

Tritium contamination of surface and ground waters at the “Dnepr” peaceful underground nuclear explosions site

Valery P. Ramzaev, Artem M. Biblin, Viktor S. Repin, Evgeniy V. Khramtsov, Kseniya V. Varfolomeeva

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

The article presents results of a study on the tritium content in surface and ground waters in the area of peaceful underground nuclear explosions of the “Dnepr” series. Low-yield thermonuclear explosions (1.8–2.1 kt of TNT equivalent) were carried out inside Mount Kuel’por (Khibiny Massif, Kola Peninsula, Murmansk Oblast, the Russian Federation) in 1972 and 1984. The purpose of the explosions was to crush the ore body (apatite minerals), followed by the extraction of the crushed rock to the ground surface. The main long-term problem generated by these explosions was the flow of tritium-contaminated groundwater onto the ground surface. The area where the explosions took place is actively visited by tourists. Water from local reservoirs, in particular from the Kuniyok River, is used by people for drinking. The purpose of this study was to assess the drinkability of the local waters in terms of activity concentration of tritium. To achieve this goal, 35 water samples were taken in 2019 from wells, boreholes, rivers, streams, lakes and other accessible environmental waterbodies. Activity concentration of tritium in the samples was determined using the Quantulus 1220 low-background liquid scintillation spectrometer. The activity concentration of tritium in the water samples was in a rather wide range: from less than 2 Bq/kg up to 1510 Bq/kg. The maximum value was up to three orders of magnitude higher than the regional background level of approximately 2 Bq/kg. At the same time, the maximum activity concentration was significantly lower compared to the intervention level for drinking water (7600 Bq/kg, according to Sanitary Norms and Rules of the Russian Federation). Based on the results of this study and data obtained by other researchers earlier, it became possible to assess the half-time for decrease of activity concentration of tritium in surface and ground waters in the period 2008–2019. The mean value (\pm standard error of the mean) of the effective half-time of tritium in water from the mine, the boreholes, and the Kuniyok River was estimated as 4.4 ± 0.2 year. The decrease in activity concentration of tritium in water depended more on ecological processes (dilution with “pure” water) than on physical decay of the radionuclide. In 2019, the estimated value of the effective dose due to ingestion of tritium in drinking water from the Kuniyok River was $0.17 \mu\text{Sv}$; this was negligible compared to the dose limit of 1 mSv per year for the public.

Key words: tritium, water, peaceful underground nuclear explosion, “Dnepr”, Murmansk Oblast, Khibiny Massif, Mount Kuel’por, Kuniyok River, effective dose.

Загрязнение тритием поверхностных и подземных вод в месте проведения мирных подземных ядерных взрывов серии «Днепр»

В.П. Рамзаев, А.М. Библин, В.С. Репин, Е.В. Храмцов, К.В. Варфоломеева

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

В статье приводятся результаты исследования содержания трития в поверхностных и подземных водах в месте проведения мирных подземных ядерных взрывов серии «Днепр». Термоядерные заряды малой мощности (1,8–2,1 килотонны в тротиловом эквиваленте) были взорваны внутри горы Куэльпор (горный массив Хибин, Кольский полуостров, Мурманская область) в 1972 и 1984 гг. Целью взрывного воздействия было дробление рудного тела (апатитовые минералы) с последующим извлечением раздробленной породы на поверхность. Основной долговременной радиологической

Valery P. Ramzaev

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

Address for correspondence: Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101; E-mail: V.Ramzaev@mail.ru

Рамзаев Валерий Павлович

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.Ramzaev@mail.ru

проблемой, порожденной этими взрывами, являлось поступление на земную поверхность подземных вод, загрязненных тритием. Территория в месте проведения взрывов активно посещается туристами, и вода из местных водоемов, в частности, из реки Кунийок, используется людьми для питья. Целью настоящего исследования являлась оценка пригодности для питья воды из источников долины реки Кунийок по показателю удельной активности трития. Для достижения этой цели в 2019 г. было отобрано 35 проб воды из колодцев, скважин, рек, ручьев, озер и других доступных водных объектов окружающей среды. С помощью низкофонового спектрометрического радиометра альфа- и бета-излучения Quantulus 1220 было определено содержание трития в пробах. Удельная активность трития в воде находилась в весьма широком диапазоне: от менее 2 Бк/кг до 1510 Бк/кг. Максимальное зарегистрированное значение почти на три порядка величины превышало региональную фоновую величину (около 2 Бк/кг), но было существенно ниже уровня вмешательства в питьевой воде (7600 Бк/кг, согласно НРБ-99/2009). По результатам настоящего исследования и данным, полученным ранее другими авторами, представилась возможность оценить время полужизни подземных и поверхностных вод от трития в период 2008–2019 гг. Средняя величина (\pm стандартная ошибка средней) эффективного периода полууменьшения удельной активности трития в рудничной воде, в воде из скважин и в речной воде равнялась $4,4 \pm 0,2$ года. Снижение концентрации трития в воде в большей мере зависело от экологических процессов (разбавление «чистой» водой), нежели от физического распада радионуклида. Оцененное значение эффективной дозы внутреннего облучения человека за счёт поступления трития в организм с питьевой водой из реки Кунийок в 2019 г. равнялось 0,17 мЗв, что было пренебрежимо мало по сравнению с допустимой дозой техногенного облучения населения 1 мЗв/год.

Ключевые слова: тритий, вода, мирный подземный ядерный взрыв, «Днепр», Мурманская область, Хибины, гора Куэльпор, река Кунийок, эффективная доза.

Introduction

Tritium (^3H or T), the only long-lived ($T_{1/2} = 12.3$ years) radioactive isotope of hydrogen, is ubiquitous on Earth in the atmosphere, hydrosphere and biosphere [1–3]. Tritium is a “soft” beta emitter (the maximum energy of beta particle = 18.6 keV). The tritium concentration in drinking water (in the form of HTO) is regulated by hygienic standards in many countries [4], including the Russian Federation (RF) [Norms of radiation safety (NRB-99/2009). Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2523-09. (hereinafter NRB-99/2009). (In Russian)].

At the present time, there are two main sources of tritium in the atmosphere and the hydrosphere (and subsequently in the human body): 1) natural processes (mainly the formation of ^3H in the upper atmosphere by the interaction of cosmic rays with nuclei of atoms, for instance, of nitrogen and oxygen); 2) the activities of nuclear fuel cycle (NFC) facilities [1–3].

The accidents at the Chernobyl nuclear power plant (1986) and the “Fukushima-1” nuclear power plant (2011) did not affect the annual average tritium content in the atmospheric precipitation water in the RF [5, 6], although at the regional level, directly in Japan, the tritium contamination associated with the Fukushima accident is still a real problem (for example, [7, 8]).

Once a powerful and absolutely dominant source of tritium, which was formed in the stratosphere during the period of nuclear (especially thermonuclear) explosions in the atmosphere (1945–1980) [2, 5], has already been practically depleted. After 2014 it had no significant influence on the dynamics of tritium content in atmospheric precipitation and in water of large rivers in the RF [6]. In 2015–2019, the annual mean activity concentration of tritium in precipitation and river water (outside the radioactive contamination zones), when

Введение

Тритий (^3H или T), единственный долгоживущий ($T_{1/2} = 12,3$ года) радиоактивный изотоп водорода, распространен повсеместно на Земле в окружающей среде – атмосфере, гидросфере и биосфере [1–3]. Тритий является сравнительно «мягким» чистым бета-излучателем (максимальная энергия частиц 18,59 кэВ). Содержание трития в питьевой воде (в форме НТО) регулируется гигиеническими нормативами во многих странах мира [4], включая Российскую Федерацию (РФ)¹.

В настоящее время есть два основных источника поступления трития в атмосферу и гидросферу (а затем и к человеку): 1) естественные процессы (в основном, образование ^3H в верхних слоях атмосферы при взаимодействии космического излучения с ядрами атомов, например, азота и кислорода); 2) деятельность предприятий ядерного топливного цикла (ЯТЦ) [1–3]. Аварии на Чернобыльской АЭС (1986 г.) и АЭС «Фукусима-1» (2011 г.) не сказались на среднегодовом содержании трития в воде атмосферных осадков на территории РФ [5, 6], хотя на региональном уровне, непосредственно в Японии, тритиевое загрязнение, связанное с Фукусимской аварией, до сих пор представляет реальную проблему [7, 8]. Некогда мощный и абсолютно доминировавший источник трития, который сформировался в стратосфере в период проведения ядерных (в особенности термоядерных) взрывов в атмосфере (1945–1980 гг.) [2, 5], уже практически истощился и после 2014 г. не оказывает заметного влияния на динамику содержания трития в атмосферных осадках и в воде крупных рек РФ [6]. В 2015–2019 г. усредненное по всей территории РФ среднегодовое содержание трития в осадках и в речной воде (за пределами зон радиоактивного загрязнения) колебалось в диапазоне 1,6–1,8 Бк/л и

¹ Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 г. № 47. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 14 августа 2009 г., регистрационный № 14534.

averaged over the whole territory of the RF, ranged from 1.6 to 1.8 Bq/l and from 1.6 to 1.9 Bq/l, respectively [6]. These values can be considered as modern background values in relation to the tritium content in atmospheric precipitation and surface waters of the RF.

In the zones of influence of operating NFC facilities, the tritium content in atmospheric precipitation, in surface and ground waters, and in drinking water can significantly exceed the “background” values [9–12]. In addition to operating NFC facilities, local or regional above-background tritium contamination may be associated with some sites of nuclear and radiation legacy [13] of the former USSR. Among these sites, a fairly large group of peaceful underground nuclear explosions (UNEs) sites occupies a certain niche. Currently, these sites have the status of “special radioactive waste disposal sites” in accordance with [Federal Norms and Rules on the Use of Atomic Energy “Requirements for Ensuring the Safety of Special Radioactive Waste Disposal Sites and Special Radioactive Waste Conservation Facilities” (NP-103-17). (In Russian)].

Totally, 81 UNEs were carried out on the territory of the RF within the framework of the USSR program No. 7 “Nuclear explosions for the national economy” [14–17]. The explosion sites are located on the territory of 19 constituent entities of the RF.

Background

Among the performed UNEs, the series of explosions of the “Dnepr” experiment (Mount Kuel’por, Khibiny Massif, Kola Peninsula, Murmansk Oblast, the RF, see Figs. 1 and 2) occupies a special place. Unlike all other UNEs, when the explosive charge was placed underground through a drilled hole, in the “Dnepr” series, the explosive device was loaded through a charging adit pierced into the mountain [15]. The purpose of the explosive impact was the crushing of the ore body (apatite minerals), followed by the extraction of the crushed rock onto the ground surface. Charges of a comparatively low power (1–3 kt of TNT equivalent) were created especially for this purpose. The basis of the charge

1,6–1,9 Бк/л соответственно [6]. Эти значения можно рассматривать в качестве современных фоновых величин в отношении содержания трития в атмосферных осадках и поверхностных водах на территории РФ.

В зонах влияния действующих предприятий ЯТЦ содержание трития в атмосферных осадках, в поверхностных и подземных водах и в питьевой воде может существенно превышать «фоновые» величины [9–12]. Помимо действующих предприятий ЯТЦ, локальное или региональное надфоновое загрязнение тритием может быть связано с некоторыми объектами ядерного и радиационного наследия [13] бывшего СССР. Среди этих объектов определенную нишу занимает довольно многочисленная группа мест проведения подземных мирных ядерных взрывов (МЯВ). В настоящее время эти объекты имеют статус – «пункт размещения особых радиоактивных отходов»².

Всего на территории РФ во времена существования СССР в рамках программы № 7 «Ядерные взрывы для народного хозяйства» был проведен 81 МЯВ [14–17]. Места проведения взрывов располагаются на территории 19 субъектов РФ.

История вопроса

Среди выполненных МЯВ серия взрывов эксперимента «Днепр» (гора Куэльпор, горный массив Хибин, Кольский полуостров, Мурманская область) занимает особое место (рис. 1, 2). В отличие от всех других МЯВ, когда заряд помещался под землю через пробуренную скважину, в серии «Днепр» загрузка взрывного устройства осуществлялась через зарядную штольню, пробитую внутрь горы [15]. Целью взрывного воздействия являлось дробление рудного тела (апатитовые минералы) с последующим извлечением раздробленной породы на земную поверхность. Специально для такого воздействия были созданы заряды сравнительно малой мощности (1–3 килотонны тротилового эквивалента). Основой зарядного устройства являлся «чистый» термоядерный узел, в котором использовалось газообразное термоядерное горючее [18]. Кроме того, технология проведения взрыва предусматривала малую



Fig. 1. Location the “Dnepr” peaceful underground nuclear explosions site (UNE “Dnepr”) in the Murmansk Oblast, Russia
[Рис. 1. Расположение места проведения мирных ядерных взрывов серии «Днепр» (UNE “Dnepr”) в Мурманской области России]

² Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Требования к обеспечению безопасности пунктов размещения особых радиоактивных отходов и пунктов консервации особых радиоактивных отходов» (НП-103-17). Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 10 октября 2017 г. № 418. Введены в действие с 14 ноября 2017 г.



