

Radioactive glassy inclusions in the soil sampled at the “Taiga” peaceful underground nuclear explosions site (the Perm region, Russia)

Valery P. Ramzaev, Viktor S. Repin

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

Activities of gamma-emitting radionuclides were measured in glassy inclusions (particles) found in soil samples from the “Taiga” peaceful nuclear explosions site (the Perm region, Russia). The measurements were performed using a stationary semiconductor gamma spectrometer. Activity concentrations were determined for the following technogenic radionuclides: ^{60}Co , ^{94}Nb , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu , and ^{241}Am . The activity concentrations of ^{241}Am in the glassy inclusions were one to two orders of magnitude higher compared to the level of minimum significant activity concentration (1 Bq/g for ^{241}Am) established by the Russian Radiation Safety Standards “NRB-99/2009”. Earlier, exceeding this level for the ^{241}Am activity concentration in the native (unfractionated) soil samples from the “Taiga” site was reported by other researchers. In accordance with current Russian legislative and regulatory provisions regarding use of nuclear charges for peaceful purposes, the soil and radioactive glassy inclusions found in the soil correspond to the category of special radioactive waste. Considering the long half-life of ^{241}Am (432 years), radiologically significant contamination by this radionuclide will persist at the “Taiga” site for the foreseeable future.

Key words: peaceful underground nuclear explosion, “Taiga”, soil, glassy inclusions, technogenic radionuclides.

Радиоактивные стекловидные включения в почве, отобранной на месте проведения мирных подземных ядерных взрывов проекта «Тайга» (Пермский край, Россия)

В.П. Рамзаев, В.С. Репин

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

Измерена активность гамма-излучающих радионуклидов в стекловидных включениях (частицах), обнаруженных в почве, которая была отобрана в месте проведения мирных ядерных взрывов проекта «Тайга» (Пермский край, Россия). Измерения были проведены с помощью стационарного полупроводникового гамма-спектрометра. Была определена удельная активность следующих техногенных радионуклидов: ^{60}Co , ^{94}Nb , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu и ^{241}Am . Значения удельной активности ^{241}Am в стекловидных включениях на 1–2 порядка величины превышали уровень минимально значимой удельной активности (1 Бк/г) по НРБ-99/2009. Превышение этого уровня удельной активности ^{241}Am было зарегистрировано ранее другими исследователями в нефракционированной (нативной) почве. В соответствии с действующими российскими законодательно-нормативными положениями, касающимися использования ядерных зарядов в мирных целях, почва и обнаруженные в ней радиоактивные стекловидные включения соответствуют категории особых радиоактивных отходов. Учитывая длительный период полураспада ^{241}Am (432 года), радиологически значимое загрязнение почвы этим радионуклидом на объекте «Тайга» будет сохраняться в обозримой временной перспективе.

Ключевые слова: мирный подземный ядерный взрыв, «Тайга», почва, стекловидные включения, техногенные радионуклиды.

Valery P. Ramzaev

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

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

Introduction

One of the consequences of an underground nuclear explosion is formation of a deep cavity where radioactive products of the explosion are concentrated. The underground cavity is partially filled with a glassy (vitreous) substance which is formed in the very initial phase of the explosion by melting, evaporation and condensation of the components contained in the explosion zone [1–3]. The long-lived technogenic radionuclides present in the components (including the glassy substance) of the underground cavity originate from nuclear fuel residues (for example, ^{235}U , ^{239}Pu), products of nuclear transformations of nuclear fuel components (^{241}Am from ^{241}Pu), fission products (^{137}Cs , ^{155}Eu), products of activation of non-radioactive components of explosive device (^{60}Co), and activation products of natural nuclides (^{152}Eu) [2]. The radioactive products that were captured by the glassy mass practically do not migrate into the environment [1]; the solidified rock melt itself can be considered as a place for a fairly reliable burial of the long-lived technogenic radionuclides at great depth underground [4].

When conducting peaceful nuclear explosions (PNE) at shallow depths with the aim of ejecting rock onto the surface of the earth (an excavation explosion to create a dam, canal or lake), conditions are also created for the release of glassy material (in the form of radioactive particles) from the explosion zone to the surface. For example, relatively small radioactive vitreous particles (size up to several millimeters) and pieces of radioactive slag were found on the crest of the soil pile at the site of the “Chagan” PNE (Semipalatinsk Test Site (STS), Kazakhstan, 15.01.1965). The slag fragments had irregularly shape and sizes up to several centimeters [4]. Studies of the physicochemical properties and radionuclides composition of such glassy and melted formations in comparison with native soil are of particular interest for predicting radioactive contamination of water bodies, because the rates of leaching of technogenic radionuclides from the glassy particles and from the soil can vary significantly [4, 5]. In addition, it is highly likely that the residual radioactive contamination of glassy particles and fragments may be very significant and even pose a danger from a radiological point of view, because in the camouflage explosions, up to 95–98% of the residual activity of long-lived technogenic radionuclides is contained precisely in the glassy material deposited at the bottom of the explosion cavity [4].

There are two sites of excavation PNEs on the territory of Russia: the “Crystal” site (thermonuclear explosion to create a dam, 02.10.1974) and the “Taiga” site (simultaneous detonation of three thermonuclear charges to create a section of a canal, 23.03.1971) [4, 6, 7]. Large-scale isolation works were carried out at the “Crystal” site; the most contaminated areas were covered with clean rock. No works on decontamination and physical isolation of radioactively contaminated places were performed at the “Taiga” PNE site.

In 2009 at the artificial lake on the “Taiga” site (61.30° N, 56.60° E; the Perm region) (Fig. 1), the expedition of the Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev (RIRH) collected soil samples [6]. Laboratory analysis of unfractionated native soil revealed presence of a number of long-lived anthropogenic radionuclides (^{60}Co , ^{94}Nb , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu , ^{207}Bi , ^{241}Am) [8]. After the gamma spectrometric analysis, all soil samples

Введение

Последствиями ядерных взрывов, произведенных в мирных или оборонных целях под землей, являются глубинные радиоактивные захоронения, сосредоточенные в полости взрыва. Подземная полость частично заполнена стекловидной массой, которая образуется в самой начальной фазе взрыва путем расплава, испарения и конденсации содержащихся в зоне взрыва компонентов [1–3]. Структурные элементы подземной полости и, в частности, стекловидная масса содержат долгоживущие радионуклиды различного происхождения: из остатков ядерного горючего (например, ^{235}U , ^{239}Pu), продуктов ядерных превращений компонентов ядерного горючего (^{241}Am из ^{241}Pu), продуктов деления (^{137}Cs , ^{155}Eu), продуктов активации нерадиоактивных компонентов взрывного устройства (^{60}Co) и продуктов активации природных нуклидов (^{152}Eu) [2]. Содержащиеся в стекловидной массе радиоактивные продукты взрыва в дальнейшем практически не мигрируют в окружающую среду [1], а сам отвердевший расплав пород можно рассматривать в качестве объекта (места) достаточно надежного захоронения долгоживущих техногенных радионуклидов на большой глубине под землей [4].

При проведении мирных ядерных взрывов (МЯВ) на небольшой глубине с целью выброса грунта на поверхность земли (экскавационный взрыв для создания канала, озера или плотины) также создаются условия для выброса на поверхность и стекловидного материала (в форме радиоактивных частиц), образовавшегося в зоне взрыва. Например, на гребне навала грунта (почвы) в месте проведения экскавационного МЯВ «Чаган» (Семипалатинский испытательный полигон (СИП), Казахстан, 15 января 1965 г.), наряду с относительно мелкими радиоактивными частицами (размеры до нескольких миллиметров), можно было обнаружить радиоактивный шлак, имевший вид кусков (фрагментов) неправильной формы размерами до нескольких сантиметров [4]. Изучение физико-химических свойств и радионуклидного состава таких стекловидных и оплавленных образований в сравнении с почвой представляет определенный интерес для составления прогноза радиоактивного загрязнения водных объектов, т.к. скорости выщелачивания техногенных радионуклидов из стекловидных частиц и из почвы могут существенно различаться [4, 5]. Кроме того, вполне вероятно, что уровень остаточного радиоактивного загрязнения стекловидных частиц и фрагментов может оказаться весьма значительным и даже представлять опасность с радиологической точки зрения, т.к. при камуфлетных взрывах до 95–98% остаточной активности долгоживущих техногенных радионуклидов содержится именно в стекловидном материале, осевшем на дне взрывной полости [4].

