

УДК 539.163:582.29:621.039

НАКОПЛЕНИЕ ^{137}Cs ЛИШАЙНИКАМИ РОДА *Cladonia* В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ КОЛЬСКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

© 2022 г. М. Б. Попова^{1,*}, Д. Н. Липатов², Д. В. Манахов², А. Н. Кизеев³, С. Ф. Ушамова⁴¹ Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия³ Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия⁴ Лапландский государственный природный биосферный заповедник, Мончегорск, Россия

*E-mail: marbpop@gmail.com

Поступила в редакцию 28.12.2021 г.

После доработки 05.06.2022 г.

Принята к публикации 29.06.2022 г.

Изучены накопление ^{137}Cs и его стратификация в талломах лишайников рода *Cladonia*, произрастающих в районе расположения Кольской атомной электростанции. Для этого отобраны образцы ягеля на 12 пробных площадках в санитарно-защитной зоне станции, зоне наблюдения и на фоновой территории. Удельные активности ^{137}Cs в пробах определяли с помощью сцинтилляционного гамма-спектрометра. Средневзвешенные удельные активности ^{137}Cs в лишайниках рода *Cladonia* составили 22.3–104.8 Бк/кг, при этом большая часть радиоцезия была сосредоточена в верхних частях талломов. Статистическая обработка данных с применением одновыборочного *t*-критерия, коэффициента Спирмена и кластерного анализа указала на доминирующую роль глобальных выпадений в поступлении ^{137}Cs в лишайники, при этом возможное влияние Кольской атомной электростанции на этот процесс ограничивается санитарно-защитной зоной.

Ключевые слова: лишайники рода *Cladonia*, подцеции, ^{137}Cs , ^{40}K , Кольская атомная электростанция, корреляционный анализ

DOI: 10.31857/S0869803122050125

Лесные биогеоценозы Крайнего Севера подвержены сильному антропогенному воздействию. Арктическая зона Российской Федерации (АЗРФ), составляющая значительную часть Северного полушария Земли, длительное время подвергалась загрязнению техногенными радионуклидами в результате трансграничного переноса этих веществ и глобальных аэральных выпадений. В АЗРФ также существуют местные промышленные источники локального поступления радионуклидов в окружающую среду [1, 2].

В Мурманской области сконцентрирован ряд объектов, представляющих потенциальную радиационную опасность. К ним относятся Кольская атомная электростанция (КоАЭС), ледоколы и субмарины с ядерными энергетическими установками (ЯЭУ); предприятия, осуществляющие ремонт, модернизацию, переоборудование и утилизацию кораблей, судов и иной морской техники с ЯЭУ; хранилища радиоактивных отходов, объекты проведения подземных ядерных взрывов малой мощности и другие источники ионизирующих излучений [3, 4].

В некоторых живых организмах радионуклиды могут накапливаться в концентрациях, превышающих их содержание в окружающей среде. В радиоэкологическом аспекте особое внимание заслуживают лишайники – компоненты растительного покрова с высокой концентрирующей способностью [5–8]. Они являются общепризнанными биоиндикаторами радиоактивного загрязнения окружающей среды в силу своих эколого-морфологических особенностей, таких как преимущественно атмосферный тип питания, широкий ареал распространения, медленное нарастание биомассы, большая сорбционная емкость и прочность фиксации высокодисперсных радиоактивных частиц [9–12]. Лишайники играют существенную роль в процессах первичного перехватывания и аккумуляции радионуклидов, поступающих на земную поверхность. Мохово-лишайниковый покров способен фиксировать до 80% радиоактивных веществ, поступающих с аэральными выпадениями и на неопределенно продолжительное время задерживать последующие процессы миграции и перераспределения ра-

дионуклидов в почвенно-растительном покрове [5], а концентрация излучателей в лишайниках, как правило, способна превышать таковую в наземных высших растениях [13]. Считается, что лишайники способны поглощать некоторое количество элементов питания из почвы, но точный вклад почвы в их питание не известен, по отдельным литературным данным, он не превышает 10% [14].