Fig. 2. A view at Mount Kuel'por from the west. «UA» indicates the entrance into the upper (charging) adit. «D» indicates the dump of rock extracted during the construction of the upper adit

[Рис. 2.] Вид на гору Куэльпор с запада. «UA» обозначает вход в верхнюю (загрузочную) штольню. «D» обозначает отвал породы, извлеченной при строительстве верхней штольни]

was a “clean” thermonuclear device that contained a gaseous thermonuclear fuel [18]. In addition, the explosion technology provided for a low residual contamination with long-lived radionuclides of the extracted rock. Most of the unreacted fissile material and fission fragments escaped at the moment of explosion into the special burial chamber created in advance inside the mountain outside the expected fracture zone [15, 18].

The experiments on the impact on the ore body inside Mt. Kuel'por were carried out in 1972 (one explosion with a power of 2.1 kt) and in 1984 (two simultaneous explosions with a power of 1.8 kt each) [14]. According to Vasiliev [18], more than 85% and 94% of technogenic radionuclides went into the burial chamber during the first and second explosions, respectively. Later on, a haulage adit was drilled to the base of the ore body. About 400 thousand tons of apatite ore were extracted through the adit [14]. In 1990, the “Dnepr” experiment was completed, and the entrances to the upper (charging) and lower (haulage) adits were sealed off with concrete walls.

In general, the experiment “Dnepr” on the use of nuclear explosions for crushing ore was recognized as successful; in terms of radioactive contamination, the ore could be used without any restrictions [15, 18]. However, there were also other opinions [19]. The main problem that resulted from the explosions was the disruption of the surface of Mt. Kuel'por and the formation of deep fractures and cracks. As a result, rain and melt waters began to actively penetrate into the mountain. These waters also reached the place where up to 90% of technogenic radionuclides were concentrated [20]. The water that passed through the zone of radioactive contamination naturally flowed through the lower adit to the ground surface. In 1989–1992, the activity concentration (AC) of tritium in the mine water reached the level of 1.5×10^6 Bq/l that was higher by a factor of 10 compared to the intervention level (IL) of 1.5×10^5 Bq/l adopted for drinking water for a limited part of the public (category B) in the USSR during that period [21]. At the same time, the AC of ^{90}Sr (0.017 Bq/l) and $^{239,240}\text{Pu}$ (<0.02 Bq/l) in the mine water were much lower than the corresponding values of the IL [20].

A drainage and dilution system was constructed for controlled runoff of tritium-contaminated water from the lower adit down the slope of Mt. Kuel'por into the Kuniyok riverbed (see Fig. 3 and 4). The system included a water conduit made of concrete (conditionally upper and lower

остаточную загрязненность долгоживущими радионуклидами извлекаемой породы. Основная часть непрореагировавшего делящегося материала и осколков деления отходила в момент взрыва в специальную камеру захоронения, заранее созданную внутри горы за пределами формирования ожидаемой зоны трещиноватости [15, 18].

Эксперименты по воздействию на рудное тело внутри горы Куэльпор были проведены в 1972 г. (один взрыв мощностью 2,1 кт) и в 1984 г. (два одновременных взрыва мощностью по 1,8 кт) [14]. По оценкам участников эксперимента [18], в камеру захоронения ушло более 85% и 94% техногенных радионуклидов во время первого и второго этапа соответственно. Для извлечения породы к основанию рудного тела была пробита откаточная штольня, через которую на земную поверхность было извлечено около 400 000 тонн апатитовой руды [14]. В 1990 г. эксперимент «Днепр» был завершен и входы в верхнюю (зарядную) и нижнюю (откаточную) штольни были перекрыты бетонными стенками.

В целом, эксперимент «Днепр» по применению термоядерных взрывов для дробления руды был признан удачным; по показателям радиоактивного загрязнения руда могла быть использована без каких-либо ограничений [15, 18]. Однако имелись и другие мнения [19]. Основной проблемой, порожденной проведенными взрывами, было нарушение поверхности горы Куэльпор и образование глубоких разломов и трещин. В результате внутрь горы начали активно проникать дождевые и талые воды. Такие воды достигали и того места, где было сосредоточено до 90% техногенных радионуклидов, образовавшихся при взрывах [20]. Вода, прошедшая через зону радиоактивного загрязнения, естественным образом стекала в нижнюю штольню, а через нее и наружу в месте выхода штольни на поверхность. В 1989–1992 гг. объемная активность (ОА) трития в рудничной воде достигала величины $1,5 \times 10^6$ Бк/л, что в 10 раз превышало допустимый уровень содержания трития в питьевой воде ($1,5 \times 10^5$ Бк/л), установленный для ограниченной части населения (категория Б) в СССР в тот период [21]. В то же время значения ОА ^{90}Sr (0,017 Бк/л) и $^{239,240}\text{Pu}$ (<0,02 Бк/л) в рудничной воде были намного ниже уровней вмешательства [20].

Для контролируемого отвода загрязненной тритием воды из штольни вниз по склону горы Куэльпор в русло реки Кунийок была сооружена дренажно-разбавительная система (рис. 3, 4), включающая в себя водовод, сделанный из бетона (условно верхний и нижний колодцы), и ке-

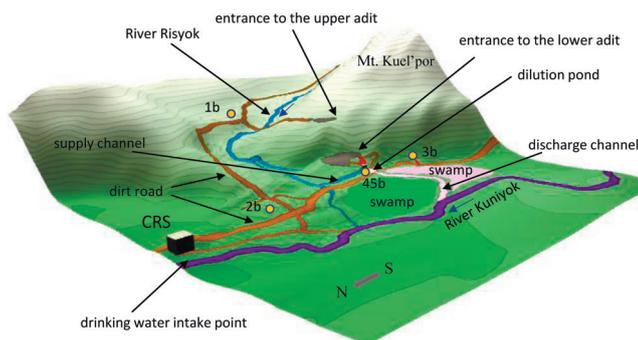


Fig. 3. A 3D schematic representation of the western slope of Mount Kuel'por and the Kuniyok River valley at the UNEs "Dnepr" site. Water boreholes are marked with circles. «CRS» indicates the Base of the control and rescue service of EMERCOM; 1b, 2b, 3b and 45b indicate water boreholes. The drawing is not scaled

[Рис. 3. Трехмерное схематическое изображение западного склона горы Куэльпор (Mt. Kuel'por) и долины реки Кунийок (River Kuniyok) в месте проведения МЯВ серии «Днепр». Водные скважины (1b, 2b, 3b и 45b) отмечены кружками: CRS – база контрольно-спасательной службы МЧС; swamp – болото; entrance to the upper adit – вход в верхнюю штольню; entrance to the lower adit – вход в нижнюю штольню; supply channel – подводящий канал; dilution pond – пруд разбавления; discharge channel – отводящий канал; dirt road – грунтовая дорога. Рисунок не масштабирован]

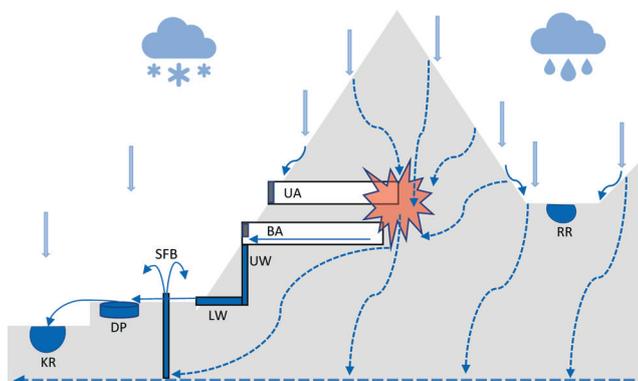


Fig. 4. A schematic representation of a vertical section of Mount Kuel'por at the site of the "Dnepr" UNEs (for the period 2008–2019). The zone of nuclear explosions and the accumulations of radioactive products are shown in red. Visible and known directions of water movement are indicated by solid blue arrows. Prospective directions of water movement are indicated by dotted blue arrows. UA – upper adit; BA – lower adit; UW – upper well; LW – lower well; SFB – self-flowing borehole No. 45; DP – dilution pond; KR – Kuniyok River; RR – Risyok River. The drawing is not scaled

[Рис. 4. Схематическое изображение вертикального среза горы Куэльпор в месте проведения МЯВ серии «Днепр» (на период 2008–2019 гг.). Зона ядерных взрывов и скопления радиоактивных продуктов взрывов показана красным цветом. Видимые и установленные направления движения воды обозначены сплошными синими стрелками. Предполагаемые направления движения воды обозначены пунктирными синими стрелками: UA – верхняя штольня; BA – нижняя штольня; UW – верхний колодец; LW – нижний колодец; SFB – самоизливающаяся скважина № 45; DP – пруд разбавления; KR – река Кунийок; RR – река Рисйок. Рисунок не масштабирован]

wells) and a large-diameter ceramic pipe. Before entering the Kuniyok River, the mine water was mixed with "pure" water in an artificial reservoir (storage/diluent pond). The "pure" water entered the pond through a supply channel dug between the Risyok River and the pond. The outflow of diluted mine water into the Kuniyok River occurred by gravity through another (discharge) channel. This system for drainage and dilution of the mine water was working very effectively. According to the survey of Kasatkin et al. [20], in 1999 AC of tritium in the mine water at the outlet of the lower adit reached 110,000 Bq/l. This value significantly exceeded the IL of 7700 Bq/kg adopted for drinking water at that time in the RF [21]. In the dilution pond, the AC of tritium (4000 Bq/l) was already lower compared to the IL. An additional natural dilution of the mine water occurred in the Kuniyok River down to a value of 340 Bq/l. By 2002, AC of tritium in the water flowing out of the adit through a water

рамическую трубу большого диаметра. Перед попаданием в реку Кунийок рудничная вода смешивалась с чистой водой в искусственном водоеме (пруд накопитель/разбавитель). Чистая вода поступала в пруд через подводящий канал, прорытый между рекой Рисйок и прудом. Отток разбавленной рудничной воды в реку Кунийок проходил самотеком через другой (отводящий) канал. Созданная система отвода и разбавления рудничной воды действовала весьма эффективно. По данным обследования В.В. Касаткина и др. [20], в 1999 г. ОА трития в рудничной воде на выходе из нижней штольни достигала величины 110 000 Бк/л, что существенно превышало уровень вмешательства (УВ) 7700 Бк/кг, принятый для питьевой воды на тот период времени в РФ [21]. В пруде-разбавителе ОА (4000 Бк/л) была уже ниже УВ. В реке Кунийок происходило дополнительное естественное разбавление руд-

conduit had significantly decreased, down to 32,000 Bq/l [22]. This value, however, was four times higher than the IL adopted for drinking water in the RF (7700 Bq/l [21]). The AC of tritium in the river water (120 Bq/l) was already significantly lower than the IL [22]. AC of ^{137}Cs and ^{90}Sr in all water samples (including mine waters) did not exceed 0.04 Bq/l, which was two orders of magnitude lower than the IL for ^{137}Cs (11 Bq/kg) and ^{90}Sr (5 Bq/kg) in drinking water, according to NRB-99/2009. That is, only tritium was the radioactive contaminant of concern for water quality at the "Dnepr" UNEs site.

Surveys carried out in 2008–2013 [16, 20, 23] revealed a tendency towards a gradual decrease in the AC of tritium in water samples from the "Dnepr" site. No increase in the contamination of surface and ground waters with ^{137}Cs and ^{90}Sr was found as well. At the same time, it was noted that a part of the drainage system was destroyed. This led to the continuous and uncontrolled spreading of mine waters over the ground surface at the base of Mt. Kuel'por [20].

Surveys carried out in previous years to estimate the levels of radioactive contamination of water with technogenic radionuclides were of practical importance, because the Kuniyok River valley and Mt. Kuel'por are popular tourist places. The river itself and its tributaries are sources of drinking water. It has been shown that information on the actual levels of contamination of water with tritium at the site of the UNEs was demanded by the public of the Murmansk Oblast and by tourists [23]. Therefore, regular monitoring surveys of water sources at the "Dnepr" UNEs site remain relevant at the present time.

The purpose of this study was to assess the drinkability of water from the sources of the Kuniyok River valley at the "Dnepr" UNEs site in terms of activity concentration of tritium. The research objectives were the following:

- to collect samples of water from wells, boreholes, rivers, streams, lakes and other accessible environmental waterbodies;
- to determine AC of tritium in the samples of water using a low-background scintillation beta-spectrometer;
- to compare the measurement data on the AC of tritium in the samples of water with the hygienic norms and with results of surveys performed by other researchers;
- to calculate the rate of decrease in AC of tritium in the waterbodies depending on time;
- to estimate the effective dose of internal exposure from ingestion of tritium with drinking water.

Materials and methods

The site of the UNEs "Dnepr" is located in a mountainous area at a distance of about 20 km north of the nearest large settlement Kirovsk, 130 km south of Murmansk, and 150 km east of the border with Finland (Fig. 1). The nearest NFC facility, the Kola nuclear power plant (Polyarnye Zori, Murmansk Oblast), is situated to the south-west from the UNEs site at a distance of approximately 60 km.

