

Накопление ^{137}Cs древесными растениями и съедобными грибами на месте проведения мирных ядерных взрывов «Тайга»

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

В 1971 году в Пермском крае (Российская Федерация) был проведен одновременный подрыв трех термоядерных зарядов серии «Тайга» с целью изучения возможности применения ядерных взрывных технологий для создания канала Печора–Кама. В результате этих подземных взрывов на поверхность земли вместе с грунтом и породой были выброшены долгоживущие техногенные радионуклиды. Со временем на отвалах радиоактивно загрязненного грунта сформировалась новая лесная экосистема. Целью настоящей работы являлась оценка накопления ^{137}Cs в древесных видах растений и в съедобных грибах на отдаленном этапе (спустя 38 лет) после радиоактивного загрязнения окружающей среды. Определено содержание ^{137}Cs в органах березы (*Betula pubescens*), ели (*Picea abies*), осины (*Populus tremula*) и сосны (*Pinus sylvestris*), а также в плодовых телах грибов видов *Boletus edulis* (белый гриб), *Lecaninum aurantiacum* (подосиновик), *Russula* (виды сыроежек) и *Suillus luteus* (масленок обыкновенный). Активность ^{137}Cs в образцах измеряли методом гамма-спектрометрии с использованием HPGe детектора. Значения удельной активности ^{137}Cs (на сухой вес) в пробах древесины, игл (1-го года)/листьев и грибов находились в диапазоне 0,5–6,8 Бк/кг, 54–112 Бк/кг и 212–3260 Бк/кг соответственно. Используя эти результаты и ранее опубликованные данные о плотности загрязнения почвы ^{137}Cs на объекте «Тайга», были вычислены значения агрегированного коэффициента перехода радионуклида в экологической паре почва–биота ($\text{кг}/\text{м}^2$). Установлено, что значения коэффициента перехода ^{137}Cs из почвы в биоту для всех исследованных видов на объекте «Тайга» являются крайне низкими по сравнению с теми, которые были оценены многими авторами для других мест радиоактивного загрязнения, в частности для территорий, загрязненных ^{137}Cs в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Обсуждены возможные причины малого накопления ^{137}Cs в биоте на объекте «Тайга».

Ключевые слова: древесные растения, съедобные грибы, ^{137}Cs , накопление, агрегированный коэффициент перехода, почва–биота, мирный ядерный взрыв, «Тайга».

Введение

Распределение и поведение радиоактивного цезия (в первую очередь ^{137}Cs , $T_{1/2} = 30,17$ года) в компонентах лесных экосистем к настоящему времени изучено достаточно подробно [1–6]. Наличие представительных натуральных данных и разработанных на их основе моделей дает возможность прогнозировать (в определенной степени) уровни содержания ^{137}Cs в лесных ресурсах (например, в древесине и съедобных грибах) и оценивать вероятность их соответствия гигиеническим стандартам на территориях с известными уровнями загрязнения почвы радионуклидами [7–9]. В более широком смысле имеющиеся натурные данные и соответствующие модели позволяют давать обоснованные рекомендации о том, как безопасно (с радиологической точки зрения) вести лесохозяйственную деятельность на радиоактивно загрязненных территориях [7, 10]. Отметим, что подавляющая масса собранных экспериментальных данных, а также соответствующие обобщения и прогнозы относятся к ситуации выпадения радионуклидов из атмосферы (последствия ядерных взрывов различного назначения и радиационных аварий) на уже сформировав-

шиеся лесные экосистемы.

Помимо продолжения наблюдений за «старыми» лесными экосистемами, в настоящее время определенным интересом представляет исследование процессов миграции радионуклидов в молодых («новых») лесах, формирующихся на радиоактивно-загрязненной территории после момента выпадений радионуклидов на почву. Такого рода залесение происходит как естественным путем, так и в результате высадки саженцев древесных растений человеком [4, 10]. В частности, весьма пространственные места зарастания деревьями и кустарниками бывших земель сельскохозяйственного назначения (луга, пастбища, пахотные поля) можно обнаружить в зоне чернобыльского загрязнения в Беларуси, в России и на Украине [11–13]. Самостоятельное восстановление и формирование лесных экосистем описано для мест проведения мирных ядерных взрывов (МЯВ) «Кратон-3» [14, 15] и «Тайга» [16, 17] в России.

Экспериментальные данные и оценки, представленные по рассматриваемому вопросу в работах [18, 19], свидетельствуют о сравнительно низких коэффициентах перехода ^{137}Cs из почвы в растения в молодых сосновых лесах, посаженных после Чернобыльской аварии. Коэффициенты

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

перехода ^{137}Cs из почвы в съедобные грибы, собранные на участках, которые зарастали молодыми соснами и березами, также оказались во много раз меньше таковых в старых лесах, выросших до момента радиоактивных выпадений [19, 20]. Однако в целом особенности накопления ^{137}Cs в компонентах формирующихся новых лесных экосистем изучены явно недостаточно для составления обобщенных прогнозов и моделей по динамике радиоактивного загрязнения в таких лесах. Это касается характеристик почвенного покрова и видов деревьев, особенностей источника радиоактивного загрязнения, а также форм нахождения радионуклида в почве.

Цель исследования – оценка накопления ^{137}Cs в древесных видах растений и в съедобных грибах из нового леса, выросшего на месте проведения экскавационных МЯВ эксперимента «Тайга» (Пермский край, Россия).

Задачи исследования

1. Измерить удельную активность (УА, Бк/кг) ^{137}Cs в пробах биоты, отобранных на объекте «Тайга», и проверить их соответствие критериям радиационной безопасности;

2. Используя опубликованные данные по плотности загрязнения почвы ^{137}Cs (A_{cs} , Бк/м²) на объекте «Тайга», вычислить значения агрегированных коэффициентов перехода ^{137}Cs из почвы в биоту (T_{ag} , м²/кг);

3. Сравнить значения T_{ag} , определенные в данном исследовании, с литературными данными.

Материалы и методы

Место обследования

Место обследования (61,30° с.ш., 56,60° в.д.) расположено на севере Пермского края. В 1971 г. в этом месте был проведен натуральный эксперимент с целью определения целесообразности использования ядерных взрывных технологий для строительства канала Печора–Кама [21]. Три термоядерных заряда (мощность каждого 15 кг в тротиловом эквиваленте) были заложены на глубину 127 м под землей и одновременно подорваны. В результате взрывов произошел выброс горной породы и грунта и формирование неглубокого котлована, окруженного навалом грунта. В процессе взрыва произошло объемное загрязнение раздробленной породы и разрыхленного грунта техногенными радионуклидами, среди которых присутствовали долгоживущие ^{60}Co , ^{94}Nb , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu , ^{207}Bi , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am [22, 23]. В последующем котлован естественным образом заполнился водой, и образовалось озеро размером 700 м на 350 м. Довольно быстро берега озера на навале стали зарастать травянистыми и древесными растениями [21].