Исследованиям процессов миграции и аккумуляции радионуклидов лишайниками уделяется повышенное внимание как в АЗРФ, так и на территории других стран Северного полушария Земли. Наиболее активно лишайники аккумулируют ^{137}Cs , а основой его накопления служат физиолого-биохимические процессы, связанные с метаболической активностью талломов [15]. В фоновых арктических условиях удельные активности лишайников находятся в диапазоне от 5 до 90 Бк/кг, тогда как на загрязненных территориях за Полярным кругом в середине 1960-х удельные активности достигали значений 94400 Бк/кг [16–18, 14, 19–22]. Сведения о распределении долгоживущих радионуклидов техногенного происхождения в лишайниковом покрове в районах Мурманской области, непосредственно прилегающих к КоАЭС, немногочисленны несмотря на то, что лишайники доминируют в нижних ярусах лесных экосистем. Описанный на текущий момент диапазон удельных активностей лишайников рода *Cladonia* в юго-западной части Кольского полуострова составляет от 16 до 90 Бк/кг [23, 24, 4, 25].

Исходя из вышесказанного, целью настоящей работы стало изучение аккумуляции и пространственного перераспределения ^{137}Cs в лишайниках, как наиболее надежных индикаторах радиоактивного загрязнения, в пределах 30-километровой зоны КоАЭС.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Объектами исследований послужили лишайники, произрастающие в радиусе до 30 км от КоАЭС. Изучение лишайников проводили на стационарной сети мониторинговых площадок, которая располагалась в виде радиально-концентрической системы от АЭС [26].

– одна площадка находилась в пределах санитарно-защитной зоны (СЗЗ) атомной станции – С-1;

– шесть пробных площадок – в зоне наблюдения (ЗН), на расстоянии до 10 км от атомной станции – С-2, П-1, П-2, П-3, П-4 и П-5;

– четыре контрольные площадки – на границе ЗН, на расстоянии 15 км – К-I, К-II, К-III и К-IV;

– одна фоновая площадка – на расстоянии 30 км от станции – Ф.

Характеристика используемых в работе площадок представлена в табл. 1.

Система мониторинговых площадок располагалась в районе озер Имандра и Верхняя Пиренга. В древостое на площадках преобладает сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) V и Va класса бонитета. Также присутствуют береза повислая (*Betula pendula* Roth. X), береза пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.) и ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.). В травяно-кустарничковом ярусе доминируют представители рода *Vaccinium* – черника миртолистная (*Vaccinium myrtillus* L.), а также брусника (*Vaccinium vitis-idaea* L.). Встречаются багульник (*Ledum palustre* L.), вороника (*Empetrum hermaphroditum* Lange ex Hagerup) и голубика (*Vaccinium uliginosum* L.). Нижний ярус образован лишайниковым покровом, в котором доминируют лишайники рода *Cladonia* – кладония звездчатая (*Cladonia stellaris* (Opiz) Pouzar et Vězda), кладония оленья (*Cladonia rangiferina* L.) и кладония приальпийская (*Cladonia alpestris* (L.) Rabenh). Это кустистые, сильно разветвленные напочвенные (эпигейные) лишайники, типичные для северотаежных лесов. В ряде случаев на площадках нижний ярус представляет собой мохово-лишайниковый покров, образованный лишайниками и зелеными мхами, среди которых доминирующее положение занимают плеурозиум Шребера (*Pleurozium schereberi* (Brid) Mitt.) и гилокомиум блестящий (*Hylocomnium splendens* Hedw.).

Для площадок выбирались места с автоморфными условиями и однородным растительным покровом. На каждой площадке отбирались лишайники рода *Cladonia* – показательные биоиндикаторы, в полной мере отражающие состояние окружающей среды.

С каждой площадки было взято по одному образцу лишайников, всего 12 образцов. В лаборатории из этих образцов устранялись инородные составляющие – кора, хвоя, шишки, корни, листья и др. В дальнейшем подеции лишайников разделялись на верхнюю, среднюю и нижние части для изучения фракционирования ^{137}Cs в лишайниковом покрове. Верхняя и средняя части соответствовали живым подециям лишайников разного возраста, а нижняя часть – мертвой толще лишайника [27, 28]. Каждый образец был высушен, измельчен и озолён в муфельной печи при температуре не более 400°C для исключения потери ^{137}Cs . Поскольку на поглощение лишайниками ^{137}Cs и на его распределение в подециях может оказывать влияние калий как питательный элемент и химический аналог радиоцезия, в пробах были также измерены удельные активности ^{40}K . Удельная активность ^{137}Cs и ^{40}K была измерена в образцах золы на спектрометрическом комплексе “Мультирад” с гамма-детектором NaI(Tl) 63 × 63 с программным обеспечением “Прогресс”

Таблица 1. Характеристика стационарных мониторинговых площадок
Table 1. Characteristics of stationary monitoring sites