На территории России имеется два места проведения экскавационных МЯВ: объект «Кристалл» (термоядерный взрыв с целью создания плотины, 02.10.1974 г.) и объект «Тайга» (одновременный подрыв трех термоядерных зарядов с целью создания отрезка канала, 23.03.1971 г.) [4, 6, 7]. На объекте «Кристалл» были проведены масштабные изоляционные работы, и наиболее загрязненные места были покрыты чистой горной породой. На месте проведения МЯВ «Тайга» каких-либо работ по дезактивации и физической изоляции мест радиоактивного загрязнения не выполнялось.

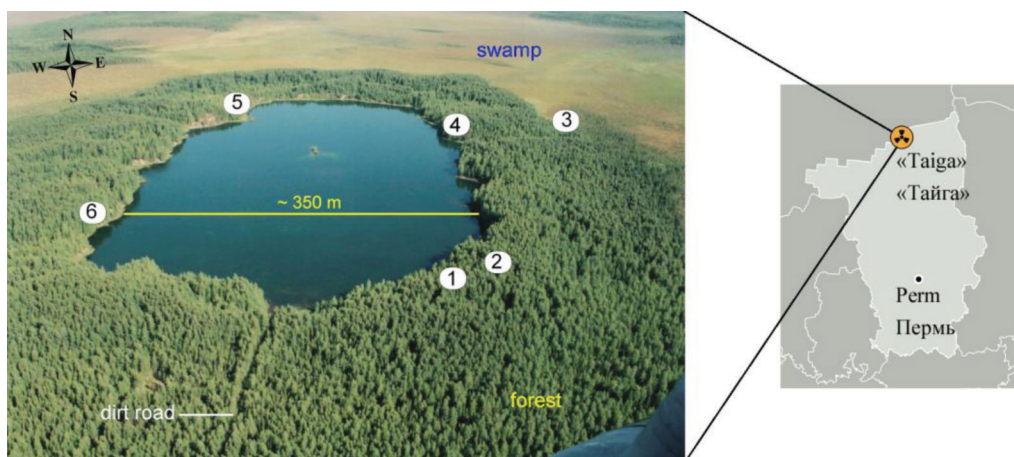


Fig. 1. Location of the «Тайга» PNE site in the Perm region and the soil sampling plots (denoted as 1 through 6) on the banks of the «Тайга» lake. The photo was taken from a helicopter in August 2009

[Рис. 1. Расположение места проведения МЯВ «Тайга» в Пермском крае и площадок отбора проб почвы (обозначены цифрами от 1 до 6) на берегах озера «Тайга». Фотография сделана с вертолета в августе 2009 г. Обозначения: swamp – болото; forest – лес; dirt road – грунтовая дорога]

were dried and sent for storage to the soil archive of the RIRH. When sorting through the soil samples collected on the southeastern shore of the lake «Taiga» (Fig. 1; Plot No. 2), we found several solid inclusions (particles) that in appearance resembled pieces of fused glass. The sizes of these items varied from a few millimeters to several centimeters. The shape of the inclusions was irregular. Figure 2 shows images of the largest glassy inclusion; Figure 3 shows a relatively small flat inclusion.

В 2009 г. на объекте «Тайга» (61.30° с.ш., 56.60° в.д., Пермский край), представлявшего собой искусственное озеро (рис. 1), участниками экспедиции НИИРГ им. П.В.Рамзаева [6] были отобраны пробы почвы. Лабораторный анализ нефракционированной нативной почвы выявил присутствие целого ряда долгоживущих антропогенных радионуклидов (^{60}Co , ^{94}Nb , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu , ^{207}Bi , ^{241}Am) [8]. После проведения гамма-спектрометрического анализа все образцы почвы были высушены и

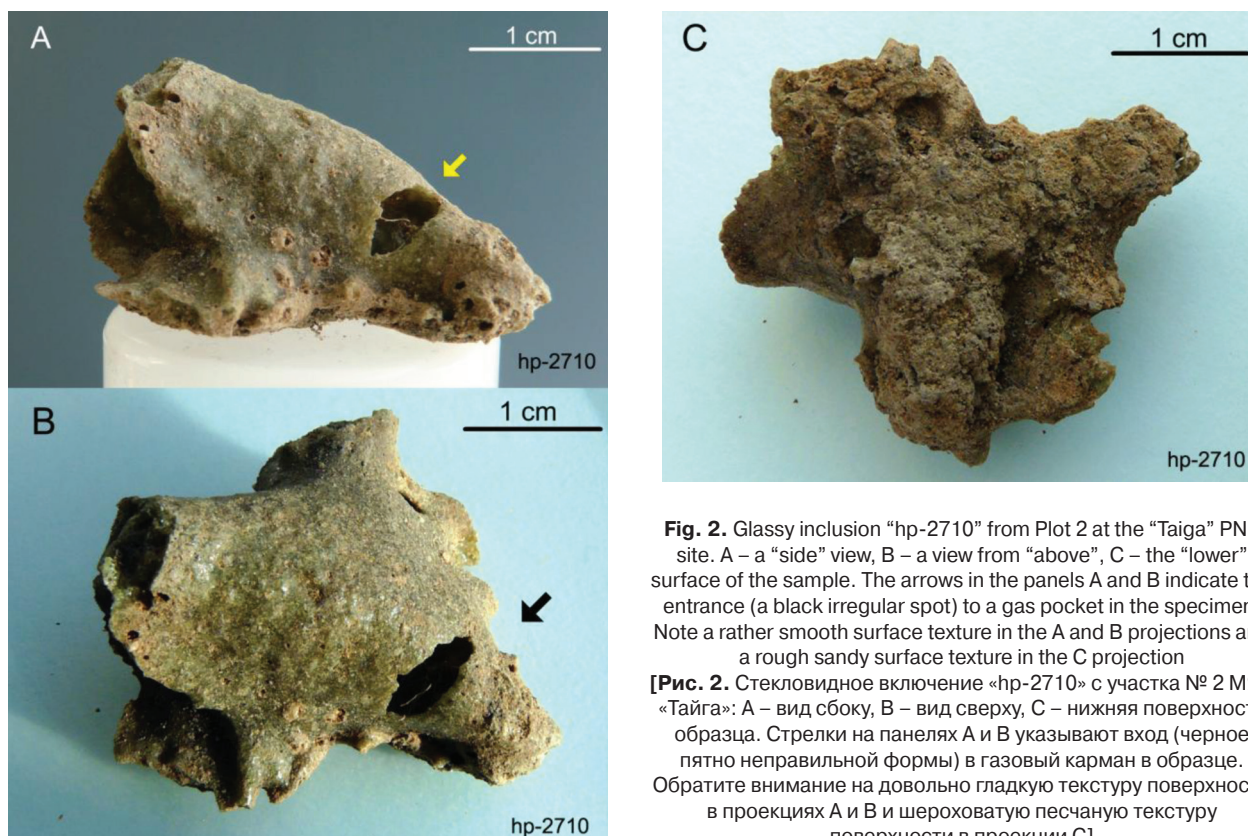


Fig. 2. Glassy inclusion «hp-2710» from Plot 2 at the «Taiga» PNE site. A – a «side» view, B – a view from «above», C – the «lower» surface of the sample. The arrows in the panels A and B indicate the entrance (a black irregular spot) to a gas pocket in the specimen. Note a rather smooth surface texture in the A and B projections and a rough sandy surface texture in the C projection

[Рис. 2. Стекловидное включение «hp-2710» с участка № 2 МЯВ «Тайга»: А – вид сбоку, В – вид сверху, С – нижняя поверхность образца. Стрелки на панелях А и В указывают вход (черное пятно неправильной формы) в газовый карман в образце. Обратите внимание на довольно гладкую текстуру поверхности в проекциях А и В и шероховатую песчаную текстуру поверхности в проекции С]

