

ПРИРОДНЫЕ И ИСКУССТВЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ В ЛАНДШАФТЕ ДУДЕРГОФСКИХ ВЫСОТ

NATURAL AND TECHNOGENIC RADIONUCLIDES IN THE DUDERHOF HEIGHTS LANDSCAPE

E. Ivanov

Summary. As a result of analyses of soil samples and samples of dry fungi fruit bodies carried out by gamma-spectrometry and beta-radiometry, it was found that the total activity of beta-emitting radionuclides in the Duderhof Heights landscape (Saint-Petersburg and Leningrad Region) is due to the natural isotope potassium-40. The contribution of caesium-137 to the total activity is insignificant, and it is confined only in the upper part of the soil profile to a depth of 15 cm. Isotopes of radium-226 and thorium-232 have been identified, and the distribution of the latter is uniform. The total activity of beta-emitting radionuclides in the fruiting bodies of fungi is also caused by potassium-40, and the accumulation coefficients on sod-carbonate soil are 1,5–2,0 times lower than on sod-podzolic soil, due to its acid-base properties.

Keywords: Duderhof Heights, landscape, natural and technogenic radionuclides, fungal fruiting bodies, accumulation.

Иванов Евгений Дмитриевич

Аспирант,

Санкт-Петербургский государственный университет

evgeniy_ivanov2000@mail.ru

Аннотация. В результате анализов почвенных проб и образцов сухих плодовых тел грибов, проведенных методами гамма-спектрометрии и бета-радиометрии было установлено, что в ландшафте Дудергофские высоты (Санкт-Петербург и Ленинградская обл.) суммарная активность бета-излучающих радионуклидов обусловлена природным изотопом калий-40. Вклад цезия-137 в суммарную активность незначительный, причем он приурочен только в верхней части почвенного профиля до глубины 15 см. Идентифицированы изотопы радий-226 и торий-232, причем распределение последнего носит равномерный характер. Суммарная активность бета-излучающих радионуклидов в плодовых телах грибов также вызвана калием-40, причем коэффициенты накопления на дерново-карбонатной почве в 1,5–2 раза ниже, чем на дерново-подзолистой почве, что обусловлено ее кислотно-основными свойствами.

Ключевые слова: Дудергофские высоты, ландшафт, природные и техногенные радионуклиды, плодовые тела грибов, накопление.

Введение

Для защиты здоровья населения и окружающей среды актуальной является задача мониторинга искусственных радионуклидов техногенного происхождения. Активность цезия-137 в различных ландшафтах связана прежде всего с авариями на объектах атомной энергетики и испытаниями ядерного оружия [1].

Активность радионуклидов антропогенного происхождения первоначально была обусловлена их выпадением из атмосферных аэрозолей. Вторичное перераспределение произошло за счет смыва с крон древесной растительности на поверхность почвы в лесных экосистемах и процессов вертикальной и горизонтальной миграции в болотных экосистемах [2].

В тоже время активность естественных радионуклидов радия-226, тория-232, урана-238 зависит от их концентрации в тех породах, на базе которых почва сформировалась. Кроме того, происходит их перераспределение в результате естественных геологических процессов, например в ландшафте Дудергофских высот происходит эманирование радона [3].

Мониторинг активности природных и антропогенных радионуклидов в различных ландшафтах является актуальным, поскольку необходим для защиты и сохранения здоровья населения. В настоящее время возможно поступление радионуклидов в продукты, которые потенциально могут быть использованы населением в качестве дополнительного источника питания. Прежде всего, это дикорастущие съедобных грибы — группа организмов, накапливающая радионуклиды антропогенного происхождения в большой степени [4] и традиционно используемая для приготовления различных блюд, имеющих свои региональные особенности.

В Ленинградской области преобладают подзолистые почвы [5]. При этом почвы Ижорской возвышенности — дерново-карбонатные, поскольку образовались на известковых горных породах ордовикского периода. Они более благоприятны для ведения сельского хозяйства. Поэтому их называют «нечерноземные черноземы» или «северные черноземы».

Ижорская возвышенность находится на территории Ломоносовского, Гатчинского и Волосовского районов Ленинградской области и Красносельского р-на Санкт-Петербурга. Площадь Ижорской возвышенности существенная, она составляет около 8 % территории

Ленинградской области [6], причем это лучшие земли для ведения сельского хозяйства. Нам необходимо знать распределение радионуклидов антропогенного происхождения в дерново-карбонатных почвах Ижорской возвышенности поскольку их интенсивно используют для производства сельскохозяйственной продукции.