№ п/п	Площадка	Координаты, с.ш., в.д.	Высота над уровнем моря, м	Расстояние от КоАЭС, км	Тип леса (русское название), согласно: (Л.Б. Заугольнова, В.Б. Мартыненко Определитель типов леса Европейской России)	Тип леса (латинское название, по доминантам), согласно: (Л.Б. Заугольнова, В.Б. Мартыненко Определитель типов леса Европейской России)
1	С-1	67°27'59.821" 32°26'42.299"	170	1.8	Сосняк чернично-лишайниковый	<i>Pinus sylvestris</i> – <i>Vaccinium myrtillus</i> – <i>Cladonia</i> spp.
2	С-2	67°28'56.701" 32°24'50.400"	175	3.7	Сосняк чернично-багульниково-зеленомошный	<i>Pinus sylvestris</i> – <i>Vaccinium</i> spp. + <i>Ledum palustre</i> – <i>Pleurozium</i> + <i>Hylocomnium</i>
3	П-1	67°32'27.780" 32°19'13.260"	133	11.1	Сосняк чернично-лишайниковый	<i>Pinus sylvestris</i> – <i>Vaccinium myrtillus</i> – <i>Cladonia</i> spp.
4	П-2	67°33'32.461" 32°29'16.321"	199	10.5	Сосняк зеленомошно-лишайниковый черничный	<i>Pinus sylvestris</i> – <i>Vaccinium myrtillus</i> . – <i>Cladonia</i> spp. + <i>Pleurozium</i>
5	П-3	67°27'7.081" 32°40'24.539"	153	8.1	Сосняк зеленомошно-лишайниковый черничный	<i>Pinus sylvestris</i> – <i>Vaccinium myrtillus</i> . – <i>Cladonia</i> spp. + <i>Pleurozium</i>
6	П-4	67°22'50.941" 32°26'0.060"	162	9.6	Ельник воронично-чернично-зеленомошный (с примесью сосны)	<i>Picea obovata</i> – <i>Vaccinium</i> spp. – <i>Hylocomnium</i> + <i>Pleurozium</i>
7	П-5	67°24'13.561" 32°20'15.900"	171	9.3	Сосняк зеленомошно-лишайниковый черничный	<i>Pinus sylvestris</i> – <i>Vaccinium myrtillus</i> . – <i>Cladonia</i> spp. + <i>Pleurozium</i>
8	К-I	67°34'6.060" 32°14'18.780"	192	15.7	Сосняк чернично-лишайниковый	<i>Pinus sylvestris</i> – <i>Vaccinium myrtillus</i> – <i>Cladonia</i> spp.
9	К-II	67°35'25.200" 32°35'48.120"	160	14.8	Сосняк чернично-лишайниковый	<i>Pinus sylvestris</i> – <i>Vaccinium myrtillus</i> – <i>Cladonia</i> spp.
10	К-III	67°26'2.940" 32°53'30.840"	205	17.6	Сосняк зеленомошно-лишайниковый черничный	<i>Pinus sylvestris</i> – <i>Vaccinium myrtillus</i> . – <i>Cladonia</i> spp. + <i>Pleurozium</i>
11	К-IV	67°20'8.700" 32°23'0.600"	166	15.1	Сосняк зеленомошно-лишайниковый черничный	<i>Pinus sylvestris</i> – <i>Vaccinium myrtillus</i> . – <i>Cladonia</i> spp. + <i>Pleurozium</i>
12	Ф	67°34'38.820" 31°49'47.219"	180	30.7	Сосняк чернично-лишайниковый	<i>Pinus sylvestris</i> – <i>Vaccinium myrtillus</i> – <i>Cladonia</i> spp.

(ООО “НТЦ Амплитуда”, Россия) в пятикратной повторности с экспозицией 10800 с. Энергетическое разрешение по линии 662 кэВ составляет 9%. Минимальная детектируемая активность при экспозиции 3600 с составляет 3 Бк. Неопределенность измерения рассчитывалась как среднеквадратическое отклонение скорости счета; неопределенность косвенных измерений – как комбинированная стандартная неопределенность от всей индивидуальной неопределенности составных частей (JCGM 100:2008). Удельные активно-

сти ⁹⁰Sr были измерены в образцах золы на спектрометрическом комплексе “Мультирад” с пластиковым бета-детектором диаметром 70 мм с программным обеспечением “Прогресс” (ООО “НТЦ Амплитуда”, Россия). Минимальная детектируемая активность при экспозиции 3600 с составляет 1 Бк.