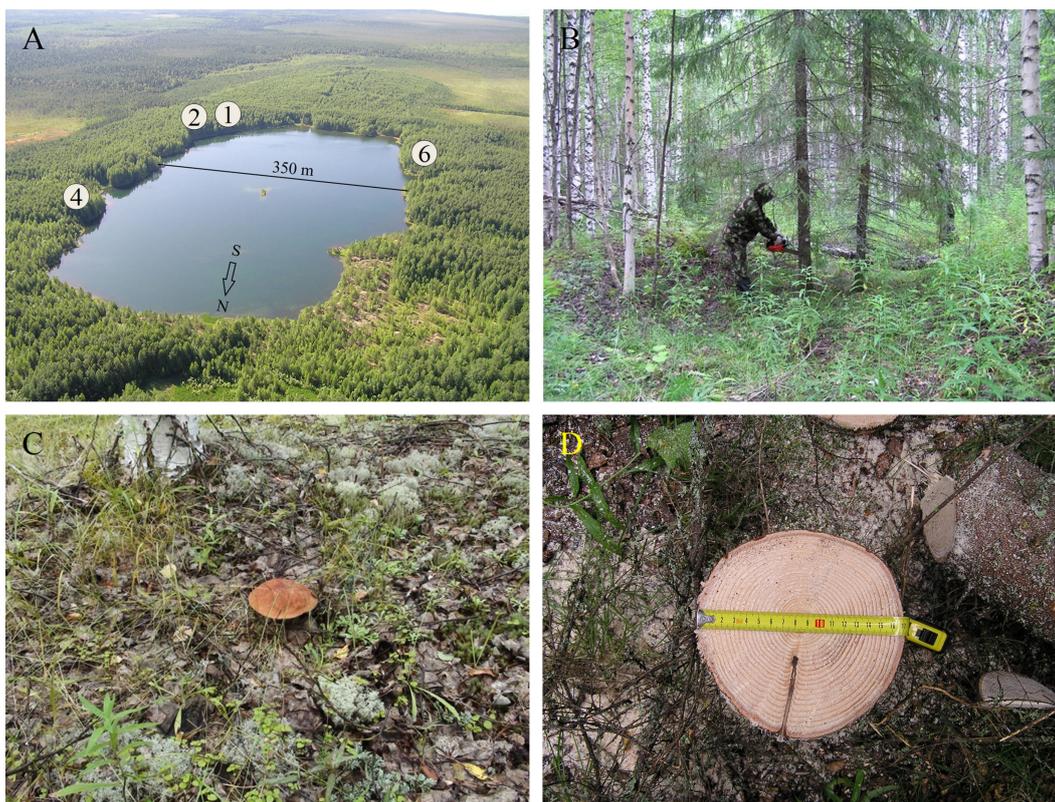


Рис. Место проведения МЯВ «Тайга» в августе 2009 г.: расположение пробных участков № 1, 2, 4, 6 (панель А, вид с вертолета с севера); общий вид участка № 2, спиливание выбранной ели (панель В); поверхность земли, покрытая подстилкой, лишайниками и мхами, и плодовое тело гриба подосиновика *Leccinum aurantiacum* (в центре) на участке № 1 (панель С); поперечный срез ствола ели *Picea abies*, спиленной на участке № 2 (панель D)

[Fig. The “Taiga” PNE site in August 2009: location of the sampled plots No. 1, 2, 4, 6 (panel A, a helicopter view from the north); a general view of plot No. 2, cutting down the selected spruce (panel B); the ground surface of plot No. 1 is covered by litter, lichens and mosses, and the fruiting body of the *Leccinum aurantiacum* mushroom is in the centre (panel C); a cross section of the trunk of the *Picea abies* tree cut down at plot No. 2 (panel D)]

Полевые исследования и отбор проб окружающей среды на объекте «Тайга» были выполнены в августе 2009 г. (через 38 лет после осуществления МЯВ «Тайга») в рамках совместной экспедиции, проведенной сотрудниками ФГУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева и представителями Роспотребнадзора в Пермском крае [17]. Облет объекта на вертолете и подробное пешеходное обследование показали, что практически весь отвал покрыт древесными, кустарниковыми и травянистыми растениями (рис. А, В). Среди деревьев преобладающим видом была береза (*Betula pubescens*); кроме того, встречались ель (*Picea abies*), осина (*Populus tremula*) и сосна (*Pinus sylvestris*). Значительная часть поверхности почвы на навале была покрыта лесным опадом, лишайниками и мхами (рис. С). Также имелись участки оголенной почвы (преимущественно на северо-западном берегу озера). Плодовые тела различных видов съедобных грибов (например, подосиновики; рис. С) встречались во многих местах на территории объекта. Таким образом, к моменту нашего обследования на объекте «Тайга» сформировалась молодая лесная экосистема. Более подробно описание объекта дано в [17].

По данным дозиметрического обследования [17] мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения в воздухе варьировалась на объекте «Тайга» от 72 до 1540 нЗв/ч и в среднем составила 274 нЗв/ч. Среднее значение МАЭД на фоновых участках было почти в четыре раза меньше и оценивалось величиной 76 нЗв/ч. Отбор проб почвы (верхний слой толщиной 20 см) был проведен в шести разных местах навала [23], из которых четыре участка (№ 1, 2, 4 и 6) использовали для отбора проб биоты (рис. А). Значения плотности загрязнения почвы ¹³⁷Cs (A_{cs}) на этих четырех участках находились в диапазоне 61–1020 кБк/м², что весьма существенно превышало величину этого показателя для фоновой территории (1,4 кБк/м²) [23].

Отбор проб биоты и их исследование в лаборатории

Отбор проб древесных растений был проведен на участке № 2 (рис. А), где были определены максимальные значения МАЭД (до 1540 нЗв/ч) и A_{cs} (до 1020 кБк/м²) [17, 23]. В пределах данного участка было выбрано по од-

ному представительному экземпляру основных лесобразующих видов: береза, сосна, ель, осина. Измерения МАЭД были проведены на расстоянии около 0,5 м от ствола каждого из выбранных деревьев на высоте 1 м и 0,1 м с использованием дозиметра рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1121 (АТОМТЕХ, Беларусь). После валки деревьев проводили определение некоторых основных морфометрических характеристик спиленных деревьев (высоту, диаметр ствола), а также их возраста путем подсчета годичных колец на спиле (рис. D). Результаты измерений приведены в таблице 1. Затем со спиленных деревьев отбирали веточки с живыми листьями (береза, осина) и иглами (ель, сосна), а также сухие веточки. Из ствола на высоте 1 м и приблизительно на середине высоты дерева выпиливали секции длиной 0,5 м. При отборе проб особое внимание уделялось предотвращению загрязнения образцов от поверхности почвы. Пробы упаковывали в отдельные маркированные пакеты из плотного полиэтилена. Плодовые тела съедобных грибов отбирали в местах расположения четырех площадок отбора проб земли (рис. А). Контрольные (фоновые) пробы грибов были взяты из старого леса вблизи лагеря экспедиции, на расстоянии около 2-х километров к юго-западу от объекта «Тайга», т.е. в том месте, где были отобраны фоновые пробы почвы [23].