Уникальным ландшафтом Ижорской возвышенности являются Дудергофские высоты. Памятник природы Дудергофские высоты образован тремя горами. Горы Воронья и Ореховая расположены у ж.д. станции Дудергоф, а гора Кирхгоф отстоит от них на два километра восточнее. Дудергофские высоты — группа холмов ледникового происхождения, которые на основе геологических данных рассматривают как единый ландшафт, сформировавшийся в результате деятельности ледника последнего валдайского оледенения.

На территории Ижорской возвышенности в ландшафте Дудергофских высот проводятся исследования источников природного излучения [3], [7]. Повышенная природная радиоактивность на Дудергофских высотах обусловлена выносом на поверхность, в результате ледникового подпора, нижележащих пород, богатых известнякам. Одним из существенных источников природных радионуклидов являются дикионемовые сланцы [8].

При этом, распределение радионуклидов искусственного происхождения, поступивших с атмосферными аэрозолями в ландшафт Дудергофских высот, нуждается в более детальном анализе. В Ленинградской обл. выпадения чернобыльского следа с плотностью загрязнения 1 Ки/км² (37000 Бк/м²) приурочены как к верховым торфяным сфагновым болотам, торфяным почвам с кислой реакцией среды, так и к дерново-карбонатным почвам. На карте загрязнения Ленинградской области цезием-137 на Ижорской возвышенности указана протяженная область загрязнения с плотностью 1 Ки/км² (37000 Бк/м²) от Большого Тешково до Котлов, Караваево и Раннолово [9].

Для изучения распределения природных и антропогенных радионуклидов был выбран ландшафт Дудергофских высот вследствие сочетания следующих факторов: холмистый рельеф местности, дерново-карбонатные почвы, наличие природных источников излучения и данные о выпадении цезия-137 в районе проведения исследований [9] на основании которых можно высказать предположение его присутствия в почве и природных объектах.

Цель работы. Проанализировать распределение радионуклидов в профиле дерново-карбонатной почвы ландшафта Дудергофские высоты (Санкт-Петербург и Ленинградская обл.), установить вклад цезия-137 в суммарную активность бета-излучающих радионуклидов и оценить его накопление в плодовых телах грибов.

Материалы и методы исследования

На Вороньей горе (Красносельский район Санкт-Петербурга) по маршруту, пролегающему с запада на восток через точки с координатами (N 59°42.161', E030°07.384', N 134 м), (N 59°42.125', E030°07.849', N 128 м), (N 59°42.051', E030°08.045', N 137 м) 09.09.2021 было отобрано 5 почвенных проб до глубины 0–10 см. Почва дерново-карбонатная типичная эродированная суглинистая сильнощелочная. В метрах отбора почвенных проб собирали находящиеся рядом плодовые тела грибов.

На втором этапе проведения исследований почвенные разрезы, глубина которых варьировала из-за особенностей рельефа и почвы, были заложены на Вороньей горе и горе Кирхгоф 20.09.2022.

Суммарную активность бета-излучающих радионуклидов измеряли на радиометре «Бета» с газоразрядным счетчиком торцевого типа СБТ-10. Время измерения 2000 с. Измерение фона проводили каждые 2 часа. Масса навески определялась объемом измерительной кюветы. Для измерения использовали образцы высушенные в потоке теплого воздуха до воздушно-сухой массы. Навеска почвы для измерения составляла 40 г, а для плодовых тел грибов 4 г.

Идентификацию радионуклидного состава пробы проводили на сцинтилляционном гамма-спектрометре МКГБ-01 «РАДЕК» производства НТЦ «Радиационная экология», позволяющем выявить в пробе содержание следующих изотопов: калий-40, цезий-137, радий-226, торий-232.

Результаты и их обсуждение

При проведении первого этапа данного исследования был применен следующий подход. Известно, что одними из организмов, максимально накапливающих цезий-137 являются грибы из группы образующих облигатную эктотрофную микоризу с корнями древесных пород [10]. Подход основан на том, что выбор мест для отбора почвенных проб проводится после обнаружения плодовых тел грибов, которые затем также собирают, высушивают и готовят из них образцы для последующего измерения изотопов. Предложенный подход к отбору почвенных проб позволяет дополнительно к распределению активности в профиле почвы анализировать их накопление плодовыми телами грибов.