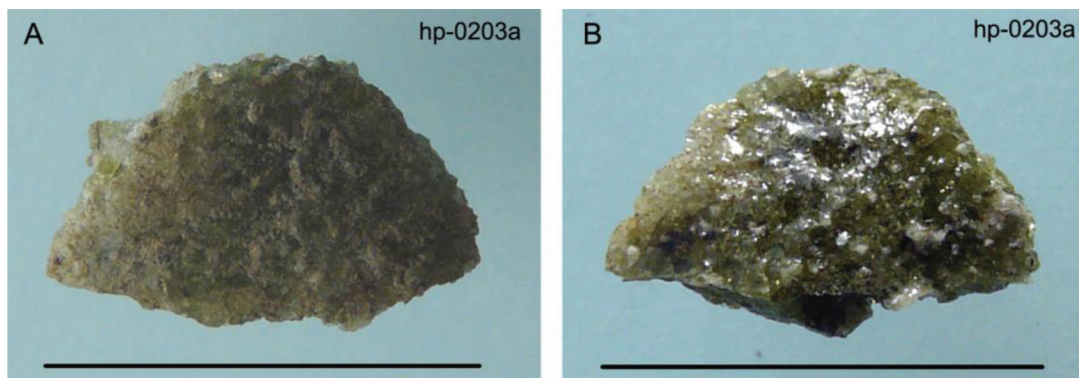


Fig. 3. Glassy inclusion hp-0203a before (A) and after (B) ultrasonic treatment for 600 s in distilled water. The length of the measuring segment is 1 cm

[Рис. 3. Стекловидное включение hp-0203a до (А) и после (В) ультразвуковой обработки в течение 600 с в дистиллированной воде. Длина мерного отрезка равна 1 см]

The objectives of the study were: 1) to measure the activity concentrations (AC) of gamma-emitting technogenic radionuclides in the glassy inclusions, and 2) to determine the ratio between AC values in the inclusions and in native non-fractionated soil.

Materials and methods

The material of each dry soil sample from Plot No. 2 (the depths of 0–2, 2–4, 4–6, 6–10, 10–12, 12–14, 14–16, 16–18 and 18–20 cm) was distributed over the bottom of individual flat plastic cuvette. Among the visually detected glassy inclusions, the seven largest samples were selected (size more than 5–6 mm). These could be reliably manipulated without use of special magnifying devices. The surface of the samples was cleaned of soil particles using a small paint brush. Bubble-like formations were visible inside some of the inclusions. Inside the sample hp-2710 there was a cavity, the entrance to which is indicated by an arrow in Figure 2 (panels A and B). Note that for some inclusions, it was not possible to clean the entire surface. For example, for the sample hp-2710 (Fig. 2, panel C), sand particles densely covered the “bottom” surface. After the cleaning, each inclusion was weighed on the AF-R220CE analytical electronic balance (Shinko Denshi Co., Ltd, Japan).

The activities of gamma-emitting technogenic radionuclides in the samples were measured using spectrometer setup that included a HPGe detector and the 8192-channel analyzer (ORTEC, USA). The detector and Dewar flask with liquid nitrogen were placed inside a stationary shield made of steel (20 cm thick). The detector was additionally surrounded by a 10 cm thick lead shield [9]. The energy resolution of the gamma spectrometer was 1.8 keV for the ^{60}Co 1332.5 keV line and 0.94 keV for the ^{152}Eu 122.8 keV line. The absolute efficiency of the detection system was determined using certified point sources of gamma radiation (^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{207}Bi , and ^{241}Am). The point geometry was directly used to calculate activity in the six samples ranged in size within 1.2 cm (e.g., hp-0203a inclusion, see Fig. 3). The geometry of the large inclusion hp-2710 (Fig. 2) was approximated by a cylinder (diameter = 4 cm, height = 2 cm). In this case, the gamma quanta registration efficiency was calculated using the Nuclide Master Plus software [10]. The measurements were performed with a sample placed at a distance of 1 cm

направлены на хранение в архив НИИРГ им. П.В. Рамзаева. В последующем при ревизии архива в образцах почвы, отобранной на юго-восточном берегу озера (площадка 2 на рисунке 1), нами были обнаружены твердые включения (частицы), по внешнему виду напоминавшие оплавленное стекло. По размерам эти объекты варьировали от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Форма включений была неправильной. Края включений были как обломанными, так и закругленными. На рисунке 2 приведено изображение самого крупного стекловидного включения; на рисунке 3 показана сравнительно небольшая уплощенная частица.

Цель исследования – определение удельной активности гамма-излучающих техногенных радионуклидов в стекловидных включениях.

Материалы и методы

Среди визуально обнаруженных включений было выбрано 7 наиболее крупных образцов (поперечник более 5–6 мм), с которыми можно было надежно проводить манипуляции без использования специальных увеличительных устройств. Поверхность образцов была очищена от частиц почвы с использованием кисточки для рисования. Внутри некоторых включений просматривались мелкие пузырько-видные образования, а внутри образца hp-2710 имелась полость, вход в которую показан стрелкой на рисунке 2 (панели А и В). Отметим, что на некоторых включениях удавалось очистить не всю поверхность. Например, для образца hp-2710 (см. рис. 2, панель С) частицы песка плотно покрывали всю «нижнюю» поверхность. После очистки каждое включение было взвешено на аналитических электронных весах AF-R220CE (Shinko Denshi Co., Ltd, Japan).

Активность гамма-излучающих техногенных радионуклидов в пробах измеряли с помощью детекторной установки, состоящей из HP Ge-детектора и 8192-канального анализатора (ORTEC, США). Детектор и сосуд Дьюара с жидким азотом были размещены внутри стационарной защиты из стали (20 см толщиной). Дополнительно сам детектор был защищен слоем свинца толщиной 10 см [9]. Энергетическое разрешение гамма-спектрометра составляло 1,8 кэВ для линии ^{60}Co 1332,5 кэВ и 0,94 кэВ для линии ^{152}Eu 121,8 кэВ. Абсолютную эффективность системы детектирования определяли с использованием сертифицирован-

from the upper surface of the detector cup. Measurement duration ranged from 20,000 to 60,000 s. The activities of radionuclides in the samples were decay corrected to the time of soil sampling at the "Taiga" PNE site (05 August 2009).

One of the samples (hp-0203a, see Fig. 3A) was subjected to ultrasonic cleaning after the gamma spectrometric measurement. The sample was placed in a plastic vial filled with distilled water. The vial was placed in a water bath and treated for 600 s at the operating frequency of 40 kHz and the constant ultrasound power of 40 W using the Citizen ultrasonic cleaner SW 1500 (CBM Corporation, Japan). After the treatment, the surface of the sample experienced a bright fused glass texture; the edges of the sample were sharp (Fig. 3B). Therefore, it can be assumed that this inclusion is part of a large formation that was damaged before or at the moment of soil sampling. After the sonication, the activities of radionuclides in the sample hp-0203a were re-measured using the gamma spectrometer.

Results and discussion

The gamma spectrum measured from the glassy specimen hp-2710 is provided in Figure 4. The spectrum is shown after subtracting the background spectrum without the sample. The spectrogram in Figure 4 clearly shows peaks of the technogenic radionuclides: ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu , and ^{241}Am . At higher magnification (Fig. 5), one can additionally see the peaks attributed to ^{94}Nb , ^{154}Eu and ^{155}Eu , which are also technogenic radionuclides. The AC values of the detected radionuclides as well as the ratios of the ACs in the glassy inclusion to the ACs in the native (unfractionated) soil from the 10–12 cm depth layer (the layer of deposition of the inclusion hp-2710) are provided in Table 1. The data on the ACs of the radionuclides in soil were taken from [8]. The ACs of all identified technogenic radionuclides in the sample hp-2710 were significantly higher than those in the native soil. The differences

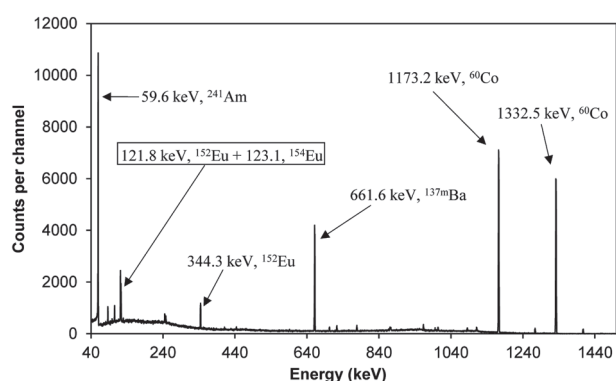


Fig. 4. Gamma-ray spectrum of the inclusion hp-2710 (see Fig. 1) found in the soil sample from Plot 2 at the "Taiga" PNE site.