Предварительная разделка и просушка всех биопроб проходила в полевой лаборатории лагеря экспедиции. В частности, кора деревьев была отделена от древесины и разделена на внутренний и наружный слои. Иглы были разделены по возрасту: для сосны – 1-го, 2-го и 3-го года; для ели – 1-го года и более старые. Секции древесины стволов были распилены на диски толщиной 2,5 см. Опилки были аккуратно собраны на полиэтиленовый поддон и использованы для определения удельной активности ¹³⁷Cs в древесине в целом. Для изучения радиального распределения ¹³⁷Cs в стволе дерева использовали диски от секции с высоты 1 м. Были определены и отмечены фломастером слои возрастом 1–3, 4–8, 9–13 и >13 лет. Далее соответственно выделенным слоям от периферии к центру диска откалывали кусочки толщиной до 1 см. Грибы были измельчены ножом. Полученные сырые заготовки были взвешены.

Таблица 1

Биометрические характеристики исследованных деревьев и мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения в воздухе (МАЭД) на расстоянии 0,5 м от ствола дерева

[Table 1

Biometric characteristics of the sampled trees and ambient dose equivalent rate of gamma radiation in air (ADER) at a distance of 0.5 m from the tree trunk]

Вид растения [Plant species]	Возраст (год) [Age (year)]	Высота (м) [Height (m)]	Диаметр ствола (см)* [Trunk diameter (cm)*]	МАЭД (нЗв/ч)** [ADER (nSv/h)**]
Осина [Aspen] (<i>Populus tremula</i>)	34	20,5	24/22	1040/1260
Береза [Birch] (<i>Betula pubescens</i>)	28	16,5	21/19	900/1550
Сосна [Pine] (<i>Pinus sylvestris</i>)	31	13,5	26/22	850/1280
Ель [Spruce] (<i>Picea abies</i>)	31	14,3	17/16	840/980

* – в числителе приведено значение на высоте 0,3–0,4 м, в знаменателе – на высоте 1,3 м [* – the numerator shows the value at a height of 0.3–0.4 m, the denominator – at a height of 1.3 m].

** – в числителе приведено значение на высоте 1 м, в знаменателе – на высоте 0,1 м; статистическая неопределенность измерения не превышала 5% при вероятности 95% [** – the numerator shows the value at a height of 1 m, the denominator – at a height of 0.1 m; statistical uncertainty of the measurement did not exceed 5% (a 95% confidence level)].

В стационарной лаборатории пробы были высушены при комнатной температуре и взвешены. Измерение активности ^{137}Cs проводили с использованием полупроводникового гамма-спектрометра по методике, описанной в работе [23]. Способность биоты накапливать ^{137}Cs оценивали с использованием агрегированного коэффициента перехода (T_{ag} , $\text{м}^2/\text{кг}$), который представляет собой отношение удельной активности радионуклида в пробе биоты ($\text{Бк}/\text{кг}$) к плотности загрязнения почвы радионуклидом ($\text{Бк}/\text{м}^2$) в месте отбора пробы [2].

Результаты и обсуждение

^{137}Cs в древесных растениях

Результаты измерений УА ^{137}Cs в изученных органах деревьев приведены в таблицах 2 и 3. Значения УА находились в диапазоне от $<0,4$ $\text{Бк}/\text{кг}$ до 112 $\text{Бк}/\text{кг}$. Этот разброс в основном связан с неравномерностью распределения радионуклида по органам деревьев. Максимальные значения УА были найдены в физиологически активных компонентах – листьях и иглах текущего года, а минимальные – в древесине. Для сосны, ели и березы УА ^{137}Cs в наружной коре была меньше, чем таковая во внутренней коре. Для сосны эти различия были почти 6-кратными. Для осины такой разницы между наружным и внутренним слоем обнаружено не было. Распределение ^{137}Cs в древесине по высоте было достаточно равномерным у всех видов. Радиальное распределение ^{137}Cs в древесине было неравномерным: во всех случаях наибольшая УА была зарегистрирована в самых молодых периферических кольцах (табл. 3).

Отбор проб древесных растений на объекте «Тайга» был осуществлен спустя 38 лет после момента радиоактивного загрязнения окружающей среды, т.е. в тот отдаленный период, когда можно ожидать сравнительно устоявшегося переноса радионуклидов внутри экосистемы, поэтому наши результаты о накоплении ^{137}Cs в различных компонентах деревьев следует сравнивать с теми опубликованными данными, которые имеют отношение именно к отдаленному периоду после радиоактивных выпадений, хотя источник загрязнения может быть другим.

Такое сопоставление показывает, что в целом результаты наших исследований, свидетельствующих о неравномерности накопления ^{137}Cs в разных компонентах древесных растений, разумно соответствуют закономерностям, обнаруженным при исследовании взрослых деревьев этих же четырех видов в зоне чернобыльского загрязнения в Беларуси: наиболее загрязненной является крона, менее загрязнена кора, и наименее загрязненной является древесина [7]. Полученные нами результаты о содержании ^{137}Cs в различных компонентах сосны с объекта «Тайга» также хорошо согласуются с данными А.И. Щеглова и др. [24], которые установили, что для данного вида взрослых деревьев в зоне чернобыльского загрязнения характерен следующий ряд интенсивности накопления радионуклида: «хвоя текущего года > внутренние слои коры > ветви мелкие > хвоя прошлых лет формирования > ветви крупные > наружные слои коры > древесина». Сопоставимое распределение ^{137}Cs выявлено при изучении молодых сосен, выросших после Чернобыльской аварии в Брянской области России [1, 18, 19]. Для наземной части молодых берез из зоны чернобыльского загрязнения в Брянской области накопление ^{137}Cs убывало в ряду: листья– кора–древесина

[1, 18], что совпадало с вариацией накопления радионуклида в органах березы с объекта «Тайга».

Радиальное распределение ^{137}Cs в древесине сосны и березы с объекта «Тайга» (максимум на периферии диска) соответствовало той картине, которую приводят авторы работ [18, 25] для 10–11-летних деревьев из зоны чернобыльского загрязнения в Брянской области. Вместе с тем Holiaka et al. [9] не выявили определенной тенденции при исследовании радиального распределения ^{137}Cs в древесине 15–17-летних сосен из украинской части 30-км зоны отчуждения вокруг Чернобыльской АЭС. Распределение ^{137}Cs в древесине молодых берез (возраст 8–19 лет) из этой же зоны также варьировалось: только в двух деревьях из шести отмечено нарастание УА радионуклида к периферии [9].