The main waterway in area under study is the Kuniyok (the other names: Kuna, Kuniok, Petremus) River (the watercourse length is 40 km; the catchment area is 341 km² [24]) (Figs. 3 and 5). The river flows from south to north at the western base of Mt. Kuel'por (max. elevation is 902 m) into Lake Gol'covoye. The tributary of the Kuniyok River is the Risyok River, which skirts Mt. Kuel'por from the north. Another tributary, the Partomyok River, flows into the Kuniyok River

ничной воды: до значения 340 Бк/л. К 2002 г. ОА трития в воде, вытекающей из штольни по водоводу, существенно снизилась – до 32 000 Бк/л [22]. Это значение, однако, в 4 раза превышало УВ, установленный для питьевой воды в РФ (7700 Бк/л [21]). В реке Кунийок уровень содержания трития (120 Бк/л) был уже существенно ниже УВ [22]. Значения объемной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr во всех водных пробах (включая рудничные воды) не превышали 0,04 Бк/л, что было на 2 порядка ниже УВ для ^{137}Cs (11 Бк/кг) и ^{90}Sr (5 Бк/кг) в питьевой воде, согласно НРБ-99/2009. То есть только тритий был тем радиоактивным загрязнителем, который вызывал беспокойство в отношении качества воды на объекте «Днепр» [22].

Обследования, выполненные в 2008–2013 гг. [16, 20, 23], выявили тенденцию к дальнейшему снижению содержания трития в водных пробах с объекта «Днепр» и отсутствие нарастания загрязнения подземных и поверхностных вод радионуклидами цезия и стронция. Одновременно было отмечено, что часть дренажной системы подверглась разрушению. Это привело к постоянному и неконтрольному растеканию рудничных вод по поверхности земли у основания горы Куэльпор [20].

Выполненные в предыдущие годы работы по оценке уровней радиоактивного загрязнения воды имели прямое прикладное значение, т.к. долина реки Кунийок и гора Куэльпор являются местами, которые активно посещаются туристами. Сама река и ее притоки являются источниками воды для питья. Как показали опросы, информация о реальных уровнях загрязнения тритием природных вод в месте проведения МЯВ востребована населением Мурманской области и туристами [23]. Поэтому регулярные мониторинговые обследования водных источников в месте проведения МЯВ «Днепр» остаются актуальным и в настоящее время.

Цель исследования – оценка пригодности для питья воды из источников долины реки Кунийок в месте проведения МЯВ серии «Днепр» по показателю удельной активности (УА) трития.

Задачи исследования

1. В 2019 г. отобрать пробы воды из колодцев, скважин, рек, ручьев, озер и других доступных водоносных объектов окружающей среды.
2. С помощью низкофонового сцинтилляционного бета-спектрометра определить содержание трития в пробах.
3. Сравнить полученные экспериментальные данные по содержанию трития в отобранных водных пробах с гигиеническим нормативом и с результатами исследований, выполненных другими авторами.
4. Вычислить скорость снижения УА трития в водных объектах в зависимости от времени.
5. Оценить эффективную дозу внутреннего облучения от трития при использовании воды для питья.

Материалы и методы

Место проведения МЯВ «Днепр» располагается в горной местности на расстоянии примерно 20 км к северу от ближайшего крупного населенного пункта (г. Кировск), в 130 км к югу от г. Мурманска и 150 км к востоку от границы с Финляндией (рис. 1). Ближайшее предприятие ЯТЦ –

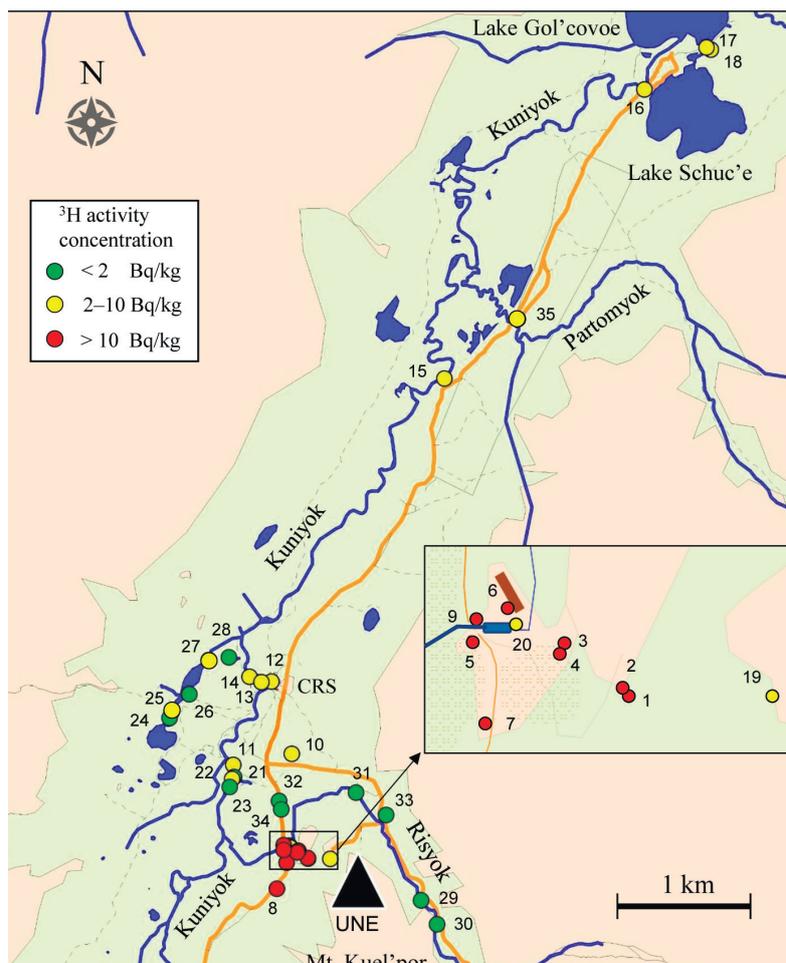


Fig. 5. Location of sampling points (circles) for determination of tritium activity concentration in water at the region of the “Dnepr” UNEs. UNE – the approximate place of the explosions is marked by the black triangle; CRS – Base of the control and rescue service of EMERCOM [Рис. 5. Расположение точек отбора проб (кружки) для определения удельной активности трития в воде в регионе проведения МЯВ серии «Днепр»: Mt. Kuel’por – гора Куэльпор; UNE – приблизительное место взрывов обозначено черным треугольником; CRS – база контрольно-спасательной службы МЧС; Kuniyok – река Кунийок; Risyok – река Рисйок; Partomyok – река Партомйок; Lake Gol’covoe – озеро Гольцовое; Lake Schuc’e – озеро Щучье; ^3H activity concentration – удельная активность ^3H ; Bq/kg – Бк/кг]

three kilometers north of the explosion site. In addition, there are many small streams and lakes in the valley of the Kuniyok River; the territory is swampy in places and mostly difficult to pass. Several dirt roads were built for the movement of people and vehicles. There is a tourist base approximately 1.5 km to the north of the explosions site. A hotel and the base of the control and rescue service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM of Russia) are located on its territory.

The Khibiny Massif is located beyond the Arctic Circle; the climatic conditions are harsh, subarctic. We did not come across exact quantitative data on the main weather conditions (temperature, amount of precipitation) concerning the very site of the “Dnepr” UNEs. Therefore, we present the ranges typical for the Khibiny Massif as a whole [25]. The annual mean long-term temperatures are negative and range from $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the valleys to $-(5-6)\text{ }^{\circ}\text{C}$ on the mountain plateaus. There are noticeable spatial variations in the annual total precipitation depending on the altitude: from 600–700 mm in the foothills and valleys up to 1600 mm on the mountain plateaus.

Кольская атомная электростанция (Полярные Зори, Мурманская область) – расположено на расстоянии около 60 км к юго-западу от площадки МЯВ.

Основной водной артерией является река Кунийок (другие названия Куна, Куниок, Петремус; длина водотока 40 км, водосборная площадь 341 км² [24]) (рис. 3 и 5), протекающая с юга на север у западного основания горы Куэльпор (максимальная высота горы 902 м). Река впадает в озеро Гольцовое. Притоком реки Кунийок является река Рисйок, которая огибает гору Куэльпор с севера. В 3 км к северу от места взрыва в реку Кунийок впадает река Партомйок. Кроме того, в долине реки Кунийок имеется много мелких ручьев и озер; территория местами заболочена и, в основном, труднопроходима. Для передвижения людей и транспортных средств было построено несколько грунтовых дорог. Примерно в 1,5 км к северу от места взрывов находится туристическая база, на территории которой располагается гостиница и база контрольно-спасательной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС России).

Precipitation is in the form of rain and snow. The rivers of the Khibiny have predominantly snow (melt) feeding.

The field survey of the Mt. Kuel'por and the Kuniyok River valley at the site of the "Dnepr" UNEs was performed in July 2019. A visual inspection revealed an intensive inflow of the mine water from the lower adit into the upper well and further through the drainage system into the diluent pond. At the same time, it was noted that due to mechanical damage of the pipe connecting the lower well and the dilution pond, a part of the mine water flowed out onto the road forming puddles (Fig. 6). Water from the puddles flowed into a swamp extending from the road to the Kuniyok River along the discharge channel (Fig. 3). A self-flowing borehole was found at the site next to the dilution pond. This borehole, designated No. 45 (Fig. 7),

Горный массив Хибины находится за Северным полярным кругом; климатические условия здесь суровые, субарктические. Точных количественных данных об основных погодных показателях (температура, количество осадков), касающихся самого места проведения МЯВ «Днепр», в доступных источниках нам не встретилось. Поэтому приводим диапазоны, характерные для массива Хибины в целом [25]. Значения среднегодовой многолетней температуры являются отрицательными и колеблются от -1°C в долинах до $-(5-6)^{\circ}\text{C}$ на горных плато. В Хибинах выпадает сравнительно много осадков. Отмечаются заметные пространственные вариации суммы годовых осадков в зависимости от высоты: от 600–700 мм в предгорьях и долинах до 1600 мм на горных плато.



Fig. 6. A puddle on the main dirt road where a portion of the mine water flows
[**Рис. 6.** Лужа на главной грунтовой дороге, куда стекает часть шахтной воды]



Fig. 7. Self-flowing borehole No. 45
[**Рис. 7.** Самоизливающаяся скважина № 45]

has been used by hydrogeologists for long-term monitoring of groundwater quality [26]. The water from the borehole spilled over the adjacent ground uncontrollably; a portion of the water flowed into the dilution pond. There were three more boreholes near the explosions site, conventionally numbered 1b, 2b, and 3b (Fig. 3). Water from the borehole 3b, located at the foot of Mt. Kuel'por, 400 m south of the borehole No. 45, flowed by gravity into the swamp on the opposite side of the main dirt road. In the available literature, we have not found data on the time of creation of these four boreholes and their depth.

Water samples were taken at 35 points (Table 1; Fig. 5) located both on the western slope of Mt. Kuel'por at the outlets of the upper and lower adits, and in the valleys of the Kuniyok and Risyok rivers. The location of the outflow of the mine water from the lower adit was used as a reference point (No. 1 in Table 1 and in Fig. 5). The sampling points were chosen so as to get a fairly complete picture of AC of tritium in: 1) groundwater flowing from the mine; 2) groundwater from boreholes; 3) water having mainly a direct surface origin (due to atmospheric precipitation). The last category included samples of river water (the Risyok, Kuniyok, and Partomyok rivers), water from streams, lakes and swamps, as well as a sample from the water streaks formed by condensation from atmospheric moisture on the surface of the Mt. Kuel'por slope. The samples in the valley of the Kuniyok River were taken downstream (south to north) of the confluence of the discharge channel to the river. The survey covered many of the places that were or could be used by people for taking water for drinking. In particular, the river water at the place of its intake for the needs of the local hotel was sampled (point 12 in Fig. 5). To evaluate the temporal dynamics of AC of tritium in waterbodies, the selection list included nine places (No. 2, 3, 6, 8, 12, 19, 20, 29, 33 in Table 1 and Fig. 5) that had been surveyed by expeditions of the Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev [23] to study AC of tritium in water in 2008 and 2013. During the 2008, 2013, and 2019 surveys, water samples were taken at the same time of the year, namely in the second half of July.

The water samples were taken into 200 ml plastic vessels and acidified with concentrated nitric acid to pH of 3–4. The pH level was checked using a universal indicator paper PND 50-975-84. The vessels were hermetically sealed and delivered to the laboratory.

Water samples were freed from chemical impurities by distillation. 10 ml of the distillate were further mixed with the same amount of the commercially available OptiPhase HiSafe 3 scintillant ("PerkinElmer, Inc.", the USA) in 20 ml plastic vials to form a measurement sample. The vials were tightly covered with lids and shaken. Before counting, the vials were stored in the cooled measuring chamber of the low-background alpha-beta-radiation spectrometer Quantulus 1220 ("PerkinElmer Life Sciences/Wallac Oy", Finland) for at least 12 hours. The background sample was prepared from artesian bottled water according to the same method.

Determination of the conversion coefficient from the counting rate to the AC of tritium in the sample was carried out using calibration samples prepared from a reference (standard) solution. The AC of tritium in the solution was of 100,000 Bq/l at the date of manufacture. The declared uncertainty of the AC value was no more than 5% (95% probability).

The duration of measurements of the samples in the Quantulus 1220 system was at least 360 min. The number of

Осадки выпадают в форме дождя и снега. Реки Хибин имеют преимущественно снеговое (талое) питание.