The major peaks of the technogenic radionuclides ^{241}Am , ^{152}Eu , $^{137\text{m}}\text{Ba}$ (the short-lived daughter of ^{137}Cs) and ^{60}Co are indicated. The counting time was 60,000 s. The spectrum of the specimen is shown after subtracting the background spectrum

[Рис. 4. Гамма-спектр от включения hp-2710 (см. рис. 1), обнаруженного в пробе почвы с площадки № 2 места проведения МЯВ «Тайга». Указаны основные пики техногенных радионуклидов ^{241}Am , ^{152}Eu , $^{137\text{m}}\text{Ba}$ (короткоживущий дочерний нуклид ^{137}Cs) и ^{60}Co . Время набора составляло 60 000 с. Спектр от образца показан после вычитания фонового спектра. Обозначения: по оси x – энергия (кэВ); по оси y – число импульсов на канал]

ных точечных источников гамма-излучения (^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{207}Bi , ^{241}Am). Точечную геометрию напрямую использовали для вычисления активности в 6 образцах, имеющих размеры в пределах 1,2 см (например, включение hp-0203a, см. рис. 3). Геометрия крупного включения hp-2710 (см. рис. 2) была аппроксимирована цилиндром (диаметр = 4 см, высота = 2 см). В этом случае эффективность регистрации гамма-квантов была вычислена с помощью компьютерной программы Nuclide Master Plus [10]. Все измерения проводили при размещении образца на расстоянии 1 см от верхней поверхности чашки детектора. Продолжительность набора гамма спектров варьировала от 20 000 до 60 000 с. Активности радионуклидов в счетных образцах были пересчитаны на время отбора проб почвы на объекте «Тайга» (05.08.2009) с учетом радиоактивного распада.

Для более явной визуальной демонстрации стекловидной сущности найденных включений, один из образцов (hp-0203a, см. рис. 3A) после выполнения гамма-спектрометрических измерений был подвергнут ультразвуковой очистке в водной среде. Образец помещали в пластиковую вialу, наполненную дистиллированной водой. Вialу размещали в водяной бане и обрабатывали в течение 600 с при рабочей частоте 40 кГц и постоянной мощности ультразвука 40 Вт с использованием установки Citizen ultrasonic cleaner SW 1500 (Japan CBM Corporation). После обработки в ультразвуковом аппарате поверхность образца имела яркую текстуру оплавленного стекла, а края были острыми (см. рис. 3B). Поэтому можно предположить, что данное включение является частью крупной формации, поврежденной до или в момент отбора проб почвы. После ультразвуковой обработки образец hp-0203a был взвешен и повторно прошел этап гамма-спектрометрических измерений.

Результаты и обсуждение

Гамма-спектр, измеренный от стекловидного образца hp-2710, показан на рисунке 4. Спектр приведен после вычитания фонового спектра. На спектрограмме отчетливо видны пики техногенных радионуклидов: ^{241}Am , ^{60}Co , ^{137}Cs и ^{152}Eu . При большем увеличении (рис. 5) можно дополнительно видеть пики ^{94}Nb , ^{154}Eu и ^{155}Eu , которые также являются техногенными радионуклидами. Значения удельных активностей (УА) радионуклидов, обнаруженных в нативной (нефракционированной) почве из верхнего слоя 10–12 см и в стекловидном образце hp-2710 из этого же слоя, а также их отношения приведены в таблице 1. Данные по УА радионуклидов в почве взяты из работы [8]. Значения УА всех выявленных техногенных радионуклидов в образце hp-2710 были существенно выше таковых в нативной почве. Разница была особенно выраженной для изотопов тугоплавких и труднолетучих элементов Am, Co, Eu и Nb (значения температуры кипения равны 2011, 2927, 1527 и 4744 °C соответственно [11]). В остальных 6 стекловидных включениях УА удалось надежно количественно оценить только для радионуклидов ^{60}Co , ^{137}Cs и ^{241}Am . Это связано с очень малой массой этих включений (табл. 2). Как видно из таблицы 2, для всех включений УА ^{241}Am и ^{60}Co была многократно больше, чем таковая в нативной почве. Для радионуклида ^{137}Cs со сравнительно низкой температурой кипения (671 °C [11]) это соотношение варьировало от 1,0 до 2,1, но в целом статистически значимо превышало 1 (непараметрический тест по критерию знаков, $P < 0,05$).

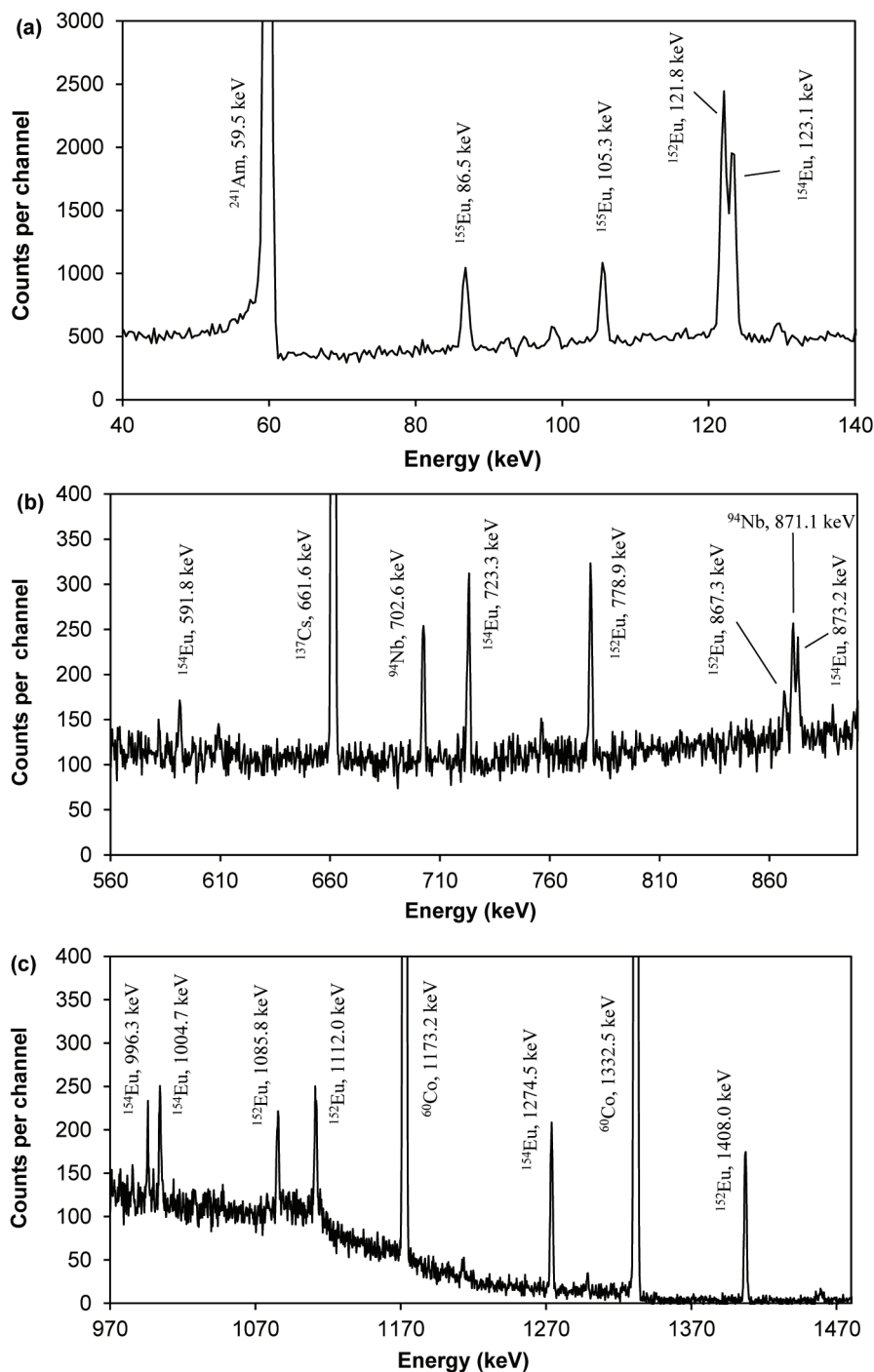


Fig. 5. Selected sections (a, b, c) of the gamma-ray spectrum, which is shown in Fig. 4. The main peaks of the technogenic radionuclides ^{60}Co , ^{94}Nb , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu and ^{241}Am are indicated

[Рис. 5. Отдельные секции (а, б, в) спектра гамма-излучения, представленного на рисунке 4. Указаны основные пики техногенных радионуклидов ^{60}Co , ^{94}Nb , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu и ^{241}Am . Обозначения: по оси х – энергия (кэВ); по оси у – число импульсов на канал]

Table 1

Activity concentrations (AC) of the gamma-ray emitting technogenic radionuclides in the glassy inclusion hp-2710 (Fig. 1) and in the native (unfractionated) soil (the depth layer 10–12 cm) from Plot 2 at the “Taiga” PNE site. Counting uncertainty (%) of the AC measurement is given in brackets at 1 sigma level. The reference date is August 5, 2009. The soil data are taken from [8]

[Таблица 1]

Удельная активность (УА) гамма-излучающих техногенных радионуклидов в стекловидном включении hp-2710 (см. рис. 1) и в нативной (нефракционированной) почве (глубина слоя 10–12 см) площадки № 2 на месте проведения МЯВ «Тайга». Статистическая неопределенность (%) измерения УА указана в скобках на уровне 1 сигмы.