Также в работе использовались многолетние данные о скорости и повторяемости ветров в районе расположения атомной станции (за период

Таблица 2. Статистические характеристики варьирования удельной активности ^{137}Cs и ^{40}K (Бк/кг) в подстилке лишайников и почвенных горизонтах на исследованной территории ($n = 12$)
Table 2. Statistical characteristics of variation in the specific activities of ^{137}Cs and ^{40}K (Bq/kg) in lichen podetium and soil horizons in the study area ($n = 12$)

Радионуклид	Компонент	Среднее, Бк/кг	Медиана, Бк/кг	Нижний квартиль, Бк/кг	Верхний квартиль, Бк/кг	Стандартное отклонение, Бк/кг	Коэффициент вариации, %
^{137}Cs	Верхняя часть подстилки лишайников	86.5	90.9	43.4	123.8	40.0	46.2
	Средняя часть подстилки лишайников	41.3	39.9	25.1	47.4	20.7	50.1
	Нижняя часть подстилки лишайников	36.0	27.7	22.9	42.2	22.0	61.1
	Горизонт О почвы	65.2	65.9	45.6	83.5	22.6	34.7
	Горизонт АО почвы	38.0	39.4	25.4	50.3	17.3	45.7
	Горизонт Е почвы	5.1	4.1	2.8	7.2	3.2	62.5
	Горизонт В1f почвы	2.9	2.4	1.2	3.7	2.0	67.5
^{40}K	Верхняя часть подстилки лишайников	90.5	91.1	80.5	97.6	12.5	13.8
	Средняя часть подстилки лишайников	61.1	62.4	52.8	70.6	10.7	17.5
	Нижняя часть подстилки лишайников	54.9	57.0	44.2	64.7	12.2	22.2
Зольность, %	Верхняя часть подстилки лишайников	0.93	0.8	0.7	1.0	0.4	42,3
	Средняя часть подстилки лишайников	1.11	0.8	0.7	1.1	0.9	84,6
	Нижняя часть подстилки лишайников	1.73	1.4	0.9	1.6	1.7	97.5

2012–2016 гг.), которые были получены с метеостанций АМС-1 автоматизированной системы контроля радиационной обстановки (АСКРО) КоАЭС [26].

Проводилась статистическая обработка данных. Для проверки нормального закона распределения использованы критерии Уилка–Шapiro и Колмогорова–Смирнова. Сравнение средних проводили с помощью t -критерия Стьюдента, корреляционный анализ – с помощью коэффициента корреляции Спирмена. Кластерный анализ данных выполняли методом k -средних, оценку качества классификации проводили с помощью дисперсионного анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Значения удельных активностей ^{137}Cs в различных частях подстилки лишайников варьировали на исследованных площадках от 14.8 до 139.4 Бк/кг (табл. 2). Средние значения удельной

активности ^{137}Cs уменьшаются от верхней к нижней части подстилки лишайников, при этом в почвенной постилке (горизонт О) снова увеличиваются (табл. 2). Сходное снижение в различных частях подстилки лишайников отмечается для удельной активности ^{40}K . Зольность увеличивается в нижней части подстилки лишайников. Коэффициенты вариации удельной активности ^{137}Cs в исследованных природных компонентах изменяются от 34.7 до 67.5%. В подстилке лишайников коэффициенты вариации удельной активности $\text{K}-40$ значительно ниже, чем техногенного радионуклида ^{137}Cs . Распределение удельных активностей ^{137}Cs и ^{40}K в исследованных компонентах лишайников и почвы удовлетворяло нормальному закону (при уровне значимости $p = 0.05$). Распределение зольности статистически значимо отличается от нормального закона.

Для оценки накопления ^{137}Cs лишайниками также были рассчитаны его средневзвешенные