Наземное обследование горы Куэльпор и долины реки Кунийок в месте проведения МЯВ «Днепр» было проведено в июле 2019 г. Визуальный осмотр обнаружил интенсивное поступление рудничной воды из нижней штольни в верхний колодец и далее по дренажной системе в пруд-разбавитель. При этом отмечено, что в результате механического повреждения трубы, идущей от нижнего колодца к пруду-разбавителю, часть рудничной воды вытекает на дорогу, образуя лужи (рис. 6). Из луж вода стекает в болото, простирающееся от дороги до реки Кунийок вдоль отводного канала (рис. 3). На площадке рядом с прудом-разбавителем имеется самоизливающаяся скважина. Эта скважина, обозначаемая № 45 (рис. 7), используется гидрогеологами для долговременного мониторинга качества подземных вод [26]. Вода из скважины растекается по прилегающей территории бесконтрольно; часть воды попадает в пруд-разбавитель. Вблизи от места проведения взрыва находятся еще 3 скважины, имеющие условные номера 1b, 2b и 3b (рис. 3). Вода из скважины 3b, расположенной у подножья горы Куэльпор в 400 м югу от самоизливающейся скважины № 45, самотеком поступает в болото. В доступной литературе нам не встретились данные о времени создания этих 4 скважин и их глубине.

Отбор проб воды был проведен в 35 точках (табл. 1; рис. 5), расположенных как на западном склоне горы Куэльпор у выходов из верхней и нижней штольни, так и в долинах рек Кунийок и Рисйок. Место истечения рудничных вод из нижней штольни взято в качестве опорной точки (№ 1 в табл. 1 и на рис. 5). Точки пробоотбора были выбраны таким образом, чтобы получить достаточно полное представление о содержании трития в: 1) подземной воде, вытекающей из рудника; 2) подземной воде из скважин; 3) воде, имеющей преимущественно поверхностное происхождение (за счет атмосферных осадков). В последнюю категорию вошли пробы речной воды (реки Рисйок, Кунийок и Партомйок), воды из ручьев, озер и болот, а также водных потоков, формирующихся путем конденсации из атмосферной влаги на поверхности склона горы Куэльпор. Отбор проб в долине реки Кунийок был проведен вниз по течению реки (с юга на север) от места впадения отводящего канала. Обследованием были охвачены многие из тех мест, которые использовались или могли использоваться человеком для забора питьевой воды. В частности, была исследована речная вода в месте ее забора для нужд местной гостиницы (точка 12 на рис. 5). Для оценки временной динамики УА трития в водных объектах в перечень отбора были включены 9 точек (№ 2, 3, 6, 8, 12, 19, 20, 29, 33), опробованных экспедициями Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены им. профессора П.В. Рамзаева [23] для исследования содержания трития в воде в 2008 и 2013 гг. (рис. 5 и табл. 1). Отбор проб при обследованиях 2008, 2013 и 2019 гг. проводили в один и тот же период времени – в июле.

Водные пробы отбирали в чистые пластиковые емкости объемом 0,2 л и подкисляли концентрированной азотной кислотой до уровня pH 3–4. Значение pH проверяли с помощью универсальной индикаторной бумаги ПНД 50-975-84. Емкости с пробами герметично закрывали и доставляли в лабораторию.

Table 1

Activity concentration of tritium (AC) in water samples collected at the “Dnepr” UNEs site in 2019

[Таблица 1

Удельная активность трития (УА) в пробах воды, отобранных в 2019 г. в месте проведения МЯВ «Днепр»]

No.* [№*]	Location [Локация]	Distance from point No. 1 (m) [Расстояние от точки № 1 (м)]	Altitude above sea level (m) [Высота над уровнем морья (м)]	Latitude (° N) [Широта (° с.ш.)]	Longitude (° E) [Долгота (° в.д.)]	Form of water ap- pearance [Форма водопроявления]	Main source of water [Основной источник воды]	AC (Bq/kg) [УА (Бк/кг)]
1	Entrance to the lower adit [Вход в нижнюю штольню]	0	333	67.79111	33.60778	running [Текущая]	adit [Штольня]	1260 ± 190
2	Upper well [Верхний колодец]	23	322	67.79115	33.60722	running [Текущая]	adit [Штольня]	1210 ± 180
3	Lower well [Нижний колодец]	88	302	67.79160	33.60615	running [Текущая]	adit [Штольня]	1270 ± 190
4	Puddle near lower well [Лужа около нижнего колодца]	88	301	67.79150	33.60596	still [Стоячая]	adit [Штольня]	934 ± 140
5	Puddle on road [Лужа на дороге]	183	293	67.79166	33.60369	still [Стоячая]	adit [Штольня]	1190 ± 180
6	Borehole No. 45 [Скважина № 45]	162	295	67.79193	33.60463	running [Текущая]	borehole [Скважина]	490 ± 74
7	Underground cistern [Подземная цистерна]	156	298	67.79085	33.60417	still [Стоячая]	adit [Штольня]	303 ± 49
8	Borehole-3b [Скважина 3b]	305	303	67.78920	33.60258	running [Текущая]	borehole [Скважина]	1510 ± 230
9	Discharge chan- nel [Отводящий канал]	197	292	67.79196	33.60370	running [Текущая]	surface [Поверхность]	16.9 ± 4.6
10	Borehole-2b [Скважина 2b]	750	298	67.79770	33.67440	running [Текущая]	borehole [Скважина]	5.0 ± 1.0
11	Kuniyok River [Река Кунийок]	750	277	67.79707	33.59528	running [Текущая]	surface [Поверхность]	5.5 ± 1.0
12	Kuniyok River [Река Кунийок]	1280	266	67.80237	33.60164	running [Текущая]	surface [Поверхность]	5.5 ± 0.9
13	Left bank of the Kuniyok River [Левый берег реки Кунийок]	1290	265	67.80234	33.59997	still [Стоячая]	surface [Поверхность]	6.2 ± 1.1
14	Left bank of the Kuniyok River [Левый берег реки Кунийок]	1350	264	67.80234	33.59997	still [Стоячая]	surface [Поверхность]	6.3 ± 1.1
15	Kuniyok River [Река Кунийок]	3540	232	67.82164	33.63057	running [Текущая]	surface [Поверхность]	6.9 ± 1.1
16	Kuniyok River [Река Кунийок]	5950	210	67.84002	33.66400	running [Текущая]	surface [Поверхность]	4.7 ± 0.8
17	Lake Gol'covoie [Озеро Гольцовое]	6400	208	67.84256	33.67511	still [Стоячая]	surface [Поверхность]	5.6 ± 1.0
18	Lake Gol'covoie [Озеро Гольцовое]	6400	208	67.84270	33.67440	still [Стоячая]	surface [Поверхность]	5.3 ± 1.7

No. * [№ *]	Location [Локация]	Distance from point No. 1 (m) [Расстояние от точки № 1 (м)]	Altitude above sea level (m) [Высота над уровнем моря (м)]	Latitude (° N) [Широта (° с.ш.)]	Longitude (° E) [Долгота (° в.д.)]	Form of water appearance [Форма водопоявления]	Main source of water [Основной источник воды]	AC (Bq/kg) [УА (Бк/кг)]
19	Slope above the entrance to the upper adit [Склон над входом в верхнюю штольню]	156	380	67.79110	33.61147	running [Текущая]	surface [Поверхность]	2.2 ± 0.9
20	Supply channel [Подводящий канал]	146	296	67.79181	33.60484	running [Текущая]	surface [Поверхность]	2.5 ± 0.9
21	Spring near the edge of swamp [Ручей на краю болота]	780	278	67.79618	33.59507	running [Текущая]	surface [Поверхность]	2.8 ± 0.9
22	Risyok River [Река Рисйок]	780	278	67.79630	33.59538	running [Текущая]	surface [Поверхность]	<2
23	Edge of swamp [Край болота]	752	278	67.79567	33.59466	still [Стоячая]	surface [Поверхность]	<2
24	Unnamed spring [Безымянный ручей]	1420	280	67.80045	33.58495	running [Текущая]	surface [Поверхность]	<2
25	Unnamed lake [Безымянное озеро]	1400	280	67.80006	33.58463	still [Стоячая]	surface [Поверхность]	2.5 ± 0.8
26	Unnamed lake [Безымянное озеро]	1430	278	67.80156	33.58790	still [Стоячая]	surface [Поверхность]	<2
27	Unnamed spring [Безымянный ручей]	1570	2576	67.80373	33.59117	running [Текущая]	surface [Поверхность]	2.1 ± 0.7
28	Unnamed spring [Безымянный ручей]	1530	263	67.80391	33.59454	running [Текущая]	surface [Поверхность]	<2
29	Risyok River [Река Рисйок]	850	386	67.78846	33.62669	running [Текущая]	surface [Поверхность]	<2
30	Risyok River [Река Рисйок]	1020	403	67.78693	33.62935	running [Текущая]	surface [Поверхность]	<2
31	Risyok River [Река Рисйок]	585	334	67.79530	33.61578	running [Текущая]	surface [Поверхность]	<2
32	Risyok River [Река Рисйок]	450	289	67.79477	33.60294	running [Текущая]	surface [Поверхность]	<2
33	Borehole-1b [Скважина 1b]	635	358	67.79388	33.62083	running [Текущая]	borehole [Скважина]	<2
34	Unnamed pond [Безымянный пруд]	400	288	67.79424	33.60330	still [Стоячая]	surface [Поверхность]	<2
35	Partomyok River [Река Партомйок]	4100	226	67.82543	33.64284	running [Текущая]	surface [Поверхность]	3.3 ± 0.8

* – number corresponds to the number of the sampling point shown in Fig. 5.

[* – номер соответствует номеру точки отбора проб, указанному на рис. 5.]

pulses counted in the channels from 40th to 200th was used for further calculations. The 200th channel corresponded to the energy equal to approximately 20 keV.

The AC of tritium in a measurement sample (C_{TNO} , Bq/l) was calculated using the equation:

$$C_{TNO} = (N_{smp} - N_b) \times K, \quad (1)$$

where N_{smp} is the counting rate for the measurement sample, pulse/min; N_b is the counting rate for the background sample, pulse/min; K is the conversion coefficient, (Bq/l)/(pulse/min).

The relative error in determining the counting rate CE (%) was calculated with the formula:

$$CE = 2 \times \sqrt{\frac{N_b + N_{smp}}{T_b + T_{smp}}} \times 100, \quad (2)$$

where T_{smp} and T_b is the duration of measurement of a measurement sample and a background sample, respectively, min; N_{smp} and N_b is the counting rate of a measurement sample and a background sample, respectively, pulse/min.

AC of tritium in a water sample was calculated as the arithmetic mean of AC of tritium in three measurement samples prepared from this water sample.

The overall uncertainty of the measurement (95% probability) was calculated considering the statistical uncertainty of the number of pulses counted in the channels from 40th to 200th, the non-excluded systematic uncertainty of the determination of the conversion coefficient (5%), the uncertainty of the AC of tritium in the reference solution (5%), and the uncertainty associated with the preparation of measurement sample (2%).

To calculate the minimum detectable activity concentration (MDA , Bq/l), we used the formula suitable for a low-background radiometric device [27]:

$$MDA = \frac{2.7 + 4.65 \times \sqrt{R_b \times T_b}}{60 \times \varepsilon \times T_b \times V}, \quad (3)$$

where R_b is the counting rate of background sample, pulse/min; T_b is the background measurement time, min; ε is the efficiency, pulse/Bq; V is the volume of water in a measurement sample (0.01 l).

For the measurement time, T_b , of 360 min, the MDA was 2 Bq/l.

Considering that the IL for drinking water in the current NRB-99/2009 is expressed as activity concentration in Bq/kg units, results of our study are also presented in the same units. The density of water at 20 °C was taken equal to 1.00 g/cm³ (rounded from 0.9982 g/cm³ [28]).

The effective dose due to ingestion of tritium with drinking water was estimated for two groups of population: local hotel staff and tourists. For a conservative dose estimate it was assumed that the hotel staff stayed in the surveyed area continuously for 11 months (335 days) a year, since their accommodation was located in the hotel building. The staff consumed water from the Kuniyok River. The tourists stayed near the site of the UNEs for 14 days and consumed water from the self-flowing borehole No. 45. The daily water consumption for

Для подготовки счетных образцов пробы воды освобождали от химических примесей посредством дистилляции. Счетные образцы готовили в пластиковых виалах объемом 20 мл путем смешивания 10 мл коммерческого сцинтилляционного коктейля OptiPhase HiSafe 3 (фирма «PerkinElmer, Inc.», США) и такого же количества дистиллята. Виалы плотно закрывали крышками, встряхивали и помещали в охлажденную измерительную камеру низкофонового спектрометрического радиометра альфа-, бета-излучения Quantulus 1220 (фирма «PerkinElmer Life Sciences/Wallac Oy», Финляндия), где выдерживали перед измерением не менее 12 ч. Фоновый образец готовили из артезианской бутилированной воды после дистилляции по той же схеме.

Расчет градуировочного коэффициента связи УА трития в счетном образце со скоростью счета импульсов проводили по калибровочным образцам, приготовленным из образцового (эталонного) раствора объемом 100 мл с объемной активностью трития на дату изготовления 100 000 Бк/л с ошибкой не более 5% (95% вероятность).

Длительность измерений составляла не менее 360 мин. Подсчет числа импульсов фонового, калибровочного и счетных образцов проводили в каналах с 40 по 200; при этом 200-й канал соответствовал энергии излучения, равной приблизительно 20 кэВ.