Значения УА приведены на 5 августа 2009 г. Данные по УА в почве взяты из [8]]

Sample [Образец]	Radionuclide [Радионуклид]						
	¹³⁷ Cs	²⁴¹ Am	⁶⁰ Co	¹⁵² Eu	¹⁵⁴ Eu	¹⁵⁵ Eu	⁹⁴ Nb
	AC (Bq/g, d.w.) [УА (Бк/г, с.в.)]						
Inclusion hp-2710 [Включение hp-2710]	5.35 (0.9)	61.2 (0.7)	14.2 (0.5)	2.19 (4.8)	1.23 (4.2)	1.60 (5.3)	0.215 (9.1)
Native soil [Нативная почва]	3.68 (0.2)	5.80 (1.5)	1.43 (0.5)	0.148 (4.0)	0.0796 (6.6)	0.0748 (14)	0.0146 (14)
	The inclusion AC to the soil AC ratio [Отношение УА во включении к УА в почв]						
Inclusion vs. soil [Включение vs. почва]	1.5	11	9.9	15	15	21	15

Table 2

Activity concentrations (AC) of ¹³⁷Cs, ²⁴¹Am and ⁶⁰Co in the glassy inclusions and the ratio of AC in an inclusion to the AC in respective layer of native (unfractionated) soil from Plot 2 at the “Taiga” PNE site. Counting uncertainty (%) of the AC measurement is given in brackets at 1 sigma level. The reference date for activity calculation is August 5, 2009. Data on AC in soil are taken from [8]

[Таблица 2]

Удельная активность (УА) ¹³⁷Cs, ²⁴¹Am и ⁶⁰Co в почвенных стекловидных включениях и отношение УА во включении к УА в соответствующем слое нативной (нефракционированной) почвы с площадки № 2 на месте проведения МЯВ «Тайга». Статистическая неопределенность (%) измерения УА указана в скобках на уровне 1 сигмы. Значения УА приведены на 5 августа 2009 г. Данные по УА в почве взяты из [8]]

Soil layer depth (cm) [Глубина слоя почвы (см)]	Code of inclusion [Код включения]	Mass (g, d.w.) [Масса (г, с.в.)]	AC in inclusion (Bq/g, d.w.) [УА во включении (Бк/г, с.в.)]			The inclusion AC to the soil AC ratio [Отношение УА во включении к УА в почве]		
			¹³⁷ Cs	²⁴¹ Am	⁶⁰ Co	¹³⁷ Cs	²⁴¹ Am	⁶⁰ Co
6–8	hp-2002	0.281	4.02 (8.0)	31.2 (9.3)	8.70 (6.0)	1.0	9.8	8.6
10–12	hp-0102	0.385	5.14 (6.3)	54.2 (5.1)	11.6 (4.5)	1.4	9.3	8.1
10–12	hp-0901	0.263	7.89 (5.7)	107 (4.0)	21.9 (3.7)	2.1	18	15
10–12	hp-1301	0.289	5.39 (6.9)	97.2 (3.9)	17.9 (3.5)	1.5	17	13
10–12	hp-2710	6.66	5.35 (0.9)	61.2 (0.7)	14.2 (0.6)	1.5	11	9.9
12–14	hp-0203a	0.196	5.81 (4.2)	91.8 (2.8)	18.1 (2.4)	2.0	51	29
14–16	hp-0902	0.065	4.75 (17)	49.4 (20)	12.6 (10)	1.6	27	18
Median [Медиана]		0.28	5.35	61.2	14.2	1.5	17	13
Mean [Средняя]		1.16	5.48	70.2	15.0	1.6	20	15
SD [C.o.]		2.43	1.21	28.3	4.5	0.4	15	7

SD – standard deviation. [C.o. – стандартное отклонение.]

were especially pronounced for isotopes of the refractory and low-volatile elements Am, Co, Eu, and Nb (the boiling point values are 2011, 2927, 1527 and 4744 °C, respectively [11]).

УА ²⁴¹Am в стекловидных включениях на 1–2 порядка величины превышала минимально значимую удельную активность (МЗУА) (1 Бк/г) согласно НРБ-99/2009¹. Для ⁶⁰Co так-

¹ Norms of Radiation Safety (NRB-99/2009). Sanitary Rules and Norms SanPiN 2.6.1.2523-09. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 07.07.2009 No. 47. Registered by the Ministry of justice of the Russian Federation on August 14, 2009, registration No. 14534 (hereinafter – NRB-99/2009). (In Russ.) [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 No 47. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 14 августа 2009 г., регистрационный No 14534 (далее – НРБ-99/2009)].

For the remaining six glassy inclusions, the ACs could be reliably quantified only for ^{60}Co , ^{137}Cs , and ^{241}Am . It can be explained by very small mass of the inclusions (Table 2). As can be seen from Table 2, the ACs of ^{241}Am and ^{60}Co were much higher in the inclusions than in the native soil. For the radionuclide ^{137}Cs with a relatively low boiling point (671 °C) [11], the ratio values varied from 1.0 to 2.1; in general, the ratio significantly exceeded 1 (the nonparametric sign test, $P < 0.05$).

The ACs of ^{241}Am in the glassy inclusions were 1–2 orders of magnitude higher compared to the minimum significant activity concentration (MSAC) (1 Bq/g, for ^{241}Am) according to the Russian Standards of Radiation Safety (NRB-99/2009) ¹. For ^{60}Co , an approximately twofold excess of the corresponding MSAC value (10 Bq/g) was observed.

The ultrasound treatment of the hp-0203a inclusion led to removal of a certain amount of the matter from the surface of the specimen and, accordingly, to a slight decrease in the mass of the inclusion: by 2.0%. The activities of ^{137}Cs , ^{241}Am and ^{60}Co were 8.7%, 2.2% and 3.9% less in the sonicated inclusion than in the original specimen. These differences in activities between the original and treated sample were within the statistical uncertainties associated with the estimated net count rates in the full-energy peaks of interest: 661.6 keV, 59.6 keV, and 1332.5 keV. This experiment demonstrated the resistance of the glassy material to ultrasound exposure in water.

The radioactive glassy inclusions discovered in the surface layer of soil ejected by the “Taiga” thermonuclear explosions were called by us as “taiganite”. This matter has a certain similarity with the radioactive glassy material which may be formed on the soil surface in the event of near-surface nuclear explosions in the air. In particular, a glassy solid, called “trinitite”, was discovered at the site of detonation of the first world’s nuclear explosive device (the “Trinity” test, July 16 1945) at the military test site located near Alamogordo, New Mexico, USA [12]. Radioactive glassy particles with maximum sizes of up to 0.5–2 cm, as well as melted stones and sand similar to “trinitite”, could be found near the epicenter of the first nuclear test of the USSR (the product “RDS-1”, carried out on August 29, 1949 at the STS, Kazakhstan [13, 14]. The glassy particles received the common name “kharitons” (“kharitonchiki”) in honor of the outstanding Soviet nuclear physicist Yu.B. Khariton [14, 15]. Fission products (^{137}Cs , ^{155}Eu) and activation products (^{60}Co , ^{152}Eu , ^{154}Eu), as well as transuranium radionuclides (^{239}Pu , ^{241}Pu and ^{241}Am) were identified in “trinitite” and “kharitonchik” [12–14, 16–18]. Table 3 shows a comparison of these radioactive glassy materials and “taiganite” in relation to the AC of ^{137}Cs , ^{241}Am and ^{60}Co . In terms of the ^{137}Cs and ^{241}Am ACs, “taiganite” was close to “trinitite”. The ranges of the ^{60}Co AC values in “taiganite” and

же наблюдалось превышение соответствующей величины МЗУА (10 Бк/г) примерно в 2 раза.