Значения агрегированного коэффициента перехода ^{137}Cs (табл. 2) в компонентах деревьев с объекта «Тайга» варьировались от $4,5 \times 10^{-7}$ (древесина ели на высоте 1 м) до $1,1 \times 10^{-4}$ (иглы первого года у сосны). Все полученные значения T_{ag} в отношении сосны, ели и березы для физиологически активных частей деревьев (листья, иглы) и древесины были меньше нижних границ диапазонов T_{ag} , указанных для данных видов деревьев в справочнике МАГАТЭ [2] (табл. 4). Оценки МАГАТЭ в основном базируются на данных, полученных при изучении последствий Чернобыльской аварии. Какие-либо оценки T_{ag} для осины в документе [2] не приводятся, и для сравнения мы использовали данные из работ [3, 7], выполненных при исследовании взрослых деревьев после Чернобыльской аварии. Данные таблицы 4 свидетельствуют о том, что T_{ag} (^{137}Cs) для осины на объекте «Тайга» существенно (на 2–3 порядка величины) ниже по сравнению с таковым для деревьев данного вида из мест, загрязненных чернобыльскими выпадениями.

Столь небольшое накопление ^{137}Cs в деревьях на объекте «Тайга» может быть связано, во-первых, с отсутствием первичного аэрозольного загрязнения растения радионуклидом, что обязательно имеет место в случае выпадений радионуклидов из атмосферы на уже существующие лесные экосистемы [2, 5]. Остаточное загрязнение, связанное с данным механизмом, прослеживается во взрослых деревьях через много лет после момента выпадений [3]. Вторым фактором влияния могут быть особенности форм нахождения радионуклида в почве. По данным работ [26, 27], часть запаса ^{137}Cs в почве на объекте «Тайга» присутствует в крупных твердых включениях (частицах), имеющих стекловидную основу. Показано [27], что при воздействии концентрированной соляной кислотой на стекловидную частицу и мелкодисперсную фракцию почвы прочность удержания радионуклида ^{137}Cs частицей была намного выше, чем почвой. Еще одним фактором влияния может быть вертикальное распределение ^{137}Cs в профиле почвы. Данное распределение на участке № 2 на объекте «Тайга» имеет весьма равномерный характер [23], в то время как для старых лесов, загрязненных ^{137}Cs после Чернобыльской аварии, даже в отдаленном периоде (20 лет и более), основная часть запаса радионуклида сосредоточена в верхних 10 см [28]. О потенциальной значимости этого фактора свидетельствуют работа [19], которая показала, что коэффициенты перехода ^{137}Cs в молодые сосны, выросшие на поле, многократно перепаханном после аварии, были на порядок ниже таковых для молодых сосен из старого леса.

Таблица 2

Удельная активность (УА, на сухой вес) ^{137}Cs в компонентах древесных растений и агрегированный коэффициент перехода ^{137}Cs из почвы в растение (T_{ag}) на участке № 2 ($A_{\text{cs}} = 1020 \text{ kBq/m}^2$) объекта «Тайга». Статистическая неопределенность измерения УА ^{137}Cs (СН) приведена в процентах на уровне 1 сигма

[Table 2

Activity concentration (AC, dry weight) of ^{137}Cs in components of woody plants, and the soil-to-plant aggregated transfer coefficient for ^{137}Cs (T_{ag}) at Plot 2 ($A_{\text{cs}} = 1020 \text{ kBq/m}^2$) of the “Taiga” site. The statistical uncertainty of the ^{137}Cs AC measurement (SU) is provided in percent at 1 sigma level]

Вид пробы [Sample type]	УА ^{137}Cs (Бк/кг) [^{137}Cs AC (Bq/kg)]	СН (%) [SU (%)]	T_{ag} ($\text{m}^2/\text{кг}$) [T_{ag} (m^2/kg)], $\text{п} \times 10^{-6}$
<i>Осина [Aspen]</i>			
древесина – 1 м [wood – 1 m]	5,7	11	5,6
древесина – 12 м [wood – 12 m]	6,8	9,8	6,7
кора наружная – 1 м [outer bark – 1 m]	68,6	2,4	67
кора наружная – 12 м [outer bark – 12 m]	75,7	2,3	74
кора внутренняя – 1 м [inner bark – 1 m]	62,7	3,5	62
кора внутренняя – 12 м [inner bark – 12 m]	67,9	3,3	67
листья [leaves]	86,7	2,1	85
веточки живые [live twigs]	61,1	3,4	60
веточки сухие [dry twigs]	9,8	7,3	9,6
<i>Береза [Birch]</i>			
древесина – 1 м [wood – 1 m]	4,5	9,8	4,4
древесина – 9 м [wood – 9 m]	5,9	8,8	5,8
кора наружная – 1 м [outer bark – 1 m]	6,3	11	6,2
кора наружная – 9 м [outer bark – 9 m]	2,4	9,4	2,3
кора внутренняя – 1 м [inner bark – 1 m]	18,9	6,2	18
кора внутренняя – 9 м [inner bark – 9 m]	21,3	4,1	21
листья [leaves]	57,2	3,7	56
веточки живые [live twigs]	30,9	4,0	30
веточки сухие [dry twigs]	12,3	4,9	12
<i>Сосна [Pine]</i>			
древесина – 1 м [wood – 1 m]	2,6	11	2,5
древесина – 6 м [wood – 6 m]	3,6	12	3,5
кора наружная – 1 м [outer bark – 1 m]	5,8	9,2	5,7
кора наружная – 6 м [outer bark – 6 m]	3,4	22	3,3
кора внутренняя – 1 м [inner bark – 1 m]	32,4	6,1	32
кора внутренняя – 6 м [inner bark – 6 m]	21,2	5,7	21
иглы 1-го года [1st year needles]	112	2,2	110
иглы 2-го года [2nd year needles]	17,8	7,0	17
иглы 3-го года [3rd year needles]	9,3	8,6	9,1
веточки живые [live twigs]	22,8	8,2	22
веточки сухие [dry twigs]	7,3	8,8	7,2
<i>Ель [Spruce]</i>			
древесина – 1 м [wood – 1 m]	0,47	20	0,45
древесина – 7 м [wood – 7 m]	0,61	15	0,59
кора наружная – 1 м [outer bark – 1 m]	6,4	9,4	6,3
кора наружная – 7 м [outer bark – 7 m]	4,8	16	4,7
кора внутренняя – 1 м [inner bark – 1 m]	7,3	6,0	7,2
кора внутренняя – 7 м [inner bark – 7 m]	11,3	5,8	11
иглы 1-го года (1st year needles)	54,7	2,3	54
иглы ≥ 2 -го года [≥ 2 nd year needles]	15,3	7,7	15
веточки живые [live twigs]	22,2	3,8	22
веточки сухие [dry twigs]	7,9	8,6	7,7