Объемную активность счетного образца C_{TNO} (Бк/л) определяли по формуле:

$$C_{TNO} = (N_{smp} - N_b) \times K, \quad (1)$$

где N_{smp} – скорость счета счетного образца с фоном, имп./мин; N_b – скорость счета фонового образца, имп./мин; K – градуировочный коэффициент, (Бк/л)/(имп./мин).

Ошибку определения скорости счета импульсов счетного образца (CE ,%) рассчитывали по формуле:

$$CE = 2 \times \sqrt{\frac{N_b + N_{smp}}{T_b + T_{smp}}} \times 100, \quad (2)$$

где T_{smp} и T_b – время измерений счетного и фонового образца соответственно, мин; N_{smp} и N_b – скорость счета счетного и фонового образца соответственно, имп./мин.

Объемную активность трития в пробе определяли как среднее арифметическое из результатов измерений 3 счетных образцов, приготовленных из данной пробы.

Общую неопределенность ($P = 0,95$) измерения объемной активности рассчитывали с учетом статистической неопределенности подсчета числа импульсов в окне, неисключаемой систематической неопределенности оценки градуировочного коэффициента (5%), неопределенности заявленного значения активности трития в эталонном растворе (5%) и неопределенности, связанной с приготовлением счетного образца (2%).

Для вычисления минимально детектируемой удельной активности (MDA , Бк/л) использовали формулу, пригодную для низкофонового радиометрического устройства [27]:

$$MDA = \frac{2.7 + 4.65 \times \sqrt{R_b \times T_b}}{60 \times \varepsilon \times T_b \times V}, \quad (3)$$

где R_b – скорость счета фонового образца, имп./мин; T_b – продолжительность измерения фонового образца,

both groups was equal to 2 kg (2 l). This value is used in NRB-99/2009 to estimate internal doses to adults. To calculate the annual effective dose for the i -th group (E_i , $\mu\text{Sv}/\text{year}$), the following expression was used:

$$E_i = n_i \times m \times AC_i \times DC \times 10^{-6}, \quad (4)$$

where n_i is the duration of water consumption for the i -th group, day; m is the daily water consumption, kg/day; AC_i is the AC of tritium in water consumed by the i -th group (Bq/kg); DC is the dose coefficient (equal to 4.8×10^{-11} Sv/Bq for tritium, according NRB-99/2009); 10^{-6} is the conversion factor from Sv to μSv .

Microsoft Excel was used for statistical calculations and data plots. Linear regression was applied for analysis of temporal trends. The non-parametric Mann-Whitney U test was used to compare two independent samples.

Results and discussion

The AC of tritium in water samples varied in a very wide range: from less than 2 Bq/kg up to 1510 Bq/kg (see Table 1).

At the sampling sites located in the Risyok riverbed, along streams and lakes on the left bank of the Kuniyok River, AC of tritium did not exceed 2.5 Bq/kg; in most of these samples the AC was below the MDA (2 Bq/kg). All these waterbodies are constantly replenished and renewed by atmospheric precipitation and obviously have no direct connection with the water flow from the lower adit in Mt. Kuel'por. Hence, 2 Bq/kg can be considered as a value close to an average background AC of tritium in surface waters in the studied area. This value is generally in reasonable agreement with the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring of Russia (Roshydromet) data obtained in 2019 in the RF [6]. The annual average values of AC of tritium in atmospheric precipitation for the entire territory of the RF and in water of the main rivers of the RF outside the radioactively contaminated zones were 1.78 Bq/l (1.15–2.42 Bq/l) and 1.62 Bq/l (0.9–2.2 Bq/l), respectively. The annual average AC of tritium in atmospheric precipitation in Murmansk in 2019 was 1.3 Bq/l, which was lower compared to the average value for the RF as a whole. AC of tritium in water of two main rivers located in the northern part of the European territory of the RF, the Severnaya (Northern) Dvina River (sampled in Arkhangelsk city) and the Pechora River (sampled in Naryan-Mar city) was 1.2 Bq/l and 1.4 Bq/l, respectively. These values were also lower than the average value for the main rivers of the RF.

The AC of tritium (1260 Bq/kg) in groundwater coming from the mine through the outlet from the lower adit was about three orders of magnitude higher compared to the AC of tritium in atmospheric precipitation in Murmansk. No changes in AC of tritium were observed as the mine water flowed through the wells. At the exit place from the diluent pond (point 9 in Fig. 5), AC of tritium in the mine water sharply decreased (to 17 Bq/kg) due to dilution with "pure" water (AC of tritium was equal to 2.5 Bq/kg) entering through the supply channel (point 20 in Fig. 5). AC of tritium further decreased to 5.5 Bq/kg in the water of the Kuniyok River below the outlet of the discharge channel (point 11 in Fig. 5). No further decrease of AC of tritium in the water downstream of the Kuniyok River (points 12–16) was observed. The AC of tritium (5.3 and 5.6 Bq/kg) in water sampled on the southern shore of the Lake Gol'covoe (points 17 and 18) was similar to that in the Kuniyok River water.

мин; ε – эффективность, имп./Бк; V – объем воды в счетном образце (0,01 л).

При продолжительности измерений 360 минут MDA была равна 2 Бк/л.

Учитывая то обстоятельство, что в действующих НРБ-99/2009 уровень вмешательства для питьевой воды имеет размерность Бк/кг (удельная активность, УА), полученные результаты также приводятся в этой же размерности. Плотность воды при 20 °С была принята равной 1,00 г/см³ (округлено от 0,9982 г/см³ [28]).

Эффективная доза облучения от поступления трития с питьевой водой была оценена для 2 групп населения: работники местной гостиницы и туристы. Для консервативной оценки предполагали, что работники гостиницы постоянно находились на обследованной территории в течение 11 месяцев (335 дней) в году, т.к. служебное жилье размещалось в здании гостиницы. Они постоянно потребляли воду из реки Кунийок. Туристы находились вблизи места проведения МЯВ в течение 14 дней и потребляли воду из самоизливающейся скважины № 45. Суточное потребление питьевой воды для обеих групп принято равным 2 кг (2 л). Это значение используется в НРБ-99/2009 для расчета доз внутреннего облучения взрослого человека. Для вычисления годовой эффективной дозы для i -й группы (E_i , мкЗв/год) использовали следующее выражение:

$$E_i = n_i \times m \times AC_i \times DC \times 10^{-6}, \quad (4)$$

где n_i – продолжительность потребления воды для i -й группы (день); m – масса ежедневно потребляемой воды; AC_i – удельная активность трития в воде, потребляемой i -той группой (Бк/кг); DC – дозовый коэффициент (для трития он равен $4,8 \times 10^{-11}$ Зв/Бк по НРБ-99/2009); 10^{-6} – коэффициент пересчета Зв в мкЗв.

Для статистических расчетов и построения графиков использовали Microsoft Excel. Для анализа временных трендов УА трития в воде применяли метод линейной регрессии. Сравнение двух независимых выборок проводили с помощью непараметрического U-критерия Манна – Уитни.

Результаты и обсуждение

Значения УА трития в отобранных пробах воды находились в весьма широком диапазоне: от <2 Бк/кг до 1510 Бк/кг (табл. 1). В точках, которые были расположены в русле реки Рисйок, на ручьях и озерах левого берега реки Кунийок, УА не превышала величины 2,5 Бк/кг; для большинства из этих проб содержание трития было ниже уровня MDA (2 Бк/кг). Все эти водные тела постоянно пополняются и обновляются за счет атмосферных осадков и, очевидно, не имеют прямой связи с водотоком из нижней штольни горы Куэльпор. Поэтому величину 2 Бк/кг можно рассматривать в качестве значения, близкого к среднему фоновому содержанию трития в воде поверхностных водоемов зоны нашего обследования. Эта величина, в целом, разумно согласуется с данными Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), полученными в 2019 г. в РФ [6]. Среднегодовые значения содержания трития в атмосферных осадках для всей территории России и в воде основных рек России вне загрязненных зон составили

AC of tritium in the portion of the mine water that flowed over the territory as a result of partial destruction of the drainage system (specifically, a puddle on the road, point 4 in Fig. 5) was 1190 Bq/kg and similar to that at the exit point from the lower adit (1260 Bq/kg). It indicated that there was no source (in particular, rain) to dilute this portion of the mine water near the foot of Mt. Kuel'por during the sampling period.

The boreholes near the UNEs site differed very significantly from each other in terms of AC of tritium in groundwater. AC of tritium in water from the borehole 1b (point 33 in Fig. 5) located to the north of the outlet from the lower adit outside the foot of Mt. Kuel'por was below the MDA (2 Bq/kg). Obviously, the aquifer that fed this borehole did not have a direct connection with the mine of Mt. Kuel'por. The highest AC (1510 Bq/kg) was measured in water from the borehole 3b (point 8 in Fig. 5) located directly at the base of Mt. Kuel'por. It was not lower compared to that in water flowing out through the lower adit (1260 Bq/kg). This could indicate that the borehole 3b was fed from an aquifer saturated with contaminated mine water. The AC of tritium in water from the self-flowing borehole No. 45 (490 Bq/kg) was three times lower than that from the borehole 3b. It seems that the borehole No. 45 was fed from the aquifer where a mixing of contaminated mine's water and pure groundwater of other genesis was occurring. The AC of tritium in water from the borehole 2b (5.0 Bq/kg) slightly exceeded the background values of ~2 Bq/kg. Apparently, the aquifer that fed this borehole also had some kind of connection with the mine of Mt. Kuel'por.

The AC of tritium in water flowing down the surface of the stones above the exit of the upper adit was 2.2 Bq/kg and barely exceeded the MDA.

In all water samples taken at the site of the "Dnepr" UNEs in 2019, the AC of tritium was significantly lower than the IL for drinking water (7600 Bq/kg, according to NRB-99/2009). In addition, the AC values for reference locations and samples (mine water, water from boreholes No. 45 and 3b, and water from the Kuniyok River) in 2019 were significantly lower than those in 2013 and, in particular, in 2008 (Table 2). The time-dependent change in AC of tritium in water from these points (examples are given in Fig. 8) can be well described with a negative exponential dependence:

$$AC_t = AC_0 \times \exp(-\lambda_{eff} \times t), \quad (5)$$

where AC_t is the AC of tritium (Bq/kg) at the time t ; AC_0 is the AC of tritium (Bq/kg) at zero time point (July 25, 2008); λ_{eff} is the empirical constant of effective decrease of AC (year^{-1}); t is time (year).

The constant λ_{eff} can be represented as the sum of two components: the decay constant, λ_{phys} (0.0563 year^{-1} for tritium), and the constant of decrease of AC of tritium due to all ecological processes (λ_{eco} , year^{-1}). Accordingly, λ_{eco} is calculated as:

$$\lambda_{eco} = \lambda_{eff} - \lambda_{phys}, \quad (6)$$

Using the λ_{eff} values, we calculated the effective half-time (T_{eff} , year) of tritium in water with the formula:

$$T_{eff} = \frac{\ln 2}{\lambda_{eff}}. \quad (7)$$

The ecological half-time (T_{eco} , year) of tritium in water was calculated in a similar way:

1,78 Бк/л (диапазон = 1,15–2,42 Бк/л) и 1,62 Бк/л (диапазон = 0,9–2,2 Бк/л) соответственно. Среднегодовое значение трития в атмосферных осадках в г. Мурманске в 2019 г. было равно 1,3 Бк/л, что ниже среднего по России в целом. Концентрация трития в воде двух основных рек, расположенных в северной части европейской территории России (Северная Двина (г. Архангельск) и Печора (г. Нарьян-Мар)), равнялась 1,2 Бк/л и 1,4 Бк/л соответственно, что также ниже среднего показателя для основных рек РФ.

Значение УА трития (1260 Бк/кг) в подземной воде, поступающей из рудника через выход из нижней штольни, было примерно на 3 порядка выше, чем значение УА трития в атмосферных осадках в Мурманске. При продвижении рудничной воды по колодцам не отмечалось изменения концентрации трития. На выходе из пруда-разбавителя (точка 9 на рис. 5) УА трития в воде резко снизилась (до 17 Бк/кг) за счет разбавления «чистой» водой (с УА трития, равной 2,5 Бк/кг), поступающей через подводящий канал (точка 20 на рис. 5). В воде реки Кунийок ниже выхода отводящего канала концентрация трития дополнительно уменьшилась до 5,5 Бк/кг (точка 11 на рис. 5). Ниже по течению (точки 12–16) дальнейшего снижения УА трития в воде реки Кунийок не наблюдалось. У южного берега озера Гольцовое (точки 17 и 18 на рис. 5) УА трития (5,3–5,6 Бк/кг) была аналогична таковой в реке Кунийок.

Рудничная вода, растекающаяся по территории в результате частичного разрушения дренажной системы (лужа на дороге, точка 4 на рис. 5), имела УА, сходную с таковой на выходе из нижней штольни. Это свидетельствовало об отсутствии источника (в частности, дождя) для разбавления этой части рудничной воды у подножья горы Куэльпор в период пробоотбора.