Обработка включения hp-0203a ультразвуком в водной среде привела к удалению некоторого количества вещества с поверхности образца и, соответственно, небольшому уменьшению массы включения: на 2,0%. Активность ^{137}Cs , ^{241}Am и ^{60}Co в обработанном ультразвуком включении была на 8,7%, 2,2% и 3,9% ниже, чем таковая в исходном материале. Эти различия в активностях между исходным и обработанным образцом находились в пределах статистической неопределенности, связанной с оценкой площади фотопиков 661,6 кэВ, 59,6 кэВ и 1332,5 кэВ. Этот опыт продемонстрировал устойчивость стекловидного материала к воздействию ультразвука.

Радиоактивные стекловидные включения, обнаруженные нами в поверхностном слое грунта в месте проведения подземных экскавационных МЯВ «Тайга» и поименованные нами как «тайганиты», имеют определенное сходство с радиоактивным стекловидным материалом, который формируется на поверхности почвы в случае проведения приповерхностных ядерных взрывов в воздухе. В частности, стекловидное твердое вещество, исторически получившее название «тринитит», было обнаружено на месте подрыва первого в мире ядерного взрывного устройства (испытание «Trinity», 16 июля 1945 г.) на военном полигоне, расположенном около Аламогордо, Нью-Мексико, США [12]. Радиоактивные стекловидные частицы с максимальными размерами до 0,5–2 см, а также оплавленные камни и песок, подобные «тринититу», можно найти вблизи эпицентра первого ядерного испытания СССР (изделие РДС-1), проведенного 29 августа 1949 г. на Семипалатинском испытательном полигоне (СИП, Казахстан) [13, 14]. Стекловидные частицы получили бытовое название «харитоны» («харитончики») в честь выдающегося советского физика-ядерщика Ю.Б. Харитона [14, 15]. В «тринитите» и «харитончиках» были выявлены продукты деления (^{137}Cs , ^{155}Eu) и активации (^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu , ^{154}Eu), а также трансурановые радионуклиды (^{239}Pu , ^{241}Pu и ^{241}Am) [12–14, 16–18]. В таблице 3 приведено сравнение этих радиоактивных стекловидных материалов и «тайганитов» в отношении УА ^{137}Cs , ^{241}Am и ^{60}Co . По показателям УА ^{137}Cs и ^{241}Am «тайганиты» были близки к «тринититу». Диапазоны значений УА ^{60}Co в «тайганитах» и в «харитончиках» перекрывались и весьма существенно превышали таковые в «тринитите».

Исследованные на объекте «Тайга» радиоактивные отвалы грунта и стекловидные включения можно рассматривать как отходы, образовавшиеся при использовании ядерных зарядов в мирных целях, которые, в свою очередь, относятся к категории особых радиоактивных отходов^{2,3}.

² Federal Law No. 190-FZ dated 07/11/2011 (as amended on July 02, 2013) “On the management of radioactive waste and on amendments to certain legislative acts of the Russian Federation” (as amended and additionally entered into force on July 16, 2013). Moscow. 2013. 22 p. (In Russ.) [Федеральный закон от 11.07.2011 №190-ФЗ (ред. От 02.07.2013) «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (с изм. и доп., вступающими в силу с 16.07.2013). М., 2013. 22 с.]

³ Decree of the Government of the Russian Federation of October 19, 2012 N 1069 “On the criteria for classifying solid, liquid and gaseous waste as radioactive waste, the criteria for classifying radioactive waste as special radioactive waste and as disposed radioactive waste and the criteria for classifying disposed radioactive waste.” Moscow. 2012. 21 p. (In Russ.) [Постановление Правительства РФ от 19 октября 2012 г. N 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов». М., 2012. 21 с.]

Table 3

Activity concentration (AC) of technogenic radionuclides in glassy and melted materials found at sites of nuclear explosions: "taiganite" ("Taiga", the Perm region, Russia), "trinitite" ("Trinity", Alamogordo, USA), "kharitonchik" ("RDS - 1", STS, Kazakhstan)

[Таблица 3]

Удельная активность (УА) техногенных радионуклидов в стекловидных и оплавленных материалах, обнаруженных в местах проведения ядерных взрывов: «тайганит» («Тайга», Пермский край, Россия), «тринитит» («Тринити», Аламагордо, США), «харитончик» («РДС-1», СИП, Казахстан)]

Radionuclide [Радионуклид]	Activity concentration (Bq/g) [Удельная активность (Бк/г)]*		
	taiganite [тайганит]**	trinitite [тринитит]	kharitonchik [харитончик]
⁶⁰ Co	1350–3400	44–151 [12, 13, 17, 18]	~(180–2000) [14]***; 2260±70 [18]
¹³⁷ Cs	9.7–19.0	10–121 [12, 13, 16, 17, 18]	~(12–1500) [14]***; 621±18 [18]
²⁴¹ Am	31.2–107	1–37 [12, 13, 16, 17, 18]	~(4–150) [14]***; 2.4±0.2 [18]

* – AC for ⁶⁰Co and ¹³⁷Cs are provided on the date of detonation after decay correction; activities for ²⁴¹Am are reported per measurement day [УА ⁶⁰Co и ¹³⁷Cs указана на дату взрыва после поправки на распад; УА ²⁴¹Am дана на день измерений].

** – this work [эта работа].

*** – the approximate values of AC are given based on Figure 2 from [14] [приблизительные значения УА приведены на основе рисунка 2 из [14]].

"kharitonchik" overlapped each other, and the both exceeded that in "trinitite" significantly.

The dumps of radioactive soil at the "Taiga" PNE site [8] and the radioactive glassy inclusions in the soil should be considered as special radioactive waste generated from the use of nuclear charges for peaceful purposes^{2,3}. The basis for classifying the soil and the inclusions as radioactive waste at the "Taiga" site is the exceeding the ²⁴¹Am AC in the samples of the MSAC value for this radionuclide of 1 Bq/g (NRB-99/2009). The research of 2009 [8] showed that the ²⁴¹Am ACs in the upper 20 cm of soil at Plot No. 2 ranged from 1.8 to 5.8 Bq/g. The ²⁴¹Am AC greater than 1 Bq/g were also measured by Ramzaev et al. [8] in the soil samples from the northeastern and northwestern shores of the lake "Taiga" (Plots No. 3, 4 and 5 in Fig. 1).

By now (i.e. 15 years since the 2009 survey), the situation with the americium contamination could hardly have fundamentally changed because the half-life ($T_{1/2}$) of this radionuclide is 432 years. In addition, the pool of ²⁴¹Am can, to some extent, be replenished due to the beta decay of ²⁴¹Pu ($T_{1/2}$ = 14.4 year), the presence of which (for the general case) in a nuclear charge is quite likely [19]. Note that, in addition to ²⁴¹Am, the radioactive contamination of environmental media at the "Taiga" site includes other long-lived technogenic radionuclides, such as ⁶⁰Co ($T_{1/2}$ = 5.27 year) and ¹³⁷Cs ($T_{1/2}$ = 30.17 year). These should also be considered when assessing radiation environment in the areas of PNE [8, 20].

Considering the pronounced difference between native soil and glassy inclusions with respect to AC values for the detected technogenic radionuclides (with the exception of ¹³⁷Cs), it cannot be ruled out that the radioactive contamination of the ground at Plot No. 2 is mainly associated precisely with the inclusions in soil and not with the soil itself. This hypothesis needs to be tested using physical separation (sieving) of the native soil into size fractions and subsequent gamma spectrometric analysis of the fractions. The results of such research can be useful in understanding the radionuclides transfer processes in the soil-plant system and in making a forecast of the dynamics of the radiation environment at the "Taiga" PNE site.

Of additional interest is the radiation-hygienic assessment of small fractions of the glassy radioactive particles which may pose a hazard if inhaled.