Таким образом, на первом этапе исследований был проведен мониторинг суммарной активности бета-излучающих радионуклидов в прикопках, отобранных маршрутным методом в местах плодоношения грибов, образующих эктотрофную микоризу. Результаты пилотного мониторинга суммарной активности бета-излучаю-

щих радионуклидов калия-40 и цезия-137 в прикопках, выполненных на Вороньей горе по маршруту (см. раздел материалы и методы) следующие (Бк/кг): 449 ± 13 , 356 ± 10 , 413 ± 16 , 459 ± 5 , 369 ± 7 . Коэффициент вариации составляет 11,3 % что характеризует изменчивость суммарной активности как среднюю, причем ближе к незначительной (до 10 %). Активность дерново-карбонатной почвы, отобранной по маршруту на Вороньей горе, в 1,6–2,9 раза выше, чем активность дерново-подзолистой почвы в окрестностях чернобыльского следа (Гатчинский р-н, Ленинградская обл.), варьирующей от 160 до 220 Бк/кг. При этом, анализ радионуклидного состава проб методом гамма-спектрометрии показал, что в активность дерново-карбонатной почвы на Вороньей горе она обусловлена калием-40, в то время как в случае дерново-подзолистой почвы — цезием-137.

Анализ суммарной удельной активности радионуклидов, излучающих бета частицы, был проведен в плодовых телах грибов, собранных на маршруте, величина коэффициента накопления (КН) была определена по отношению к активности в почве (см. таблицу 1). Методом гамма-спектрометрии было установлено, что активность обусловлена природным изотопом калий-40.

Таблица 1.

Коэффициенты накопления бета-излучающих радионуклидов грибами из дерново-карбонатной почвы

№	Вид	Гриб $\bar{Q} \pm \Delta Q^*$, Бк/кг	Почва $\bar{Q} \pm \Delta Q^*$, Бк/кг	КН
1	<i>Lactarius vellereus</i> (Fr.) Fr.	1553 ± 65	356 ± 10	$4,4 \pm 0,3$
2	<i>Suillus luteus</i> (L.) Gray	1776 ± 72	413 ± 16	$4,3 \pm 0,3$
3	<i>Amanita fulva</i> (Schaeff.) Fr.	2158 ± 113	413 ± 16	$5,2 \pm 0,5$
4	<i>Lactarius torminosus</i> (Schaeff.) Pers.	978 ± 103	459 ± 5	$2,1 \pm 0,2$
5	<i>Russula emetica</i> (Schaeff.) Pers.	1854 ± 98	369 ± 7	$5,0 \pm 0,4$

Примечание: * — расчёт доверительного интервала средней активности проведён при уровне значимости $p < 0,05$

Источник: измерения автора

Коэффициенты накопления (КН) грибами по отношению к дерново-карбонатной почве имеют более низкие значения, чем на дерново-подзолистой. Это связано с тем, что в условиях слабощелочной среды бета-излучающие радионуклиды с одной стороны менее подвижны, а с другой могут фиксироваться в межпакетном пространстве глинистых алюмо-силикатных минералов.

На следующем этапе исследования в месте массового плодоношения грибов, был выполнен почвенный

разрез на глубину 40 см. В образцах почвы, отобранных с шагом 5 см, были проведены анализ суммарной активности бета-излучающих радионуклидов и идентификация радионуклидного состава методом гамма-спектрометрии с измерением их активности. Полученные результаты представлены в табл. 2. На рис. 1 приведена гистограмма распределения суммарной активности бета-излучающих радионуклидов в профиле почвы, которая показывает, она носит равномерный характер, коэффициент вариации составляет 8,4 %. Это характеризует изменчивость распределения суммарной активности радионуклидов как незначительную (до 10 %). Распределение радионуклидов в профиле дерново-карбонатной почвы на Вороньей горе отличается от регрессивного типа распределения для которого характерен максимум активности в верхней части почвенного профиля, приуроченный к подстилке, с резким снижением активности в минеральной части профиля, что наблюдается для дерново-подзолистых почв, в Гатчинском и Лужском районах Ленинградской области [2].

Таблица 2.