Скважины, находящиеся около места проведения МЯВ, весьма существенно различались между собой по показателю УА трития в подземной воде. Вода из скважины 1b, расположенной к северу от выхода из нижней штольни за пределами подножья горы Куэльпор, не содержала измеримой активности трития (УА <2 Бк/кг). Очевидно, что горизонт питания этой скважины не имеет непосредственной связи с рудником горы Куэльпор. Наибольшее значение УА (1510 Бк/кг) было зарегистрировано в скважине 3b (точка 8), расположенной непосредственно у основания горы Куэльпор. УА трития в воде из этой скважины была не ниже значения УА в воде, вытекающей через нижнюю штольню (1260 Бк/кг), что могло свидетельствовать о питании скважины 3b из подземного горизонта, насыщенного исключительно загрязненной рудничной водой. Значение УА трития в воде из самоизливающейся скважины № 45 (490 Бк/кг) было в 3 раза ниже соответствующего показателя для скважины 3b. Очевидно, что питание скважины № 45 происходит из подземного горизонта, в котором имеет место смешивание загрязненной рудничной воды и чистых подземных вод иного генеза. УА трития в воде из скважины 2b (5 Бк/кг) несколько превышала фоновые значения. Повидимому, горизонт питания этой скважины также имеет какую-то связь с рудником горы Куэльпор.

Вода, стекающая по поверхности камней над местом выхода верхней штольни, содержала тритий на уровне ($2,2 \pm 0,9$ Бк/кг), который едва превышал предел детектирования.

Table 2

Activity concentration of tritium (AC) in water samples collected in certain locations at the “Dnepr” UNEs site in 2008, 2013, and 2019 [23; this study]

[Таблица 2

Удельная активность трития (УА) в пробах воды, отобранных в определенных точках в 2008, 2013 и 2019 гг. в месте проведения МЯВ «Днепр» [23; данная работа]]

No.* [№*]	Location [Локация]	Main source of water [Основной источник воды]	AC (Bq/kg) [УА (Бк/кг)]		
			2008	2013	2019
2	Upper well [Верхний колодец]	adit [Штольня]	7500 ± 800	3655 ± 146	1210 ± 180
3	Lower well [Нижний колодец]	adit [Штольня]	7500 ± 800	3791 ± 151	1270 ± 190
6	Borehole No. 45 [Скважина № 45]	borehole [Скважина]	2900 ± 300	1556 ± 93	490 ± 74
8	Borehole-3b [Скважина 3b]	borehole [Скважина]	8700 ± 900	4506 ± 135	1510 ± 230
12	Kuniyok River [Река Кунийок]	surface [Поверхность]	24 ± 3	14.5 ± 0.5	5.5 ± 0.9
19	Slope above the entrance to the upper adit [Склон над входом в верхнюю штольню]	surface [Поверхность]	6.8 ± 1.4	<2	2.2 ± 0.9
20	Supply channel [Подводящий канал]	surface [Поверхность]	5.6 ± 1.3	<2	2.5 ± 0.9
29	Risyok River [Река Рисийок]	surface [Поверхность]	3.6 ± 1.3	<2	<2
33	Borehole-1b [Скважина 1b]	borehole [Скважина]	2.1 ± 1.2	2.0 ± 0.8	<2

* – number corresponds to the number of the sampling point shown in Fig. 5 and Table 1.

[* – номер соответствует номеру точки отбора проб, указанному на рис. 5 и в табл. 1].

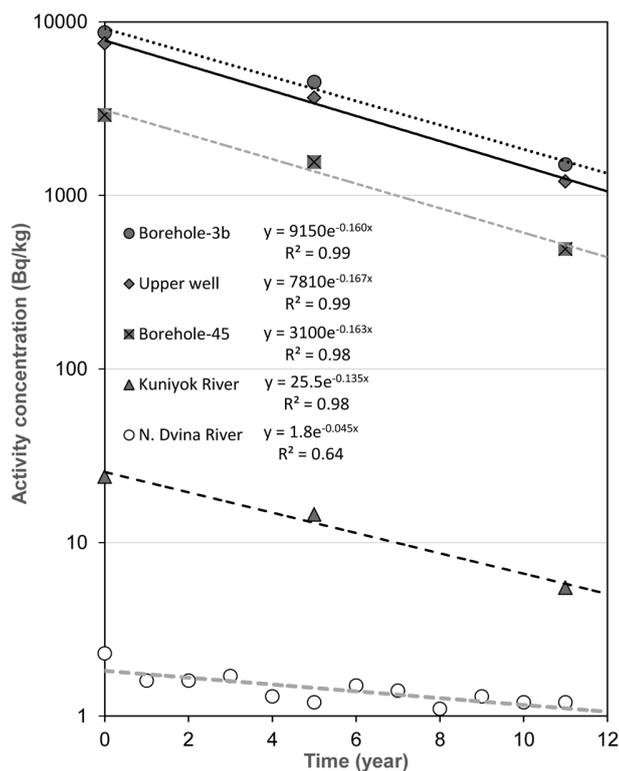


Fig. 8. Changes over time in the activity concentration of tritium in water from the underground sources (Borehole-3b, Upper well, Borehole-45) and the Kuniyok River at the site of the UNEs “Dnepr”, and from the Northern Dvina River in Arkhangelsk. Zero time point corresponds to 2008. The locations of the water sampling points Borehole-3b, Upper well, Borehole-45 and the Kuniyok River are marked in Fig. 5 with numbers 8, 2, 6, and 12, respectively. Exponential curves are fitted to the data points for each sampling location. The data on the Northern Dvina River are taken from ref. [6]

[Рис. 8. Изменение со временем объемной активности трития в воде подземных источников (скважина 3b [Borehole-3b], верхний колодец [Upper well], скважина № 45 [Borehole-45] и реки Кунийок [Kuniyok River] в месте проведения МЯВ серии «Днепр», а также в воде из реки Северная Двина [N. Dvina River] в городе Архангельск. Нулевая отметка времени соответствует 2008 г. Места расположения точек отбора воды из скважины 3b, верхнего колодца, скважины № 45 и реки Кунийок отмечены номерами 8, 2, 6 и 12 соответственно на рисунке 5. Экспоненциальные кривые построены по точкам экспериментальных данных для каждого места отбора проб. Данные по реке Северная Двина взяты из [6]. Time (year) – время (год); Activity concentration (Bq/kg) – удельная активность (Бк/кг)]

$$T_{eco} = \frac{\ln 2}{\lambda_{eco}} \quad (8)$$

Results of the calculations are provided in Table 3. The values of T_{eff} of tritium at the “Dnepr” site were in the range of 4.1–5.1 years. The median and mean values of T_{eff} were equal to 4.3 and 4.4 years, respectively (standard error of the mean, SEM, = 0.2 year). The T_{eco} values ranged from 6.2 to 8.8 years with the mean \pm SEM = 6.9 \pm 0.9 years. Therefore, the rate of decrease in AC of tritium in water from the mine, the boreholes 3b and 45, and the Kuniyok River depended more on ecological processes (dilution with “pure” water) than on physical decay ($T_{1/2}$ = 12.3 years) of the radionuclide. For comparison, we performed similar calculations of the effective half-time of tritium in water of 11 largest rivers of the RF: Northern Dvina, Pechora, Volga, Don, Yenisei, Lena, Kolyma, Nizhnyaya Tunguska, Indigirka, Ob, and Amur. The original experimental data were obtained by Roshydromet (Table 1, Appendix A9 in [6]) based on results of the annual analysis of water samples taken in 15 observation points. Fig. 8 shows an example of using regression analysis to assess temporal variations in AC of tritium in the water from the Northern Dvina River sampled at the Solombala station, located in Arkhangelsk (see Fig. 1), at a distance of approximately 480 km from the site of the “Dnepr” UNEs. The Arkhangelsk station is the closest to our studied area sampling point, which is used by Roshydromet for annual monitoring of river water. The regression analysis (Fig. 8) and calculations (expressions 5–8) showed that in the uncontaminated Northern Dvina River, the T_{eff} value (15.4 years) for AC of tritium was much larger than that in the mine waters of Mt. Kuel’por. For the whole set of 11 uncontaminated rivers, the T_{eff} values (range = 10.5–23.9 years, median = 16.9 years, mean \pm SEM = 17.2 \pm 1.1 years) significantly (the Mann-Whitney U test, $P < 0.01$) exceeded the T_{eff} values that were calculated for the five monitored places at the “Dnepr” site (Table 3). The differences between the major rivers and the Mt Kuel’por mine in terms of the rate of decrease in AC of tritium in water can be attributed to different sources of origin of tritium. For the mine water, virtually the only (and never replenished) source of radioactive contamination is the constantly depleting tritium inventory formed inside Mt. Kuel’por as a result of the 1972 and 1984 UNEs. Tritium in water of the

Во всех пробах воды, отобранных в 2019 г. в месте проведения МЯВ «Днепр», УА трития была существенно ниже уровня вмешательства для питьевой воды (7600 Бк/кг, согласно НРБ-99/2009). Кроме того, значения УА в пробах 2019 г. (рудничная вода, вода из скважин 45 и 3b, а также вода реки Кунийок) были заметно ниже значений 2013 г. и в особенности 2008 г. (табл. 2). Зависящее от времени изменение УА трития в воде из этих точек (примеры даны на рис. 8) может быть хорошо описано отрицательной экспоненциальной зависимостью:

$$AC_t = AC_0 \times \exp(-\lambda_{eff} \times t) \quad (5)$$

где AC_0 – удельная активность трития (Бк/кг) в момент времени 0 (принято 25 июля 2008 г.); AC_t – удельная активность трития (Бк/кг) в момент времени t ; λ_{eff} – эмпирическая постоянная эффективного уменьшения удельной активности (год⁻¹); t – время (год).

λ_{eff} может быть представлена как сумма двух компонент – постоянной распада, λ_{phys} , (для трития она равна 0,0563 год⁻¹) и постоянной уменьшения удельной активности за счет всех экологических процессов (λ_{eco} , год⁻¹). Соответственно, λ_{eco} вычисляем как:

$$\lambda_{eco} = \lambda_{eff} - \lambda_{phys} \quad (6)$$

Используя значения λ_{eff} мы вычислили значения эффективного периода полууменьшения (T_{eff} год) УА трития в воде по формуле:

$$T_{eff} = \frac{\ln 2}{\lambda_{eff}} \quad (7)$$

Аналогичным способом был вычислен и экологический период полууменьшения (T_{eco} , год) УА трития в воде:

$$T_{eco} = \frac{\ln 2}{\lambda_{eco}} \quad (8)$$

Результаты вычислений представлены в таблице 3. Значения T_{eff} трития на объекте «Днепр» находились в диапазоне 4,1–5,1 года. Медианное и среднее значение T_{eff} составили 4,3 и 4,4 года соответственно (стандартная ошибка среднего, SEM, = 0,2 года). Значения T_{eco}

Table 3

Estimated values of the activity concentration of tritium (AC_0) for the zero time point (2008), effective half-time (T_{eff}), ecological half-time (T_{eco}) for tritium in water at the “Dnepr” site in the period 2008–2019. The least squares’ regression method was used to assess the AC_0 , T_{eff} and T_{eco} .

[Таблица 3]

Расчетные значения удельной активности трития (UA_0) для нулевой отметки времени (2008 г.), эффективного периода полууменьшения (T_{eff}), экологического периода полу-уменьшения (T_{eco}) удельной активности трития в воде в период 2008–2019 гг. на объекте «Днепр». Для вычисления AC_0 , T_{eff} и T_{eco} была использована линейная регрессия (метод наименьших квадратов)]

No.* [№*]	Location [Локация]	Main source of water [Основной источник воды]	AC_0 (Bq/kg) [UA_0 (Бк/кг)]	R^2	T_{eff} (y) [T_{eff} (год)]	T_{eco} (y) [T_{eco} (год)]
2	Upper well [Верхний колодец]	adit [Штольня]	7810	0.99	4.1	6.2
3	Lower well [Нижний колодец]	adit [Штольня]	7850	0.99	4.3	6.6
6	Borehole No. 45 [Скважина № 45]	borehole [Скважина]	3100	0.98	4.3	6.6
8	Borehole-3b [Скважина 3b]	borehole [Скважина]	9150	0.99	4.3	6.6
12	Kuniyok River [Река Кунийок]	surface [Поверхность]	25.5	0.98	5.1	8.8

* – number corresponds to the number of the sampling point shown in Fig. 5 and Table 1.

[* – номер соответствует номеру точки отбора проб, указанному на рис. 5 и в табл. 1].

large rivers originates mainly from a global inventory of tritium, which is constantly replenished due to natural processes and human activities [2, 5, 6].

In 2019, the effective dose to the hotel staff due to ingestion of tritium with drinking water from the Kuniyok River was estimated as 0.17 $\mu\text{Sv}/\text{year}$. The effective dose to tourists in case of consumption of the tritium-contaminated water from the self-flowing borehole No. 45 during 14 days was estimated as 0.66 $\mu\text{Sv}/\text{year}$. Both estimations gave the dose values that were negligible in comparison with the effective dose limit for public exposure (1 mSv/year or 1000 $\mu\text{Sv}/\text{year}$, according to NRB-99/2009) and with the value of annual average effective dose due to natural radiation for a citizen of Murmansk Oblast in 2019 (2.98 mSv [29]).

Conclusions

The study revealed that in 2019, the tritium-contaminated water continued to flow from the site of peaceful underground thermonuclear explosions of the "Dnepr" series into waterbodies located in the Kuniyok River valley, Khibiny Massif. The maximum AC of tritium in surface and ground water samples reached 1500 Bq/kg, which was almost three orders of magnitude higher than the regional background level (about 2 Bq/kg). However, the maximum measured value was significantly lower compared to the IL for drinking water (7600 Bq/kg, according to NRB-99/2009). Hence, in terms of tritium contamination, surface and ground waters in the region of the "Dnepr" UNEs are drinkable without any restrictions.