Таблица 3

Удельная активность (УА, сухой вес) ¹³⁷Cs в годовых кольцах древесины ствола дерева на высоте 1 м на объекте «Тайга». В скобках приведена статистическая неопределенность измерения в процентах на уровне 1 сигма

[Table 3

Activity concentration (AC, dry weight) of ¹³⁷Cs in annual rings of wood of the tree trunk at a height of 1 m at the “Taiga” site. The statistical uncertainty of the measurement is given in brackets in percent at 1 sigma level]

Возраст колец (год) [Age of rings (year)]	УА ¹³⁷ Cs (Бк/кг) [¹³⁷ Cs AC (Bq/kg)]			
	Осина [Aspen]	Береза [Birch]	Сосна [Pine]	Ель [Spruce]
1–3	12,4 (4,8)	9,5 (5,0)	4,6 (5,8)	0,71 (11)
4–8	3,9 (8,5)	2,4 (12)	2,0 (7,7)	<0,4
9–13	4,4 (8,4)	2,6 (11)	3,0 (7,0)	<0,4
>13	7,2 (6,4)	3,7 (7,3)	1,4 (15)	<0,4

Таблица 4

Агрегированные коэффициенты перехода (Т_{аг}) ¹³⁷Cs для листьев/игл и древесины по данным нашего исследования и данным литературы

[Table 4

Agregated transfer coefficients (T_{аг}) for ¹³⁷Cs in leaves/needles and wood according to our study and literature data]

Вид растения [Plant species]	Т _{аг} (м ² /кг) [T _{аг} (m ² /kg)]			
	Листья/иглы [Leaves/needles]		Древесина [Wood]	
	Это исследование [This study]	Данные литературы [Literature data]	Это исследование [This study]	Данные литературы [Literature data]
Осина [Aspen]	8,5×10 ⁻⁵	3,3×10 ⁻³ [3]; 1,4×10 ⁻² [7]*	(5,6–6,7)×10 ⁻⁶	5,8×10 ⁻⁴ [3]; 2,1×10 ⁻³ [7]
Береза [Birch]	5,6×10 ⁻⁵	2,8×10 ⁻³ –3,0×10 ⁻² [2]	(4,4–5,8)×10 ⁻⁶	2,4×10 ⁻⁴ –3,8×10 ⁻³ [2]
Сосна [Pine]	9,1×10 ⁻⁶ –1,1×10 ⁻⁴	2,4×10 ⁻⁴ –9,2×10 ⁻² [2]	(2,5–3,5)×10 ⁻⁶	1,1×10 ⁻⁴ –2,1×10 ⁻² [2]
Ель [Spruce]	(1,5–5,4)×10 ⁻⁵	5,7×10 ⁻⁴ –5,2×10 ⁻² [2]	(4,5–5,9)×10 ⁻⁷	2,8×10 ⁻⁴ –3,9×10 ⁻³ [2]

* – крона дерева [the tree crown].

По показателю УА ¹³⁷Cs древесина (хозяйственно значимая часть дерева) изученных древесных растений с объекта «Тайга» не превышает допустимый по ОСПОРБ-99/2010 (п. 3.11.3)¹ уровень в 100 Бк/кг, ниже которого продукция может использоваться без каких-либо ограничений. Однако следует учитывать, что и другие радионуклиды (например, ⁹⁰Sr) могут накапливаться в древесных растениях на объекте «Тайга» [16], поэтому окончательное решение (рекомендации) по использованию таких материалов с этого объекта следует принимать после дополнительных радиометрических исследований.

¹³⁷Cs в съедобных грибах

Значения УА ¹³⁷Cs в грибах, собранных на контрольной территории вблизи лагеря экспедиции, варьировались в узком диапазоне от 19 до 25 Бк/кг (табл. 5). Значения УА ¹³⁷Cs в грибах с объекта «Тайга» были более чем на порядок величины выше фоновых значений и находились в диапазоне: 220–3260 Бк/кг. Превышение допустимого уровня содержания ¹³⁷Cs в грибах (2500 Бк/кг на сухой вес, согласно СанПиН 2.3.2.1078-01²) было обнаружено только для одной пробы. О значениях УА ¹³⁷Cs, не превышающих гигиенический норматив, сообщают А.А. Лурье [16]

(до 213 Бк/кг) и Gedeonov et al. [22] (340±20 Бк/кг), которые проводили отбор проб грибов на объекте «Тайга» в 1998 г.

Хотя УА ¹³⁷Cs в грибах с объекта «Тайга» была многократно выше, чем таковая на фоновой территории, интенсивность перехода радионуклида из почвы в грибы (показатель Т_{аг}) оказалась на порядок величины ниже на объекте по сравнению с фоном (табл. 5, 6). Кроме того, (табл. 6), значения Т_{аг} ¹³⁷Cs для отдельных видов грибов на объекте «Тайга» были на уровне (либо даже меньше) нижних границ диапазонов Т_{аг}, приведенных в рекомендациях МАГАТЭ (табл. 6) для предсказания накопления радионуклидов в грибах в природных экосистемах [2]. Низкие значения Т_{аг} для ¹³⁷Cs на объекте «Тайга» в грибах, так же, как и в деревьях, могут быть связаны с особенностями форм нахождения радионуклида в почве [26, 27]. Определенную роль может играть равномерное вертикальное распределение радионуклида в почве. Например, для зоны чернобыльского загрязнения показано, что интенсивность перехода ¹³⁷Cs (Т_{аг}) из почвы в съедобные грибы видов *Leccinum* и *Suillus* в молодом лесу, выросшем на поле, многократно перепаханном после аварийного загрязнения, была на порядок ниже таковой в старом лесу [19].

¹ Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). [Basic sanitary rules for the provision of radiation safety (OSPORB 99/2010). (In Russ.)]

² Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. СанПиН 2.3.2.1078-01; Доп. и изм. 18 к СанПиН 2.3.2.1078-01. [Hygienic requirements for the safety and nutritional value of food products. SanPiN 2.3.2.1078-01; Add. and rev. 18 to SanPiN 2.3.2.1078-01. (In Russ.)]