Активность радионуклидов в профиле дерново-карбонатной почвы Вороньей горы по данным бета-радиометрии и гамма-спектрометрии

Н, см	^{40}K и $^{137}\text{Cs}^*$, Бк/кг	$^{137}\text{Cs}^{**}$, Бк/кг	$^{40}\text{K}^{**}$, Бк/кг	$^{226}\text{Ra}^{**}$, Бк/кг	$^{232}\text{Th}^{**}$, Бк/кг
0–5	434 ± 24	н п/о	н п/о	75 ± 36	82 ± 15
5–10	443 ± 21	27 ± 10	347 ± 100	н п/о	86 ± 15
10–15	401 ± 20	19 ± 9	423 ± 88	н п/о	89 ± 14
15–20	407 ± 14	н п/о	353 ± 79	47 ± 22	70 ± 12
20–25	397 ± 15	н п/о	н п/о	н п/о	75 ± 34
25–30	467 ± 16	н п/о	496 ± 140	79 ± 39	68 ± 17
30–35	499 ± 19	н п/о	560 ± 150	83 ± 41	75 ± 18
35–40	467 ± 15	н п/о	604 ± 200	н п/о	89 ± 23

Примечания:

* — суммарная бета-активность по результатам бета-радиометрии, доверительный интервал определен при уровне значимости $p < 0,05$;

** — активность радионуклида по данным гамма-спектрометрии, указана абсолютная погрешность; н п/о активность ниже предела обнаружения прибора, т.е. не наблюдается

Источник: измерения автора

Анализ радионуклидного состава почвенных проб методом гамма-спектрометрии показывает (см. таблицу 2), что активность бета-излучающих радионуклидов обусловлена изотопом калий-40, в то время как цезий-137 отмечен в небольших количествах только в образцах на глубине от 5 до 15 см. При этом установлено,

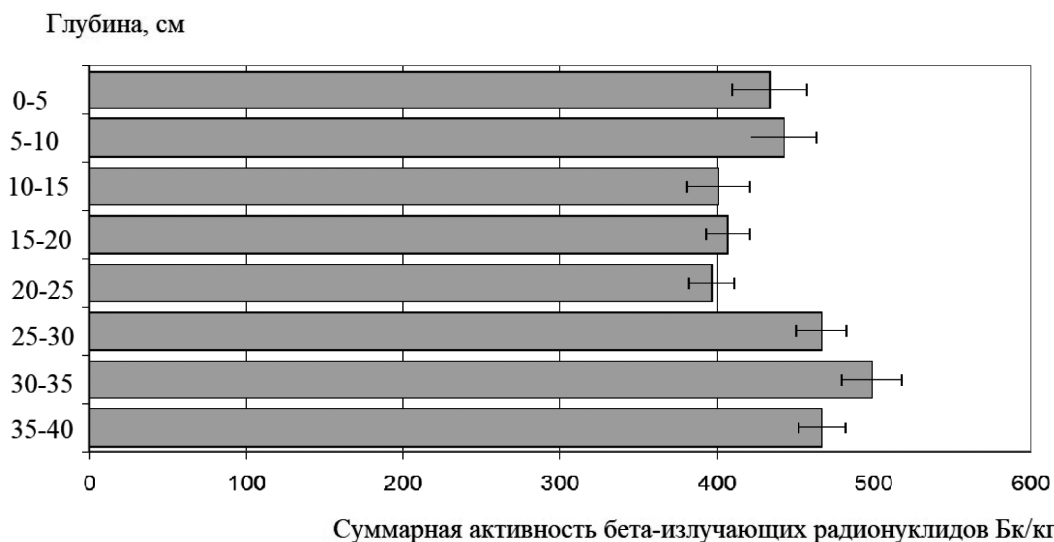
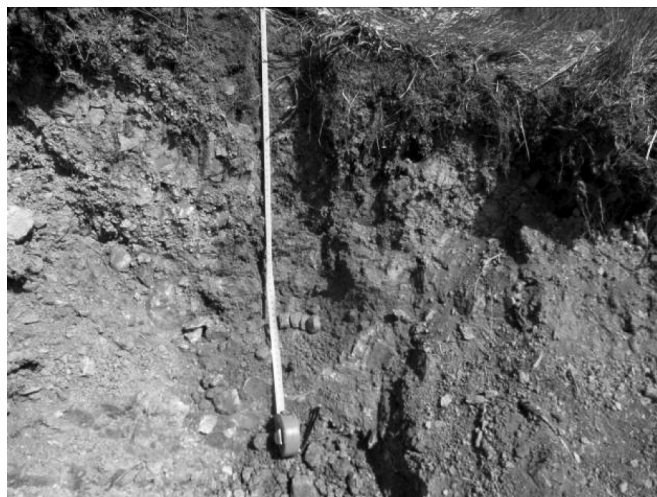