Основанием для отнесения отвалов объекта «Тайга» к радиоактивным отходам является превышение УА ²⁴¹Am величины МЗУА данного радионуклида 1 Бк/г (НРБ-99/2009). Исследования 2009 г. показали, что нефракционированный грунт на юго-восточной части навала (берега) вокруг озера соответствует этой категории отходов: УА ²⁴¹Am в верхних 20 см почвы на площадке № 2 варьировала от 1,8 до 5,8 Бк/г [8]. Пробы почвы с УА ²⁴¹Am больше, чем 1 Бк/г, были обнаружены в 2009 г. [8] также на северо-восточном и северо-западном берегах озера «Тайга» (площадки № 3, 4 и 5 на рисунке 1). К настоящему времени (т.е. через 15 лет после обследований 2009 г.) ситуация с загрязнением ²⁴¹Am принципиально вряд ли могла измениться, т.к. период полураспада ($T_{1/2}$) этого радионуклида составляет 432 года. Кроме того, не исключено накопление активности ²⁴¹Am в навале за счет бета-распада ²⁴¹Pu ($T_{1/2}$ = 14,4 года), присутствие которого (для общего случая) в ядерном заряде вполне вероятно [19]. Отметим, что, помимо ²⁴¹Am, в состав радиоактивного загрязнения окружающей среды на объекте «Тайга» входят и другие долгоживущие техногенные радионуклиды, такие как ⁶⁰Co ($T_{1/2}$ = 5,27 года) и ¹³⁷Cs ($T_{1/2}$ = 30,17 года). Их тоже следует учитывать при оценке радиационной обстановки в местах проведения МЯВ [8, 20].

Принимая во внимание большую разницу между значениями УА большинства обнаруженных техногенных радионуклидов (за исключением ¹³⁷Cs) в нативной почве и таковыми в радиоактивных включениях, нельзя исключить, что радиоактивное загрязнение грунта на участке № 2 в значительной мере обусловлено стекловидными включениями. Эта гипотеза нуждается в проверке с использованием механического разделения (просеивания) нативной почвы на фракции по размеру и последующего гамма-спектрометрического анализа фракций. Данные, полученные в результате такого анализа, могут быть весьма полезны при изучении миграции радионуклидов в системе почва – растение и построении прогноза динамики радиационной обстановки на объекте «Тайга».

Дополнительный интерес представляет также радиационно-гигиеническая оценка мелких фракций стекловидных включений (частиц), которых могут представлять опасность при ингаляционном поступлении.

Conclusions

When sorting through the archive of the soil samples collected in 2009 at the “Taiga” PNE site, we found glassy inclusions ranging in size from several millimeters to 4 cm. The inclusions were present in soil samples from the southeastern shore of the “Taiga” lake. The high-resolution gamma spectrometry revealed the presence of the technogenic radionuclides ^{60}Co , ^{94}Nb , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu and ^{241}Am in the inclusions. The ACs of ^{241}Am and ^{60}Co in the inclusions were many times greater compared to those in the native soil. The ACs of ^{241}Am in the soil and inclusions were much higher than the level of minimum significant activity concentration (1 Bq/g) according to the Russian Standards of Radiation Safety (NRB-99/2009). In accordance with current Russian legislative and regulatory provisions regarding the use of nuclear charges for peaceful purposes, the soil and glassy inclusions in the soil at the “Taiga” site must be classified as special radioactive waste. Considering the long half-life of ^{241}Am (432 years), radiologically significant contamination by this radionuclide will persist at the “Taiga” site for the foreseeable future. In general, the “Taiga” site is that rare case of PNEs where special radioactive wastes are present directly on the earth surface. This circumstance should be taken into account during monitoring surveys of the site, including collection of samples of environmental media and their analysis in laboratory conditions.

Authors' personal contribution

Ramzaev V.P. – conceptualization, measurements, writing the manuscript.

Repin V.S. – conceptualization, editing the manuscript.

Acknowledgements

The authors thank the anonymous reviewers for their helpful comments that improved the quality of the manuscript.

Conflicts of interest

Authors declare the absence of conflicts of interest.

Sources of funding

The study was performed within the framework of the sectoral program of Rospotrebnadzor for 2021–2025: “Scientific substantiation of the national system for ensuring sanitary and epidemiological wellbeing, managing health risks and improving the quality of life of the population of Russia” on the topic: “Improving and developing methods for monitoring of environmental media in areas where peaceful nuclear explosions were performed. Radiation-hygienic characteristics of sources of drinking water supply.”

References

1. Nifontov BI, Protopopov DD, Sitnikov IE, Kulikov AV. Underground nuclear explosions. Atomizdat, Moscow; 1965. 160 p. Available from: http://elbib.biblioatom.ru/text/nifontov_podzemnye-yadernye-vzryvy_1965/go,0/ (Accessed 12.10.2023). (In Russian).
2. Smith DK, Bourcier WL. The production and dissolution of nuclear explosive melt glasses at underground test sites in the Pacific region. In: Proceedings of International Symposium on Marine Pollution. 5–9 October, 1998; Monaco. Available from: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/30/046/30046718.pdf (Accessed 08.11.2023).
3. Carrigan CR, Sun Y, Pili E, Neuville DR, Antoun T. Cavity-melt partitioning of refractory radionuclides and implications

Закключение

При ревизии архива проб окружающей среды, отобранных в 2009 г. в месте проведения МЯВ «Тайга», в некоторых пробах почвы нами были обнаружены стекловидные включения размером от нескольких миллиметров до 4 см. С помощью стационарного полупроводникового гамма-спектрометра в этих включениях были определены такие техногенные радионуклиды: ^{60}Co , ^{94}Nb , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu и ^{241}Am . Удельная активность ^{241}Am во включениях на 1–2 порядка величины превышала уровень минимально значимой удельной активности (1 Бк/г) согласно НРБ-99/2009. В соответствии с действующими российскими законодательно нормативными положениями, которые касаются использования ядерных зарядов в мирных целях, радиоактивный отвал грунта и обнаруженные стекловидные включения следует отнести к категории особых радиоактивных отходов. Учитывая длительный период полураспада ^{241}Am (432 года), радиологически значимое загрязнение почвы этим радионуклидом будет сохраняться в обозримой временной перспективе. В целом, объект «Тайга» является тем редким местом проведения МЯВ, где особые радиоактивных отходы присутствуют непосредственно на поверхности земли. Это обстоятельство следует учитывать на данном объекте при мониторинговых обследованиях, включающих отбор проб окружающей среды и их анализ в лабораторных условиях.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Рамзаев В.П. – концептуализация, измерения, написание рукописи.

Репин В.С. – концептуализация, редактирование рукописи.

Благодарности

Авторы благодарят двух анонимных рецензентов за полезные комментарии, которые позволили улучшить качество рукописи.

Информация о конфликте интересов

У авторов нет конфликта интересов, которые следует раскрывать.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена в рамках отраслевой программы Роспотребнадзора на 2021–2025 гг. «Научное обоснование национальной системы обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия, управления рисками здоровья и повышения качества жизни населения России» по теме: «Совершенствование и развитие методов мониторинга объектов окружающей среды в районах проведения мирных ядерных взрывов. Радиационно-гигиеническая характеристика источников питьевого водоснабжения».

Литература

1. Нифонтов Б.И., Протопопов Д.Д., Ситников И.Е., Куликов А.В. Подземные ядерные взрывы. Атомиздат: Москва, 1965. 160 с. URL: http://elbib.biblioatom.ru/text/nifontov_podzemnye-yadernye-vzryvy_1965/go,0/ (Дата обращения: 12.10.2023).
2. Smith D.K., Bourcier W.L. The production and dissolution of nuclear explosive melt glasses at underground test sites in the Pacific region. In: Proceedings of International Symposium