Таблица 5

Удельная активность (УА, на сухой вес) ^{137}Cs в съедобных грибах и агрегированный коэффициент перехода ^{137}Cs из почвы в грибы (T_{ag}) на контрольной (фоновой) территории и на участках объекта «Тайга». Статистическая неопределенность измерения УА ^{137}Cs (СН) приведена в процентах на уровне 1 сигма. Плотность загрязнения почвы ^{137}Cs (A_{cs}) приведена по данным работы [23]

[Table 5]

Activity concentration (AC, dry weight) of ^{137}Cs in the edible mushrooms, and the soil-to-mushrooms aggregated transfer coefficient for ^{137}Cs (T_{ag}) at the background site and at the «Taiga» site. The statistical uncertainty of the ^{137}Cs AC measurement (SU) is provided in percent at 1 sigma level. The density of soil contamination by ^{137}Cs (A_{cs}) is taken from the study [23]

Код участка [Code of plot]	A_{cs} (кБк/м ²) [A_{cs} (kBq/m ²)]	Вид [Species]	УА ^{137}Cs (Бк/кг) [AC of ^{137}Cs (Bq/kg)]	СН (%) [SU (%)]	T_{ag} (м ² /кг) [T_{ag} (m ² /kg)]
<i>Фоновая территория [Background site]</i>					
Vas	1,34	Подосиновик [<i>Leccinum sp.</i>]	24,8	6,5	$1,9 \times 10^{-2}$
Vas	1,34	Сыроежка [<i>Russula sp.</i>]	19,0	5,1	$1,4 \times 10^{-2}$
Vas	1,34	Белый [<i>Boletus edulis</i>]	19,5	4,5	$1,5 \times 10^{-2}$
<i>Объект «Тайга» [The «Taiga» site]</i>					
1	269	Подосиновик [<i>Leccinum sp.</i>]	275	2,5	$1,0 \times 10^{-3}$
1	269	Сыроежка [<i>Russula sp.</i>]	595	3,5	$2,2 \times 10^{-3}$
2	1020	Подосиновик [<i>Leccinum sp.</i>]	938	2,2	$9,2 \times 10^{-4}$
2	1020	Сыроежка [<i>Russula sp.</i>]	418	0,7	$4,1 \times 10^{-4}$
4	901	Масленок [<i>Suillus sp.</i>]	3260	1,4	$3,6 \times 10^{-3}$
6	61,1	Белый [<i>Boletus edulis</i>]	217	3,6	$3,6 \times 10^{-3}$

Таблица 6

Агрегированные коэффициенты перехода (T_{ag}) ^{137}Cs для съедобных грибов по данным нашего исследования и по данным литературы

[Table 6]

Aggregated transfer coefficients (T_{ag}) for ^{137}Cs in the edible mushrooms according to our study and literature data

Вид [Species]	T_{ag} (м ² /кг) [T_{ag} (m ² /kg)]		
	«Тайга», это исследование [«Taiga», this study]	Фон, это исследование [Background, this study]	Данные литературы [2] [Literature data [2]]
Подосиновик [<i>Leccinum sp.</i>]	$9,2 \times 10^{-4} - 1,0 \times 10^{-3}$	$1,9 \times 10^{-2}$	$8 \times 10^{-4} - 1,1$
Сыроежка [<i>Russula sp.</i>]	$4,1 \times 10^{-4} - 2,2 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-2}$	$3 \times 10^{-2} - 4,2$
Белый [<i>Boletus edulis</i>]	$3,6 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$4 \times 10^{-3} - 1,4$
Масленок [<i>Suillus sp.</i>]	$3,6 \times 10^{-3}$	Не отобрано [Not sampled]	$7 \times 10^{-2} - 3,0$

Заключение

Изучено накопление ^{137}Cs деревьями и съедобными грибами в лесной экосистеме, сформировавшейся через 38 лет после проведения трех экскавационных термоядерных взрывов серии «Тайга». Установлено, что значения коэффициентов перехода ^{137}Cs из почвы в биоту на объекте «Тайга» являются крайне низкими по сравнению с теми, которые были оценены многими авторами для других мест радиоактивного загрязнения, в частности для территорий, загрязненных ^{137}Cs в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Одним из факторов, который может определять столь низкую интенсивность перехода радионуклида из почвы в биоту, является то, что часть запаса ^{137}Cs в почве на объекте «Тайга» присутствует в крупных твердых включениях (частицах), имеющих стекловидную основу. В целом уровни

загрязнения ^{137}Cs изученных биопроб с объекта «Тайга» оказались намного ниже гигиенических нормативов. Лишь для одной пробы грибов гигиенический норматив был превышен.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

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

В.С. Репин – концептуализация, отбор проб, редактирование рукописи.

Благодарности

Авторы выражают признательность бывшим сотрудникам ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева А. Медведеву, Е. Храпцову и В. Яковлеву, а также сотрудникам Роспо-

требнадзора в Пермском крае М. Драчеву и Д. Муравьеву за помощь в отборе проб на объекте «Тайга». Авторы благодарят двух анонимных рецензентов за ценные замечания, которые позволили улучшить качество статьи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа в части написания и редактирования рукописи выполнена в рамках отраслевой программы Роспотребнадзора на 2021–2025 гг. «Научное обоснование национальной системы обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия, управления рисками здоровью 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