Рис. 1. Гистограмма распределения удельной активности бета излучающих радионуклидов в профиле дерново-карбонатной почвы на Вороньей горе

Источник: составлено автором на основе данных таблицы 2



А. Вид на северо-западный склон горы Кирхгоф



В. Почвенный разрез на северо-западном склоне горы Кирхгоф I



С. Вид на юго-восточный склон горы Кирхгоф



Д. Почвенный разрез на юго-восточном склоне горы Кирхгоф II

Рис. 2. Места отбора проб на горе Кирхгоф и почвенные разрезы

Источник: фотографии автора

что почва содержит изотопы радий-226 и торий-232, причем распределение последнего носит равномерный характер.

Гора Кирхгоф является частью природного ландшафта Дудергофские высоты. Согласно административно-территориальному делению, гора Кирхгоф находится в Ломоносовском районе Ленинградской области, а горы Ореховая и Воронья входят в состав Красносельского р-на Санкт-Петербурга, т.е. части единого ландшафта Дудергофские высоты находятся на территории разных субъектов Российской Федерации. Это обстоятельство необходимо учитывать, поскольку оно имеет значение для регулирования деятельности, направленной на сохранение уникального природного объекта.

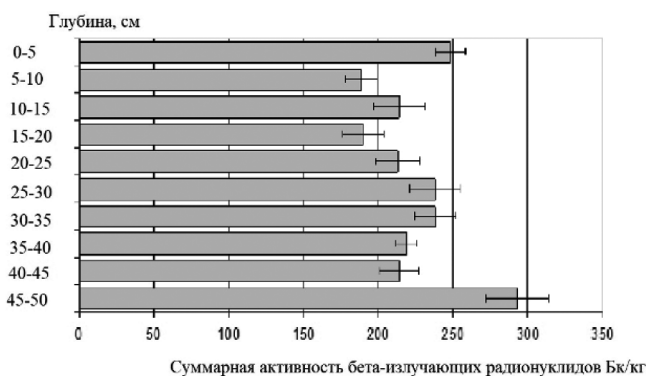
На рисунке 2 представлены фотографии мест отбора почвенных проб и почвенные разрезы. Для представления результатов измерения активности бета-излучающих радионуклидов в таблице 3 почвенный разрез на северо-западном склоне горы (см. рисунок 2А) обозначен как Кирхгоф I (см. рисунок 2В), а на юго-восточном склоне (см. рисунок 2С), как Кирхгоф II (см. рисунок 2Д).

Результаты анализа активности бета-излучающих радионуклидов представлены в таблице 3.

Таблица 3.

Активность радионуклидов в профиле дерново-карбонатной почвы горы Кирхгоф по данным бета-радиометрии

№	Н, см	Кирхгоф I $\bar{Q} \pm \Delta Q^*$, Бк/кг	Кирхгоф II $\bar{Q} \pm \Delta Q^*$ Бк/кг
1	0–5	248±10	260±7
2	5–10	189±11	247±8
3	10–15	214±17	227±14
4	15–20	190±14	221±4



А. Северо-западный склон Кирхгоф I

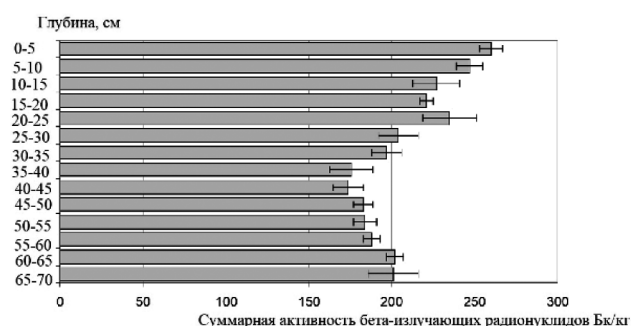
№	Н, см	Кирхгоф I $\bar{Q} \pm \Delta Q^*$, Бк/кг	Кирхгоф II $\bar{Q} \pm \Delta Q^*$ Бк/кг
5	20–25	213±15	235±16
6	25–30	238±17	204±12
7	30–35	238±14	197±9
8	35–40	219±7	176±13
9	40–45	214±13	174±9
10	45–50	293±21	183±6
11	50–55	–	184±7
12	55–60	–	188±5
13	60–65	–	202±5
14	65–70	–	201±15

