Aktaev MR, Aidarkhanov AO, Aidarkhanova AK, Pronin SS, Iskenov AO. Monitoring of tritium pollution of the waters of the Shagan River. *Vestnik Nacional'noj akademii nauk Respubliki Kazakhstan = Bulletin of the National Research Center of the Republic of Kazakhstan*. 2021;2: 25-29. DOI: 10.52676/1729-7885-2021-2-25-29. (In Russian).

25. Библин А.М., Варфоломеева К.В., Седнев К.А. и др. Современное радиационно-гигиеническое состояние территорий проведения мирных ядерных взрывов «Глобус-4» и «Горизонт-1» в Республике Коми // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 1. С. 121-130. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-121-130.
26. Титов А.В., Шандала Н.К., Исаев Д.В. и др. Оценка радиационной обстановки в районе проведения мирного ядерного взрыва «Тахта-Кугульта» // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т. 66, № 2. С. 13–22. DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-2-13-22.
27. Касаткин А.В., Ильичев В.А., Касаткин В.В., Ларина А.И. Обеспечение радиационной безопасности на объектах мирных ядерных взрывов // Горный журнал. 2021. № 3. С. 80-85.
28. Титов А.В., Шандала Н.К., Бельских Ю.С. и др. Радиационная обстановка в районе проведения мирного ядерного взрыва «Метеорит – 5» // Радиоактивные отходы. 2021. № 3 (16). С. 94-102.
29. Рамзаев В.П., Репин В.С., Храмов Е.В. О влиянии подземных ядерных взрывов «Кратон-3 и «Кристалл» на радиационно-гигиеническую обстановку в близлежащих населенных пунктах // Радиационная гигиена. 2008. Т. 1, № 2. С. 14-19.
30. Ершов В.В. Возможные влияния подземных ядерных взрывов (ПЯВ) в мирных целях на эколого-гидрогеологическую обстановку // Разведка и охрана недр. 2023. № 3. С. 37-42.
31. Aktayev M., Subbotin S., Aidarkhanov A. et al. Characterization of geological and lithological features in the area proximal to tritiumcontaminated groundwater at the Semipalatinsk test site // PLoS ONE. 2024. Vol. 19, №.3. e0300971. DOI: 10.1371/journal.pone.0300971.
32. Актаев М.Р., Айдарханов А.О., Айдарханова А.К. и др. Мониторинг тритиевого загрязнения вод р. Шаган // Вестник НЯЦ РК. 2021. № 2. С. 25-29. DOI: 10.52676/1729-7885-2021-2-25-29.
33. Dasher D., Hanson W., Read S. et al. An assessment of the reported leakage of anthropogenic radionuclides from the underground nuclear test sites at Amchitka Island, Alaska, USA to the surface environment. 2002. Vol. 60. №. 1. DOI: 10.1016/S0265-931X(01)00102-3.
34. Радиационная обстановка по территории России и сопредельных государств в 2022 г. Ежегодник. НПО «Тайфун». Обнинск, 2023. URL: https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/ezhegodniki/ro/ezhegodnik_ro_2022.pdf (Дата обращения: 08.07.2024 г).

Received: July 18, 2024

Поступила: 18.07.2024

Репин Виктор Степанович – доктор биологических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: v.repin@mail.ru

Варфоломеева Ксения Владимировна – научный сотрудник лаборатории экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Библин Артем Михайлович – старший научный сотрудник, руководитель Информационно-аналитического центра Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Зеленцова Светлана Александровна – научный сотрудник лаборатории экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Седнев Константин Андреевич – младший научный сотрудник лаборатории экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Архангельская Генриэтта Владимировна – доктор медицинских наук, главный научный сотрудник лаборатории экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Репин В.С., Варфоломеева К.В., Библин А.М., Зеленцова С.А., Седнев К.А., Архангельская Г.В. Содержание трития в водных объектах в районах проведения мирных ядерных взрывов // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 3. С. 67–78. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-67-78

For correspondence: **Viktor S. Repin** – Doctor of Biological Sciences, Head of Ecology Laboratory of Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: V.Repin@mail.ru)

Kseniya V. Varfolomeeva – Junior Researcher, Laboratory of Ecology, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

Artem M. Biblin – Head of the Information and Analytical Center, Senior Researcher, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

Svetlana A. Zelentsova – Junior Researcher, Laboratory of Ecology, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

Konstantin A. Sednev – Acting Junior Researcher, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

Genrietta V. Arkhangelskaya – Doctor of Medical Sciences, Chief Researcher, Laboratory of Ecology, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

For citation: Repin V.S., Varfolomeeva K.V., Biblin A.M., Zelentsova S.A., Sednev K.A., Arkhangelskaya G.V. Tritium content in water bodies in regions of peaceful nuclear explosions. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 3. P. 67–78. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-67-78