- Fesenko S.V., Soukhova N.V., Sanzharova N.I. et al. Identification of processes governing long-term accumulation of ^{137}Cs in forest trees following the Chernobyl accident // *Radiation and Environmental Biophysics*. 2001. Vol. 40. P. 105–113.
- IAEA – International Atomic Energy Agency. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments. Technical Report Series No. 472. IAEA, Vienna. 2010.
- Малюта О.В., Конаков Д.Е., Гончаров Е.А. Радиэкологические исследования лесных экосистем Среднего Поволжья // *Лесной журнал*. 2010. № 4. С. 132–138.
- Раздайков А.Н., Марадудин И.И., Радин А.И., Ромашкин Д.Ю. Радиэкологические проблемы в лесах России // *Лесохозяйственная информация. Электронный сетевой журнал*. 2019. № 3. С. 116–133. DOI: 10.24419/LNI.2304-3083.2019.3.10 (Дата обращения: 27.06.2024).
- Ota M., Koarashi J. Contamination processes of tree components in Japanese forest ecosystems affected by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident ^{137}Cs fallout // *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 816. P. 151587.
- Evrard O., Clergue T.C., Chaboche P.A. et al. Research and management challenges following soil and landscape decontamination at the onset of the reopening of the Difficult-To-Return Zone, Fukushima (Japan) // *Soil*. 2023. Vol. 9, No. 2. P. 479–497.
- Турлай И.В., Чернушевич Г.А., Перетрухин В.В., Терешко В.В. Радиоактивное загрязнение древесины Чернобыльской зоны // *Лесной журнал*. 2001. № 2. С. 25–29.
- Кадука М.В., Шутов В.Н., Брук Г.Я., Балонев М.И. Роль физико-химических свойств почвы в формировании радиоактивного загрязнения грибов // *Радиационная гигиена*. 2008. Т. 1, № 1. С. 32–35.
- Holiaka D., Yoschenko V., Cherniaev O.R. et al. Variability of activity concentrations and radial distributions of ^{137}Cs and ^{90}Sr in trunk wood of Scots pine and Silver birch // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2023. Vol. 263. P. 107186.
- Jouve A., Tikhomirov F.A., Grebenkov A. et al. Management of contaminated forests. In: Karaoglou A., Desmet G., Kelly G.N., Menzel H.G. (Eds.). *The Radiological Consequences of the Chernobyl accident. Proceedings of the First International Conference*. Minsk, Belarus, 18 to 22 March 1996. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1996. P. 389–400.
- Шубина О.А., Титов И.Е., Кречетников В.В., Санжарова С.И. Вопросы возвращения в хозяйственное использование территорий, временно выведенных из землепользования после аварии на ЧАЭС. «Актуальные вопросы радиэкологии». Труды Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии». Под ред. Н.И. Санжаровой. Обнинск, 2018. С. 99–119.
- Hostert P., Kuemmerle T., Prishchepov A. et al. Rapid land use change after socio-economic disturbances: the collapse of the Soviet Union versus Chernobyl // *Environmental Research Letters*. 2011. Vol. 6. P. 045201.
- Matsala M., Bilous A., Myroniuk V. et al. The return of nature to the Chernobyl Exclusion Zone: increases in forest cover of 1.5 times since the 1986 disaster // *Forests*. 2021. Vol. 12. P. 1024.
- Koroleva T., Petrovsky V., Khitun O. Disturbance and recovery of vegetation at the sites of nuclear accidents in Arctic Yakutia. In: *Proceedings from Kalmars ECO-TECH'07: Technologies for Waste and Wastewater Treatment, Energy from Waste, Remediation of Contaminated Sites, Emissions Related to Climate*. November 26–28, 2007. Kalmars, Sweden. 2007. P. 607–615.
- Ramzaev V., Mishin A., Golikov V. et al. Radioecological studies at the Kraton-3 underground nuclear explosion site in 1978–2007: a review // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2009. Vol. 100. P. 1092–1099.
- Лурье А.А. Радиэкологическое исследование последствий ядерных взрывов с выбросом грунта на севере Пермской области. Часть 2. Радионуклиды в биосфере // *АНРИ*. 2002. № 3. С. 27–33.
- 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.
- Fogh C.L., Andersson K.G. Dynamic behaviour of ^{137}Cs contamination in trees of the Briansk region, Russia // *Science of the Total Environment*. 2001. Vol. 269. P. 105–115.
- Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Варфоломеева К.В., Некрасов В.А. Радиационная обстановка в молодом сосновом лесу, выросшем после Чернобыльской аварии // *Радиационная гигиена*. 2023. Т. 16, № 1. С. 40–51.
- Рамзаев В.П., Барковский А.Н. Оценка вторичного радиоактивного загрязнения деактивированного земельного участка, расположенного на территории зоны отдыха в лесистой местности // *Радиационная гигиена*. 2023. Т. 16, № 2. С. 52–64.
- 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.
- Gedeonov A.D., Petrov E.R., Savopulo M.I., Shkroev V.Y. Plutonium-239, 240, plutonium-238 and γ -emitting radionuclides in environmental samples near peaceful underground nuclear explosion site «Taiga» (European North-East Russia). In: Borretzen P., Jolle T., Strand P. (Eds.). *Proceedings from the International Conference on Radioactivity in the Environment*, September 1–5, 2002, Monaco. 2002.
- 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.
- Щеглов А.И., Цветнова О.Б., Касацкий А.А. Динамика загрязнения ^{137}Cs различных компонентов лесных экосистем Брянского Полесья // *Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение*. 2014. № 3. С. 17–22.

25. Soukhova N.V., Fesenko S.V., Klein D. et al. ^{137}Cs distribution among annual rings of different tree species contaminated after the Chernobyl accident // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2003. Vol. 65. P. 19–28.
26. 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.
27. Рамзаев В.П., Репин В.С. Удельная активность ^{60}Co , ^{137}Cs и ^{241}Am в просеянной почве и почвенных включениях с места проведения мирных ядерных взрывов «Тайга» // *Радиационная гигиена*. 2024. Т. 17, № 3. С. 79–92.
28. Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Варфоломеева К.В. Вертикальное распределение ^{137}Cs в дерново-подзолистой песчаной почве на лугах и в лесах Брянской области в 2015–2016 гг. // *Радиационная гигиена*. 2019. Т. 12, № 3. С. 27–41.

Поступила: 10.06.2024

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, руководитель отдела здоровья, 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

Для цитирования: Рамзаев В.П., Репин В.С. Накопление ^{137}Cs древесными растениями и съедобными грибами на месте проведения мирных ядерных взрывов «Тайга» // *Радиационная гигиена*. 2024. Т. 17, № 4. С. 7–17. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-7-17

^{137}Cs accumulation by woody plants and edible mushrooms at the «Taiga» peaceful nuclear explosions site

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

*In 1971 in the Perm region (the Russian Federation), three thermonuclear charges of the “Taiga” series were simultaneously detonated in order to test nuclear explosive technologies for creation of the Pechora–Kama canal. As a result of the underground explosions, long-lived technogenic radionuclides were released onto the surface of the earth along with soil and rock. Over time, a new forest ecosystem formed on the mound of the radioactively contaminated ground. The purpose of this study was to assess the ^{137}Cs accumulation by woody plants and edible mushrooms at the “Taiga” underground nuclear explosions site at a remote stage (38 years) after radioactive contamination of the environment. Content of ^{137}Cs was determined in organs of birch (*Betula pubescens*), spruce (*Picea abies*), aspen (*Populus tremula*), and pine (*Pinus sylvestris*), as well as in the fruiting bodies of mushrooms of the species *Boletus edulis*, *Leccinum aurantiacum*, *Russula*, and *Suillus luteus*. The activities of ^{137}Cs in the samples were measured by gamma-ray spectrometry using a HPGe detector. The values of ^{137}Cs activity concentration (on a dry weight basis) in the samples of wood, leaves/needles (1st year), and mushrooms were in the ranges of 0.5–6.8 Bq/kg, 54–112 Bq/kg, and 212–3260 Bq/kg, respectively. Aggregated transfer coefficients (kg/m^2) for the radionuclide in the biota species were calculated using these results and previously reported data on the density of soil contamination by ^{137}Cs at the “Taiga” site. It has been found that the transfer coefficients of ^{137}Cs from soil to biota for all studied species at the “Taiga” site are abnormally low compared to those obtained by many authors for other places of radioactive contamination, in particular for the areas contaminated by ^{137}Cs as a result of the Chernobyl accident. Possible reasons for the low accumulation of ^{137}Cs in the biota at the “Taiga” site are discussed.*

Key words: woody plants, edible mushrooms, ^{137}Cs , accumulation, aggregated transfer coefficient, soil–biota, peaceful nuclear explosion, “Taiga”.