Примечание: * — расчёт доверительного интервала средней активности проведён при уровне значимости $p < 0,05$

Источник: измерения автора

На рисунке 3 приведены гистограммы распределения суммарной бета-активности в профиле почвы, построенные по данным таблицы 3, которая показывает, распределение носит равномерный характер, коэффициент вариации активности для почвы Кирхгоф I составляет 13,6 %, а для почвы Кирхгоф II 13 %. Это характеризует изменчивость распределения суммарной бета активности радионуклидов как среднюю (от 10 % до 20 %), причем ближе к несущественной. Главной характеристикой распределения активности в профиле почвы является то, что она не уменьшается с глубиной, что было бы характерно для регрессивного распределения, а носит более выраженный равномерный характер, о чем свидетельствуют коэффициенты вариации.

В центральной части горы Кирхгоф находятся выходы кембрийской глины, в которой также был заложен



В. Юго-восточный склон Кирхгоф II

Рис. 3. Гистограммы распределения суммарной активности бета излучающих радионуклидов в дерново-карбонатной почве горы Кирхгоф

Источник: составлено автором на основе таблицы 3



А. Почвенный разрез в месте выхода кембрийской глины
Рис. 4. Отбор образцов в центральной части горы Крихгоф



В. Плодовое тело Подосиновика красного
Рис. 4. Отбор образцов в центральной части горы Крихгоф

Источник: собственные фотографии автора

почвенный разрез до глубины 40 см (см. рисунок 4А). Результаты проведенного анализа представлены в таблице 4. Суммарная активность бета-излучающих радионуклидов в полтора — два раза выше в кембрийской глине, чем в образцах дерново-карбонатной почвы (см. таблицу 3), но она также обусловлена присутствием калия-40. Коэффициент вариации активности в кембрийской глине на горе Крихгоф составляет 13,6 %, что также характеризует изменчивость распределения суммарной активности радионуклидов как среднюю, причем ближе к незначительной.

В центральной части горы Крихгоф было обнаружено плодовое тело Подосиновика красного — *Leccinum aurantiacum* (Bull.) Gray (см. рисунок 4В) под которым была выполнена прикопка на глубину 8 см. Результаты измерения активности для шляпки плодового тела со-

Таблица 4.
Суммарная активность бета-излучающих радионуклидов в кембрийской глине

№	Н, см	$\bar{Q} \pm \Delta Q^*$ Бк/кг
1	0–5	497±20
2	5–10	361±13
3	10–20	369±13
4	20–30	389±7
5	30–40	394±6

Примечание: * — расчёт доверительного интервала средней активности проведён при уровне значимости $p < 0,05$
Источник: измерения автора

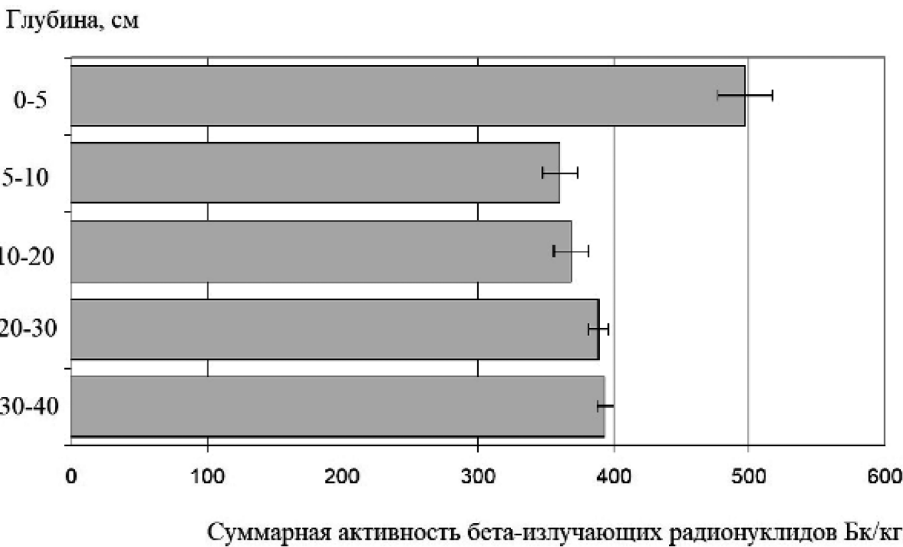


Рис. 5. Гистограмма распределения суммарной активности бета-излучающих радионуклидов в кембрийской глине
Источник: рисунок составлен на основании таблицы 4