Based on the results of this study and data obtained earlier by other researchers, it became possible to estimate the half-time for decrease of AC of tritium in surface and ground waters in 2008–2019. The decrease in AC of tritium occurred at the same rate in the mine water and in the water from boreholes; T_{eff} values were in the range of 4.1–4.3 years. The effective half-time of tritium in water from the Kuniyok River (5.1 years) was slightly longer than that in the mine water and in water from the boreholes. In all sampling points, the rate of decrease in AC of tritium in water depended more on ecological processes (dilution with "pure" water) than on the physical decay of the radionuclide.

In 2019, the effective dose to the staff of the local hotel due to ingestion of tritium with drinking water from the Kuniyok River was 0.17 $\mu\text{Sv}/\text{year}$. The effective dose to tourists in case of consumption of the tritium-contaminated water from the self-flowing borehole No. 45 during 14 days was 0.66 $\mu\text{Sv}/\text{year}$. Both estimations gave the dose values, which were negligible in comparison with the public dose limit of 1 mSv/year.

Based on the available experimental data and estimates, in the following years we should not expect an increase in the level of tritium contamination of waterbodies at the "Dnepr" UNEs site. However, regular monitoring of AC of tritium in those water sources that are used or can be used by people for the drinking water intake should be continued. Having the updated and experimentally based assessments of water contamination and communicating them promptly to the public will help to keep the level of concern among the local residents and tourists at a low level. At the same time, such assessments may be in demand in the scientific synthesis of modern and archival data on AC of tritium in surface and ground waters in various regions of the world.

варьировали от 6,2 до 8,8 лет со средним значением и SEM, равными 6,9 года и 0,9 года соответственно. Эти оценки показывают, что скорость снижения концентрации трития в воде в большей мере зависела от экологических процессов (разбавление «чистой» водой), нежели от физического распада радионуклида ($T_{1/2} = 12,3$ года). Для сравнения мы выполнили аналогичные расчеты в отношении изменения концентрации трития в воде 11 основных крупных рек РФ: Северная Двина, Печора, Волга, Дон, Енисей, Лена, Колыма, Нижняя Тунгуска, Индигирка, Обь, Амур. Оригинальные экспериментальные данные были получены Росгидрометом (табл. 1 из Приложения А9 в [6]) по результатам ежегодного анализа проб воды из 15 пунктов наблюдения. На рисунке 8 приведен пример использования регрессионного анализа для оценки временных изменений УА трития в реке Северная Двина в пункте Соломбала, расположенном в Архангельске (рис. 1) на расстоянии приблизительно 480 км от места проведения МЯВ «Днепр». Это самый близкий к ареалу нашего обследования пост, используемый Росгидрометом для ежегодного мониторинга речной воды. Регрессионный анализ (рис. 8) и вычисления (выражения 5–8) показали, что в незагрязненной реке Северная Двина значение T_{eff} для трития в воде (15,4 года) было существенно больше значений этого показателя в рудничной воде горы Куэльпор. Для всей выборки из 11 незагрязненных рек значения T_{eff} (диапазон 10,5–23,9 года, медиана = 16,9 года, средняя \pm SEM = 17,2 \pm 1,1 года) статистически значимо (U-критерий Манна – Уитни, $P < 0,01$) превышали значения T_{eff} определенные для 5 мест мониторинга на объекте «Днепр» (табл. 3). Различия между крупными реками и рудником горы Куэльпор в отношении скорости уменьшения концентрации трития в воде объясняются разными источниками происхождения трития. Для воды из рудника практически единственным (и непополняемым) источником загрязнения является постоянно истощающийся запас трития, сформировавшийся внутри горы Куэльпор в результате подземных термоядерных взрывов 1972 и 1984 гг. Тритий в воде крупных рек имеет происхождение, в основном, из глобального резервуара трития, который постоянно пополняется за счет естественных процессов и деятельности человека [2, 5, 6].

Эффективная доза облучения работника гостиницы за счет присутствия трития в питьевой воде из реки Кунийок составила в 2019 г. 0,17 мкЗв/год. Доза облучения туриста в случае потребления загрязненной тритием воды из самоизливающейся скважины № 45 была равна 0,66 мкЗв/год. Оба сценария дают дозовую оценку, величина которой является пренебрежимо малой по сравнению с допустимой дозой техногенного облучения населения 1 мЗв/год (1000 мкЗв/год), согласно НРБ-99/2009, и дозой облучения населения Мурманской области за счет природных источников (2,98 мЗв/год) [29].

Заключение

Выполненное исследование показало, что в 2019 г. продолжалось поступление трития с водой от места проведения подземных термоядерных взрывов серии «Днепр» в водотоки и водоемы, расположенные на поверхности земли в Хибинах. Максимальная удельная активность трития в пробах воды из поверхностных и под-

Conflict of interests

The authors declare that they have no conflicts of interest when conducting the study and preparing this article.

The individual contributions of authors

V.P. Ramzaev analyzed the newly obtained and archived experimental data, wrote a draft of the manuscript and arranged the final version of the manuscript for publication in the journal.

A.M. Biblin participated in collection of samples, analyzed literature data and edited an intermediate version of the manuscript.

V.S. Repin provided general management of the project, secured the funding, calibrated the measuring equipment, and edited an intermediate version of the manuscript.

E.V. Khramtsov supervised the field part of the research, participated in collection of samples, and edited an intermediate version of the manuscript.

K.V. Varfolomeeva measured activity of tritium in samples.

Acknowledgements

The authors are grateful to S.A. Ivanov (Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev) and V.A. Nekrasov (Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev) for help in sampling, and to M.A. Timofeeva (Saint Petersburg State University) for her help in creating Figure 3. The authors are deeply thankful to Professor M.I. Balonov (Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev) for valuable suggestions on a preliminary version of the manuscript and to two reviewers for constructive comments and suggestions that considerably improved the quality of the final version of this paper.

Sources of funding

Funding of the study was provided by the Federal Medical and Biological Agency of Russia (Contracts No. 81.001.17.2 and No. 81.001.20.3).

References

1. UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on Atomic Radiation. 2000 REPORT, Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations, New York; 2000. Vol. 1.
2. UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on Atomic Radiation. 2016 Report, Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, Annex C – Biological Effects of Selected Internal Emitters – Tritium. United Nations, New York; 2017.
3. Eyrolle F, Ducros L, Le Dizès S, Beaugelin-Seiller K, Charmasson S, Boyer P, Cossonnet C. An updated review on tritium in the environment. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018;181: 128–137. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.11.001.
4. Standards and Guidelines for Tritium in Drinking Water. Minister of Public Works and Government Services, Canada. 2008. Available on: https://nuclearsafety.gc.ca/pubs_catalogue/uploads/info_0766_e.pdf. [Accessed 23.10.2021].
5. Makhon'ko KP, Kim VM, Katrich IY, Volokitin AA. Comparison of the behavior of tritium and ¹³⁷Cs in the atmosphere. *Atomnaya Energiya = Atomic Energy*. 1998;85(4): 313–318. (In Russian).
6. The Radiation Situation on the Territory of Russia and Neighboring States in 2019. Yearbook. NPO Typhoon. Obninsk; 2020. (In Russian). Available on: http://egasmro.ru/files/documents/ro_ezhagodniki/ezhegodnik_ro_2019.pdf. [Accessed 23.10.2021].

земных источников достигала 1500 Бк/кг, что почти на 3 порядка величины превышало региональное фоновое значение (около 2 Бк/кг), но было существенно ниже уровня вмешательства для питьевой воды (7600 Бк/кг). Соответственно, по показателю загрязнения тритием поверхностные и подземные воды в регионе проведения МЯВ «Днепр» пригодны для питья без каких-либо ограничений.

По результатам данного исследования и на основе сведений, полученных ранее другими авторами, представлялась возможность оценить период полуочищения подземных и поверхностных вод от трития в период 2008–2019 гг. В рудничной воде и в воде из скважин уменьшение удельной активности трития проходило с одинаковой скоростью; значения T_{eff} находились в диапазоне 4,1–4,3 года. Период полууменьшения УА трития в воде реки Кунийок (5,1 года) был несколько больше такового в рудничной воде и в воде из скважин. Во всех случаях скорость снижения концентрации трития в воде в большей мере зависела от экологических процессов (разбавление «чистой» водой), нежели от физического распада радионуклида.

В 2019 г. оцененное значение эффективной дозы облучения работника гостиницы за счёт присутствия трития в питьевой воде из реки Кунийок равнялось 0,17 мкЗв. Доза облучения туриста в случае потребления загрязненной тритием воды из самоизливающейся скважины № 45 была равна 0,66 мкЗв/год. В обоих случаях величина дозовой оценки является пренебрежимо малой по сравнению с допустимой дозой техногенного облучения населения 1 мЗв/год.

На основе имеющихся экспериментальных данных и оценок в последующие годы не следует ожидать увеличения уровня загрязнения тритием водных объектов в месте проведения МЯВ серии «Днепр». Однако регулярный мониторинг загрязнения тритием тех источников, которые используются или могут использоваться человеком для забора питьевой воды, следует продолжить. Наличие актуализированных и экспериментально-обоснованных оценок показателей загрязнения воды и их публичное оперативное представление в средствах массовой информации поможет сохранять уровень тревожности у местного населения и туристов на низком уровне. В то же время такие оценки могут оказаться востребованными при научном обобщении современных и архивных данных о содержании трития в поверхностных и подземных водах в различных регионах мира.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов при выполнении работы и подготовки данной статьи.

Персональное участие авторов

В.П. Рамзаев провел анализ вновь полученных и архивных экспериментальных данных, подготовил черновик рукописи, оформил окончательный вариант рукописи для публикации в журнале.

А.М. Библин провел отбор части проб, выполнил анализ литературных данных, провел редактирование промежуточного варианта рукописи.

В.С. Репин осуществлял общее руководство выполне-

7. Matsumoto H, Shimada Y, Nakamura AJ, Usami N, Ojima M, Kakinuma S, et al. Health effects triggered by tritium: how do we get public understanding based on scientifically supported evidence? *Journal of Radiation Research*. 2021;62(4): 557–563. DOI: 10.1093/jrr/rrab029.
8. “Fukushima-1” NPP Accident: Radiological Consequences and Lessons. Ed. by acad. of RAS G.G. Onishenko and prof. A.Yu. Popova. St. Petersburg: Research Institute of Radiation Hygiene after prof. P.V. Ramzaev; 2021. 388 p. (In Russian). Available on: http://www.niirg.ru/PDF/2021/F1_2021.pdf. [Accessed 23.10.2021].
9. Atlas of the East Ural and Karachay Radioactive Trace Including Forecast up to 2047. Editor-in-chief Yu.A. Izrael. Moscow: IGCE Roshydromet and RAS, «Infosphere» Foundation; 2013. 140 p. (In Russian). Available on: http://downloads.igce.ru/publications/Atlas/CD_VURS/index.html. [Accessed 23.10.2021].
10. Chebotina MYa, Nikolin OA, Bondareva LG, Rakitsky VN. Tritium in urine of people living in the area of influence of the Beloyarskaya NPP. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2016;9(4): 87–92. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-4-87-92.
11. Finashov LV, Vostrotin VV, Yanov AYu. Tritium in urine in residents of Ozyorsk, the Chelyabinsk region in 2016. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(3): 42–49. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-3-42-49.
12. Panov AV, Trapeznikov AV, Korzhavin AV, Geshel IV, Korovin SV, Edomskaya MA. Radiation monitoring of drinking water in the vicinity of the Beloyarsk NPP. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(1): 86–101. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-86-101.
13. Nuclear Legacy Problems and Ways to Solve Them. Under the general editorship of E.V. Evstratova, A.M. Agapova, N.P. Laverova, L.A. Bolshova, I.I. Linge. 2012. 356 p. Available on: http://en.ibrae.ac.ru/docs/Monografii/yadern_nasledie_t1%20sq.pdf. [Accessed 23.10.2021].
14. Nordyke MD. The Soviet program for peaceful uses of nuclear explosions. *Science and Global Security*. 1998;7: 1–117. Available on: <https://scienceandglobalsecurity.org/archive/sgs07nordyke.pdf>. [Accessed 01.12.2021].
15. Peaceful Nuclear Explosions: Guarantees of General and Radiation Safety. Ed. by prof. V.A. Logachev. Moscow: Izd.AT; 2001. 519 p. (In Russian).
16. Ramzaev VP, Repin VS, Khrantsov EV. Peaceful underground nuclear explosions: current issues on radiation safety for general public. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(2): 27–33. (In Russian).
17. Timofeeva MA, Barkovsky AN, Medvedev AYu, Ramzaev VP, Repin VS. On including the data relevant to peaceful nuclear explosions in the radiation hygiene passport of a territorial subject of the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2010;3(3): 51–54. (In Russian).
18. Vasiliev AP. Nuclear explosive technologies for peaceful nuclear explosions In: Zababakhinski Scientific Readings: Collection of Materials of the XIII International Conference (March 20–24, 2017). Snezhinsk; 2017. P. 10. (In Russian). Available on: http://vniitf.ru/data/images/zst/2017/section_0/2_vasiliev_plenar_en.pdf. [Accessed 23.10.2021].
19. Yablokov AV. The Myth about the Safety and Effectiveness of Peaceful Underground Nuclear Explosions. Moscow: TsEPR; 2003. 176 p. (In Russian). Available on: https://www.yabloko.ru/books/mif_6.pdf. [Accessed 21.11.2021].
20. Kasatkin VV, Mamonov BP, Kasatkin AV. Radiation monitoring of the “DNEPR” nuclear explosion facility after its conservation (decommissioning). V International Nuclear Forum – Nuclear Technology Safety: Safety Strategy and Economics. St. Petersburg, September 27 – October 01, 2010. (In Russian). Available on: <https://www.atomic-energy.ru/presentations/18978>. [Accessed 23.10.2021].
21. Kochetkov OA, Monastyrskaya SG, Kabanov DI. Problems of anthropogenic tritium limitation (review). *Saratov Journal* of the project, ensured the attraction of financing, carried out the calibration of measuring equipment, carried out the editing of the intermediate version of the manuscript.