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

Authors' personal contribution

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

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

Acknowledgments

The authors express their gratitude to former employees of the Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev A. Medvedev, E. Khramtsov, and V. Yakovlev, as well as to employees of the Rospotrebnadzor branch in the Perm region M. Drachev and D. Muravyov for assistance in sampling at the “Taiga” site. The authors thank two anonymous reviewers for their constructive comments that improved the quality of the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

Sources of funding

The article was written 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

- Fesenko SV, Soukhova NV, Sanzharova NI, Avila R, Spiridonov SI, Klein D, et al. Identification of processes governing long-term accumulation of ¹³⁷Cs in forest trees following the Chernobyl accident. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2001;40: 105–113.
- IAEA – International Atomic Energy Agency. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments. Technical Report Series No. 472. IAEA, Vienna; 2010.
- Malyuta OV, Konakov DE, Goncharov EA. Radioecological studies of forest ecosystems in Middle Povolzhje. *Lesnoy zhurnal = Forest Journal*. 2010;(4): 132–138 (In Russian).
- Razdaivodin AN, Maradudin II, Radin AI, Romashkin DYu. Radioecological problems in Russian forests. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya. Elektronnyy setevoy zhurnal = Forestry Information. Electronic Online Journal*. 2019;(3): 116–133. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2019.3.10 (Accessed: June 27, 2024) (In Russian).
- Ota M, Koarashi J. Contamination processes of tree components in Japanese forest ecosystems affected by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident ¹³⁷Cs fallout. *Science of the Total Environment*. 2022;816: 151587.
- Evrard O, Clergue TC, Chaboche PA, Wakiyama Y, Thiry Y. Research and management challenges following soil and landscape decontamination at the onset of the reopening of the Difficult-To-Return Zone, Fukushima (Japan). *Soil*. 2023;9(2): 479–497.
- Turlay IV, Chernushevich GA, Peretrukhin WV, Tereshko VV. Radioactive contamination of wood in the Chernobyl zone. *Lesnoy zhurnal = Forest Journal*. 2001;(2): 25–29 (In Russian).
- Kaduka M, Shutov V, Bruk G, Balonov M. Role of soil and climate characteristics in the formation of radioactive contamination of mushrooms. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2008;1(1): 32–35 (In Russian).
- Holiaka D, Yoschenko V, Cherniaiev OR, Moskaliuk A, Lesnik O, Levchuk S, et al. Variability of activity concentrations and radial distributions of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in trunk wood of Scots pine and Silver birch. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2023;263: 107186.
- Jouve A, Tikhomirov FA, Grebenkov A, Dubourg M, Belli M, Arkhipov N. Management of contaminated forests. In: Karaoglou A, Desmet G, Kelly GN, Menzel HG. (Eds.). *The Radiological Consequences of the Chernobyl Accident. Proceedings of the First International Conference*. Minsk, Belarus, 18 to 22 March 1996. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities; 1996: 389–400.
- Shubina OA, Titov IE, Krechetnikov VV, Sanzharova SI. Issues of return to economic use of territories temporarily withdrawn from land use after the Chernobyl accident. In: “Actual Problems of Radioecology”. Proceedings of the Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology”. Ed.: Sanzharova NI. Obninsk; 2018: 99–119 (In Russian).
- Hostert P, Kuemmerle T, Prishchepov A, Sieber A, Lambin EF, Radeloff VC. Rapid land use change after socio-economic disturbances: the collapse of the Soviet Union versus Chernobyl. *Environmental Research Letters*. 2011;6: 045201.
- Matsala M, Bilous A, Myroniuk V, Holiaka D, Schepaschenko D, See L, et al. The return of nature to the Chernobyl Exclusion Zone: increases in forest cover of 1.5 times since the 1986 disaster. *Forests*. 2021;12: 1024.
- Koroleva T, Petrovsky V, Khitun O. Disturbance and recovery of vegetation at the sites of nuclear accidents in Arctic Yakutia. In: Proceedings from Kalmar ECO-TECH'07: Technologies for Waste and Wastewater Treatment, Energy from Waste, Remediation of Contaminated Sited, Emissions Related to Climate. November 26–28, 2007. Kalmar, Sweden; 2007: 607–615.
- Ramzaev V, Mishin A, Golikov V, Argunova T, Ushnitski V, Zhuravskaya A, et al. Radioecological studies at the Kraton-3 underground nuclear explosion site in 1978–2007: a review. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2009;100: 1092–1099.
- Lurie AA. Radioecological study of consequences of the underground nuclear explosions with soil excavation in the north of the Perm region. Part 2. Radionuclides in biosphere. *ANRI*. 2002;(3): 27–33 (In Russian).
- 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.
- Fogh CL, Andersson KG. Dynamic behaviour of ¹³⁷Cs contamination in trees of the Briansk region, Russia. *Science of the Total Environment*. 2001;269: 105–115.
- Ramzaev VP, Barkovsky AN, Varfolomeeva KV, Nekrasov VA. Radiological situation in the young pine forest that grew after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(1): 40–51 (In Russian).
- Ramzaev VP, Barkovsky AN. Assessment of secondary radioactive contamination of a decontaminated land plot located on the territory of a recreation base in a wooded area. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(2): 52–64 (In Russian).
- Peaceful Nuclear Explosions: Guarantees of General and Radiation Safety. Ed.: Logachev VA. Moscow: Izd.AT; 2001. 519 p. (In Russian).
- Gedeonov AD, Petrov ER, Savopulo MI, Shkroev VY. Plutonium-239, 240, plutonium-238 and γ -emitting radionuclides in environmental samples near peaceful underground nuclear explosion site «Taiga» (European North-East Russia). In: Borretzen P, Jolle T, Strand P. (Eds.). Proceedings from the International Conference on Radioactivity in the Environment, 1–5 September, 2002, Monaco; 2002.

23. 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.
24. Shcheglov AI, Tsvetnova OB, Kasatskiy AA. Pollution dynamics ^{137}Cs of the various components of forest ecosystems Bryansk Polesye. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedeniye = Bulletin of Moscow University. Series 17. Soil Science*. 2014;(3): 17–22 (In Russian).
25. Soukhova NV, Fesenko SV, Klein D, Spiridonov SI, Sanzharova NI, Badot PM. ^{137}Cs distribution among annual rings of different tree species contaminated after the Chernobyl accident. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2003;65: 19–28.
26. Ramzaev VP, Repin VS. Radioactive glassy inclusions in the soil sampled at the «Taiga» peaceful underground nuclear explosions site (the Perm region, Russia). *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(2): 148–159.
27. Ramzaev VP, Repin VS. Activity concentrations of ^{60}Co , ^{137}Cs and ^{241}Am in sieved soil and soil inclusions from the «Taiga» peaceful nuclear explosions site. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(3):79–92.
28. Ramzaev VP, Barkovsky AN, Varfolomeeva KV. Vertical distribution of ^{137}Cs in soddy-podzolic sandy soil in grasslands and forests of the Bryansk region in 2015–2016. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(3): 27–41 (In Russian).

Received: June 10, 2024

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 (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

For citation: Ramzaev V.P., Repin V.S. ^{137}Cs accumulation by woody plants and edible mushrooms at the «Taiga» peaceful nuclear explosions site. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No 4. P. 7–17. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-7-17