ставили 1728 ± 310 Бк/кг, методом гамма спектрометрии было установлено что основной вклад в активность вносит изотоп калий-40. Результат измерения активности верхней части почвенного профиля под грибом составил 370 ± 7 Бк/кг. Коэффициент накопления КН плодовым телом гриба из почвы составляет $4,7 \pm 0,9$, что ниже значений полученных для плодовых тел грибов, формирующихся на дерново-подзолистых почвах, для которых КН варьирует в диапазоне от 6 до 10, что обусловлено кислотностью почвы.

Закключение

Установлено, что распределение активности бета-излучающих радионуклидов в экосистемах ландшафта Дудергофские высоты на 95 % обусловлено калием-40. Распределение калия-40 в профиле почвы носит равномерный характер. Вклад цезия-137 в суммарную бета

активность незначительный, в профиле почвы его практически не наблюдается. В случае его присутствия он приурочен к верхней части почвенного профиля к горизонтам, расположенным до глубины 15 см. Установлено присутствие в профиле радия-226 и тория-232, причем распределение тория-232 носит равномерный характер.

Активность в плодовых телах грибов обусловлена присутствием калия-40, по цезию-137 она не превышает допустимых значений. Коэффициенты накопления бета-излучающих радионуклидов плодовыми телами грибов, варьируют в диапазоне от 2,1 до 5,2 (см таблицу 1), что ниже чем коэффициенты накопления из дерново-подзолистой почвы, поскольку дерново-карбонатная почва, благодаря значениям pH, близким к нейтральным, ограничивает подвижность ионов щелочных металлов, в том числе и изотопа цезий-137.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильин Л.А., Губанов В.А. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры. М.: «ИздАТ». 2001. 752 с.
2. Ivanov E.D. Distribution of cesium-137 in peat soil of a high-bog depending on the microrelief // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, (2022), 981 (3), № 032042 DOI: 10.1088/1755-1315/981/3/032042
3. Лебедев С.В., Рубаник А.В., Климова Л.А. Дудергофские высоты, высокорadioактивные геологические тела и экологический риск // Геология, геоэкология, эволюционная география: Коллективная монография / Под ред. Е.М. Нестерова, В.А. Снытко. Том XVII. — Санкт-Петербург: Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, 2018. — С. 153–161. — EDN YUBRAT.
4. Шабалева М.А., Булко Н.И., Козлов А.К. Прогнозирование радиоактивной загрязненности лесной пищевой продукции ^{137}Cs и средней дозы внутреннего облучения организма за счет ее употребления // Проблемы здоровья и экологии. — 2014. — № 2(40). — С. 119–125. — EDN TSLELB.
5. Пестряков В.К. (ред.) Почвы Ленинградской области Л.: Лениздат, 1973. — 344 с.
6. Дужников Ю.А. По Ижорской возвышенности: Путеводитель для туристов. — Л.: Лениздат, 1972. — 216 с.
7. Белая А.К. Радиационная обстановка на территории памятника природы регионального значения «Дудергофские высоты» // Экологическая химия. — 2024. — Т. 33, № 5. — С. 248–256. — EDN KJKIFS.
8. Ефремова У.С. Радиоэкологический мониторинг участков выходов диктионемовых сланцев на дневную поверхность на территории Ленинградской области // Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития: тезисы докладов Всероссийской научной конференции, Москва, 20–22 марта 2017 года / ФГБУ «Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН». — Москва: Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, 2017. — С. 629–630. — EDN ZNIYTZ.
9. Ленинградская область. Карта радиоактивного загрязнения местности (цезием — 137). 1: 200 000. СПб.: КПЦ «Ленлес». 1992. 30 листов карт.
10. Щеглов А.И., Цветнова О.Б. Грибы — биоиндикаторы техногенного загрязнения // Природа. 2002. № 11. С. 39–6.

© Иванов Евгений Дмитриевич (evgeniy_ivanov2000@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»