нием проекта, обеспечил привлечение финансирования, провел калибровку измерительной аппаратуры, провел редактирование промежуточного варианта рукописи.

Е.В. Храпцов руководил выполнением полевых исследований, провел отбор части проб, провел редактирование промежуточного варианта рукописи.

К.В. Варфоломеева выполнила измерения активности трития в пробах.

Благодарность

Авторы благодарят С.А. Иванова (ФБУН НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева) и В.А. Некрасова (ФБУН НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева) за помощь при отборе проб и М.А. Тимофееву (Санкт-Петербургский государственный университет) за помощь в создании рисунка 3. Авторы выражают глубокую благодарность профессору М.И. Балонову (ФБУН НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева) за ценные рекомендации по коррекции предварительной версии рукописи и двум рецензентам за конструктивные комментарии и предложения, значительно улучшившие качество окончательной версии статьи.

Источники финансирования

Финансирование работы осуществлялось по контрактам № 81.001.17.2 и № 81.001.20.3 с Федеральным медико-биологическим агентством России.

Литература

1. UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on Atomic Radiation. 2000 REPORT, Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations, New York; 2000. Vol. 1.
2. UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on Atomic Radiation. 2016 Report, Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, Annex C – Biological Effects of Selected Internal Emitters – Tritium. United Nations, New York; 2017.
3. Eyrolle F., Ducros L., Le Dizès S., et al. An updated review on tritium in the environment // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018. Vol. 181. P. 128–137. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.11.001.
4. Standards and Guidelines for Tritium in Drinking Water. Minister of Public Works and Government Services, Canada. 2008. URL: https://nuclearsafety.gc.ca/pubs_catalogue/uploads/info_0766_e.pdf. [Дата обращения: 23.10.2021].
5. Махонько К.П., Ким В.М., Катрич И.Ю., Волокитин А.А. Сравнительное поведение трития и ¹³⁷Cs в атмосфере // *Атомная энергия*. 1998. Т. 85, № 4. С. 313–318.
6. Радиационная обстановка по территории России и сопредельных государств в 2019 г. Ежегодник. НПО «Тайфун». Обнинск, 2020. URL: http://egasmro.ru/files/documents/ro_ezhegodniki/ezhegodnik_ro_2019.pdf. [Дата обращения: 23.10.2021].
7. Matsumoto H., Shimada Y., Nakamura A.J., et al. Health effects triggered by tritium: how do we get public understanding based on scientifically supported evidence? // *Journal of Radiation Research*. 2021. Vol. 62, No. 4. P. 557–563. DOI: 10.1093/jrr/rrab029.
8. Авария на АЭС «Фукусима-1»: радиологические последствия и уроки / под ред. акад. РАН Г.Г. Онищенко и проф. А.Ю. Поповой. – СПб.: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2021. – 388 с. URL: http://www.niirg.ru/PDF/2021/F1_2021.pdf. [Дата обращения: 23.10.2021].
9. Атлас Восточно-Уральского и Карачаевского радиоактивных следов, включая прогноз до 2047 года / Под ред. Ю.А. Израэля. – М.: ИГКЭ Росгидромета и РАН, Фонд «Инфосфера» – НИА-Природа, 2013. 140 с. URL: http://downloads.igce.ru/publications/Atlas/CD_VURS/index.html. [Дата обращения: 23.10.2021].

- of Medical Scientific Research. 2013;9(4): 815–818. (In Russian).
22. The Modern Radioecological Situation at the Sites of Peaceful Nuclear Explosions on the Territory of the Russian Federation. Ed. by prof. V.A. Logachev. Moscow: Izd.AT; 2005. 256 p. (In Russian). Available on: http://elib.biblioatom.ru/text/sovremennaya-radioekologicheskaya-obstanovka-rf_2005/go,0/ [Accessed 05.12.2021].
 23. Khramtsov EV, Varfolomeeva KV, Zelentsova SA, Arkhangel'skaya GV, Repin VS, Vishnyakova NM. Objective and subjective in an assessment of the danger of the consequences of peaceful nuclear explosions on the example of facility «Dnepr». *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(1): 35–44. (In Russian).
 24. Search according to the State Water Register. Available on: <https://textual.ru/gvr/index.php?card=155543> [Accessed 21.12.2021].
 25. Shevchenko A. Precipitation in Khibiny. Available on: <http://hibtravel.ru/rain.html> [Accessed 21.12.2021].
 26. Mazukhina SI, Maksimova VV, Chudnenko KV, Masloboev VA, Sandimirov SS, Drogobuzhskaya SV, et al. Water Quality in the Arctic Zone of the Russian Federation: Physical and Chemical Modeling of Water Formation, Forms of Migration of Elements, Impact on the Human Body. Apatity: Publishing House of the Federal Research Center of the KSC RAS; 2020. 158 p. (In Russian). Available on: https://inep.ksc.ru/documents/51_mazukhina_20.pdf. [Accessed 21.12.2021].
 27. Arun B, Vijayalakshmia I, Sivasubramaniana K, Jose MT. Optimization of liquid scintillation counter for tritium estimation in water samples. *Radiochemistry*. 2019;61(1): 61–65. DOI: 10.1134/S1066362219010090.
 28. Jones FE, Harris GL. ITS-90 Density of water formulation for volumetric standards calibration. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 1992;97(3): 335–340. DOI: 10.6028/jres.097.013.
 29. Barkovsky AN, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AN, et al. Information Bulletin: Radiation Doses in Russia, 2019. St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after prof. P.V. Ramzaev: St. Petersburg; 2020. (In Russian). Available on: http://www.niirg.ru/PDF/inf_sbor/2019.pdf. [Accessed 21.11.2021].
 10. Чеботина М.Я., Николин О.А., Бондарева Л.Г., Ракитский В.Н. Тритий в моче людей в зоне влияния Белоярской АЭС // Радиационная гигиена. 2016. Т. 9, № 4. С. 87–92. DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-4-87-92.
 11. Финашов Л.В., Востротин В.В., Янов А.Ю. Тритий в моче у жителей города Озерска Челябинской области в 2016 г. // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 3. С. 42–49. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-3-42-49.
 12. Панов А.В., Трапезников А.В., Коржавин А.В., и др. Радиационный мониторинг питьевой воды в районе Белоярской АЭС // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 1. С. 86–101. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-86-101.
 13. Проблемы ядерного наследия и пути их решения / Под общ. ред. Е.В. Евстратова, А.М. Агапова, Н.П. Лаверова, Л.А. Большова, И.И. Линге. 2012. 356 с. URL: http://en.ibrae.ac.ru/docs/Monografii/yadern_nasledie_t1%20sq.pdf. [Дата обращения: 23.10.2021].
 14. Nordyke M.D. The Soviet program for peaceful uses of nuclear explosions // Science and Global Security. 1998. Vol. 7. P. 1–117. URL: <https://scienceandglobalsecurity.org/archive/sgs07nordyke.pdf>. [Дата обращения: 01.12.2021].
 15. Мирные ядерные взрывы: обеспечение общей и радиационной безопасности при их проведении / Колл. авторов под. рук. проф. В.А. Логачева. М.: Изд.АТ, 2001. 519 с.
 16. Рамзаев В.П., Репин В.С., Храмов Е.В. Мирные подземные ядерные взрывы: проблемы и пути обеспечения радиационной безопасности населения // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 2. С. 27–33.
 17. Тимофеева М.А., Барковский А.Н., Медведев А.Ю., и др. О внесении данных о радиационно-гигиенической обстановке в местах проведения мирных ядерных взрывов в радиационно-гигиенический паспорт территории субъекта Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2010. Т. 3, № 3. С. 51–54.
 18. Васильев А.П. Ядерные взрывные технологии в мирных ядерных взрывах. Забабахинские научные чтения: Сборник материалов XIII Международной конференции (20–24 марта 2017). Снежинск, 2017. С. 10. URL: http://vniitf.ru/data/images/zst/2017/section_0/2_vasiliev_plenar_en.pdf. [Дата обращения: 23.10.2021].
 19. Яблоков А.В. Миф о безопасности и эффективности мирных подземных ядерных взрывов. М.: ЦЭПР, 2003. 176 с. URL: https://www.yabloko.ru/books/mif_6.pdf. [Дата обращения: 21.11.2021].
 20. Касаткин В.В., Мамонов Б.П., Касаткин А.В. Радиационный мониторинг объекта ядерного взрыва «ДНЕПР» после его консервации (вывода из эксплуатации). V Международный ядерный форум – Безопасность ядерных технологий: стратегия и экономика безопасности. С-Петербург, 27 сентября–01 октября 2010 г. URL: <https://www.atomic-energy.ru/presentations/18978>. [Дата обращения: 23.10.2021].
 21. Кочетков О.А., Монастырская С.Г., Кабанов Д.И. Проблемы нормирования техногенного трития (обзор) // Саратовский научно-медицинский журнал. 2013. Т. 9, № 4. С. 815–818.
 22. Современная радиоэкологическая обстановка в местах проведения мирных ядерных взрывов на территории Российской Федерации / Колл. авторов; под рук. проф. В.А. Логачева. М.: Изд.АТ, 2005. 256 с. URL: http://elib.biblioatom.ru/text/sovremennaya-radioekologicheskaya-obstanovka-rf_2005/go,0/ [Дата обращения: 05.12.2021].
 23. Храмов Е.В., Варфоломеева К.В., Зеленцова С.А., и др. Объективное и субъективное в оценке опасности последствий мирных ядерных взрывов на примере объекта «Днепр» // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 1. 35–44.
 24. Поиск по данным государственного водного реестра. URL: <https://textual.ru/gvr/index.php?card=155543> [Дата обращения: 21.12.2021].
 25. Осадки в Хиби́нах. URL: <http://hibtravel.ru/rain.html> [Дата обращения: 21.12.2021].

Received: November 8, 2021

26. Мазухина С.И., Максимова В.В., Чудненко К.В., и др. Качество вод Арктической зоны Российской Федерации: физико-химическое моделирование формирования вод, формы миграции элементов, влияние на организм человека. Апатиты: Издательство ФИЦ КНЦ РАН, 2020. 158 с. URL: https://iner.ksc.ru/documents/51_mazukhina_20.pdf. [Дата обращения: 21.11.2021].
27. Arun B., Vijayalakshmia I., Sivasubramaniana K., Jose M.T. Optimization of liquid scintillation counter for tritium estimation in water samples // *Radiochemistry*. 2019. Vol. 61, No. 1. P. 61–65. DOI: 10.1134/S1066362219010090.
28. Jones F.E., Harris G.L. ITS-90 Density of water formulation for volumetric standards calibration // *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 1992. Vol. 97, No. 3. P. 335–340. DOI: 10.6028/jres.097.013.
29. Барковский А.Н., Ахматдинов Р.Р., Ахматдинов Р.Р., и др. Информационный сборник: «Дозы облучения населения Российской Федерации в 2019 году». СПб.: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2020. URL: http://www.niirg.ru/PDF/inf_sbor/2019.pdf. [Дата обращения: 21.11.2021].

Поступила: 08.11.2021 г.

Valery P. Ramzaev – Ph.D of Medical Sciences, Leading Researcher of the Laboratory of External Exposure, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing. **Address for correspondence:** Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia. E-mail: V.Ramzaev@mail.ru

Artem M. Biblin – Head, Information Analytical Center, 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

Viktor S. Repin – Advanced Doctor in Biological Sciences, Head of the 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

Evgeniy V. Khrantsov – 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

Kseniya V. Varfolomeeva – Junior Researcher of the 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

Рамзаев Валерий Павлович – кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник лаборатории внешнего облучения 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.Ramzaev@mail.ru

Библин Артем Михайлович – руководитель Информационно-аналитического центра, старший научный сотрудник 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

Репин Виктор Степанович – доктор биологических наук, 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, Санкт-Петербург, Россия

Храмцов Евгений Витальевич – 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

Варфоломеева Ксения Владимировна – 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

For citation: Ramzaev V.P., Biblin A.M., Repin V.S., Khrantsov E.V., Varfolomeeva K.V. Tritium contamination of surface and ground waters at the “Dnepr” peaceful underground nuclear explosions site. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 1, P. 6-26. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-6-26

Для цитирования: Рамзаев В.П., Библин А.М., Репин В.С., Храмцов Е.В., Варфоломеева К.В. 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