- for detecting underground nuclear explosions. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020;219: 106269.
4. Peaceful Nuclear Explosions: Guarantees of General and Radiation Safety / Ed. Prof. VA Logachev. Moscow, Izd.AT; 2001. 519 p. Available from: http://elib.biblioatom.ru/text/mirnye-yadernye-vzryvy_2001 (Accessed 12.10.2023). (In Russian).
 5. Borg IG, Stone R, Levy HB, Ramspott LD. Information pertinent to the migration of radionuclides in ground water at the Nevada test site. Part 1: Review and analysis of existing information. Lawrence Livermore Laboratory, USA. 1976; 216 p.
 6. Ramzaev V, Repin V, Medvedev A, Khramtsov E, Timofeeva M, Yakovlev V. Radiological investigations at the "Taiga" nuclear explosion site: Site description and *in situ* measurements. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2011;102: 672–680.
 7. Ramzaev VP, Repin VS, Khramtsov EV. Peaceful underground nuclear explosions: current issues on radiation safety for general public. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(2): 27–33. (In Russian).
 8. Ramzaev V, Repin V, Medvedev A, Khramtsov E, Timofeeva M, Yakovlev V. Radiological investigations at the "Taiga" nuclear explosion site, part II: man-made γ -ray emitting radionuclides in the ground and the resultant kerma rate in air. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2012;109: 1–12.
 9. Ramzaev V, Barkovsky A, Goncharova Yu, Gromov A, Kaduka M, Romanovich I. Radiocesium fallout at the grasslands on Sakhalin, Kunashir and Shikotan Islands due to the Fukushima accident: the radioactive contamination of soil and plants in 2011. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2013;118: 128–142.
 10. Laboratory of Spectrometry and Radiometry. Available from: http://www.lsrn.ru/en/products/detail.php?ELEMENT_CODE=nuclidemasterplus (Accessed 04.11.2023).
 11. Boiling Point of the elements. Available from: <https://periodictable.com/Properties/A/BoilingPoint.al.html> (Accessed: 02.12.2023).
 12. Parekh PP, Semkow TM, Torres MA, Haines DK, Cooper JM, Rosenberg PM, et al. Radioactivity in Trinitite six decades later. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006;85: 103–120.
 13. Pittauerova D, Kolb WM, Rosenstiel JC, Fisher HW. Radioactivity in Trinitite – a review and new measurements. Proceedings of Third European IRPA Congress, 14–18 June, 2010; Helsinki, Finland. P16–31. Available from: <http://www.irpa2010europe.com/proceedings.htm> (Accessed 08.11.2023).
 14. Vlasova IE, Yapaskurt VO, Averin AA, Melnik OE, Zolotov DA, Senin RA, et al. Nuclear melt glass from Experimental Field, Semipalatinsk Test Site. *Energies*. 2022;15: 9121.
 15. Davidchuk LYa. The story of the discovery of "kharitonchiki". In: About People and their Achievements. Ed.: SL Davydov. Ministry of Defense of the Russian Federation. 1997. pp. 205–207. Available from: https://elib.biblioatom.ru/text/o-lyudyah-i-sversheniyah_ch1_1997/ (Accessed 10.04.2024). (In Russian).
 16. Belloni F, Himbert J, Marzocchi O, Romanello V. Investigating incorporation and distribution of radionuclides in trinitite. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2011;102(9): 852–862.
 17. Bellucci JJ, Wallace C, Koeman EC, Simonetti A, Burns PC, Kieser J, et al. Distribution and behavior of some radionuclides associated with the Trinity nuclear test. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2013;295: 2049–2057.
 18. Mercer DJ, Koehler KE, Croce MP, Hoover AS, Hypes PA, Kozimor SA, et al. Gamma and decay energy spectroscopy measurements of Trinitite. *Nuclear Technology*. 2021;207(SUP1): S309–S320.
 - on Marine Pollution. 5–9 October, 1998; Monaco. URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/30/046/30046718.pdf (Дата обращения: 08.11.2023).
 3. Carrigan C.R., Sun Y., Pili E. et al. Cavity-melt partitioning of refractory radionuclides and implications for detecting underground nuclear explosions // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020. Vol. 219. P. 106269.
 4. 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. URL: http://elib.biblioatom.ru/text/mirnye-yadernye-vzryvy_2001 (Дата обращения: 12.10.2023).
 5. Borg I.G., Stone R., Levy H.B., Ramspott L.D. Information pertinent to the migration of radionuclides in ground water at the Nevada test site. Part 1: Review and analysis of existing information. Lawrence Livermore Laboratory, USA. 1976. 216 p.
 6. Ramzaev V., Repin V., Medvedev A. et al. Radiological investigations at the "Taiga" nuclear explosion site: Site description and *in situ* measurements // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2011. Vol. 102. P. 672–680.
 7. Рамзаев В.П., Репин В.С., Храмцов Е.В. Мирные ядерные взрывы: проблемы и пути обеспечения радиационной безопасности населения // *Радиационная гигиена*. 2009. Т. 2, № 2. С. 27–33.
 8. Ramzaev V., Repin V., Medvedev A. et al. Radiological investigations at the "Taiga" nuclear explosion site, part II: man-made γ -ray emitting radionuclides in the ground and the resultant kerma rate in air // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2012. Vol. 109. P. 1–12.
 9. Ramzaev V., Barkovsky A., Goncharova Yu. et al. Radiocesium fallout at the grasslands on Sakhalin, Kunashir and Shikotan Islands due to the Fukushima accident: the radioactive contamination of soil and plants in 2011 // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2013. Vol. 118. P. 128–142.
 10. Лаборатория спектрометрии и радиометрии. URL: http://www.lsrn.ru/en/products/detail.php?ELEMENT_CODE=nuclidemasterplus (Дата обращения: 04.11.2023).
 11. Boiling Point of the elements. URL: <https://periodictable.com/Properties/A/BoilingPoint.al.html> (Дата обращения: 02.12.2023).
 12. Parekh P.P., Semkow T.M., Torres M.A. et al. Radioactivity in Trinitite six decades later // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006. Vol. 85. P. 103–120.
 13. Pittauerova D., Kolb W.M., Rosenstiel J.C., Fisher H.W. Radioactivity in Trinitite – a review and new measurements. Proceedings of Third European IRPA Congress. 14–18 June, 2010; Helsinki, Finland. P. 16–31. URL: <http://www.irpa2010europe.com/proceedings.htm> (Дата обращения: 04.11.2023).
 14. Vlasova I.E., Yapaskurt V.O., Averin A.A. et al. Nuclear melt glass from Experimental Field, Semipalatinsk Test Site // *Energies*. 2022. Vol. 15. P. 9121.
 15. Давидчук Л.Я. История с находкой «харитончиков». В кн.: О людях и их свершениях. Ред. С.Л. Давыдов. МО РФ. 1997. С. 205–207. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/o-lyudyah-i-sversheniyah_ch1_1997/ (Дата обращения 10.04.2024).
 16. Belloni F., Himbert J., Marzocchi O., Romanello V. Investigating incorporation and distribution of radionuclides in trinitite // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2011. Vol. 102, No. 9. P. 852–862.
 17. Bellucci J.J., Wallace C., Koeman E.C. et al. Distribution and behavior of some radionuclides associated with the Trinity nuclear test // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2013. Vol. 295. P. 2049–2057.
 18. Mercer D.J., Koehler K.E., Croce M.P. et al. Gamma and decay energy spectroscopy measurements of Trinitite // *Nuclear Technology*. 2021. Vol. 207(SUP1). P. S309–S320.

19. Mark O.C. Explosive properties of reactor-grade plutonium // *Science and Global Security*. 2010. Vol. 17, No. 2–3. P. 170–185.
20. Рамзаев В.П., Медведев А.Ю., Репин В.С. и др. Радиационно-гигиенический мониторинг в местах применения ядерно-взрывных технологий в мирных целях и расчет доз облучения критических групп населения // Радиационная гигиена. 2010. Т. 3, № 1. С. 33–39.
19. Mark OC. Explosive properties of reactor-grade plutonium. *Science and Global Security*. 2010;17(2–3): 170–185.
20. Ramzaev VP, Medvedev AY, Repin VS, Timofeeva MA, Khrantsov EV. Radiation monitoring the industrial nuclear explosion sites and evaluation of the doses to the critical groups of population. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2010;3(1): 33–39. (In Russian).

Received: January 26, 2024

Поступила: 26.01.2024 г.

For correspondence: Valery P. Ramzaev – Candidate of Medical Sciences, Leading Researcher, External Exposure Laboratory, 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 (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: V.Ramzaev@mail.ru)

Viktor S. Repin – Doctor of Biological Sciences, Head of Ecology Laboratory of Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, 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, Санкт-Петербург, Россия. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: V.Ramzaev@mail.ru

Репин Виктор Степанович – доктор биологических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия.

For citation: Ramzaev V.P., Repin V.S. Radioactive glassy inclusions in the soil sampled at the “Taiga” peaceful underground nuclear explosions site (the Perm region, Russia). *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 2. P. 148–159. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-148-159

Для цитирования: Рамзаев В.П., Репин В.С. Радиоактивные стекловидные включения в почве, отобранной на месте проведения мирных подземных ядерных взрывов проекта «Тайга» (Пермский край, Россия) // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 148–159. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-148-159