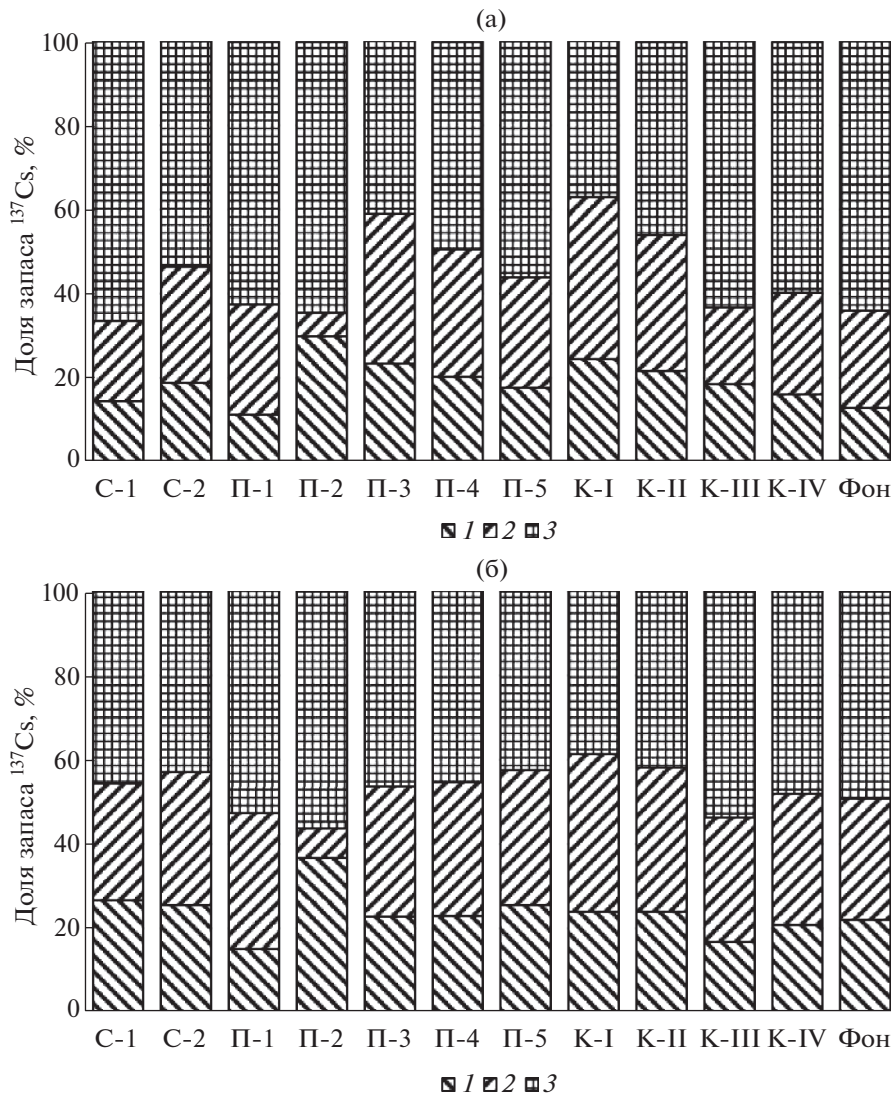


Рис. 1. Доли запаса ^{137}Cs (а) и ^{40}K (б) в нижней (1), средней (2) и верхней (3) частях подетиев лишайников рода *Cladonia*.
Fig. 1. Shares of ^{137}Cs (а) and ^{40}K (б) reserves in the lower (1), middle (2), and upper (3) parts of podetium of lichens of the genus *Cladonia*.

удельные активности ($A_{\text{уд}}^{137}\text{Cs}$) с учетом массы всех частей подетия. На исследуемых площадках они составляли от 22.3 до 104.8 Бк/кг (рис. 1, а), при этом наибольший вклад в удельную активность вносили верхние части подетиев (рис. 1, б). При измерении удельных активностей ^{90}Sr в счетных образцах было обнаружено, что они ниже минимальной детектируемой активности, поэтому в данном исследовании не рассматривались. Средневзвешенные удельные активности ^{40}K в подетиях находились в пределах 56.8–85.0 Бк/кг, что соответствует массовому содержанию стабильного калия-39 от 1855 до 2769 мг/кг, согласно соотношению изотопов природного калия (табл. SM2). Эти значения попадают в диапазон

481–7900 мг/кг, описанный в отечественной научной литературе для лишайников рода *Cladonia* в АЗРФ [7, 29].

Для описания фракционирования радионуклидов в подетиях были рассчитаны доли их запаса в нижней, средней и верхней частях. Во всех образцах эти запасы снижались вниз по подетию, в их верхних частях было сосредоточено наибольшее количество ^{137}Cs – 37.1–66.4% и ^{40}K – 38.7–56.3% от их общих запасов, причем во всех пробах, кроме П-2, запасы снижались строго в ряду: верх>середина>низ (рис. 1).

Сравнение уровней удельной активности ^{137}Cs в верхней, средней и нижней частях подетиев лишайников проводили с помощью *t*-критерия

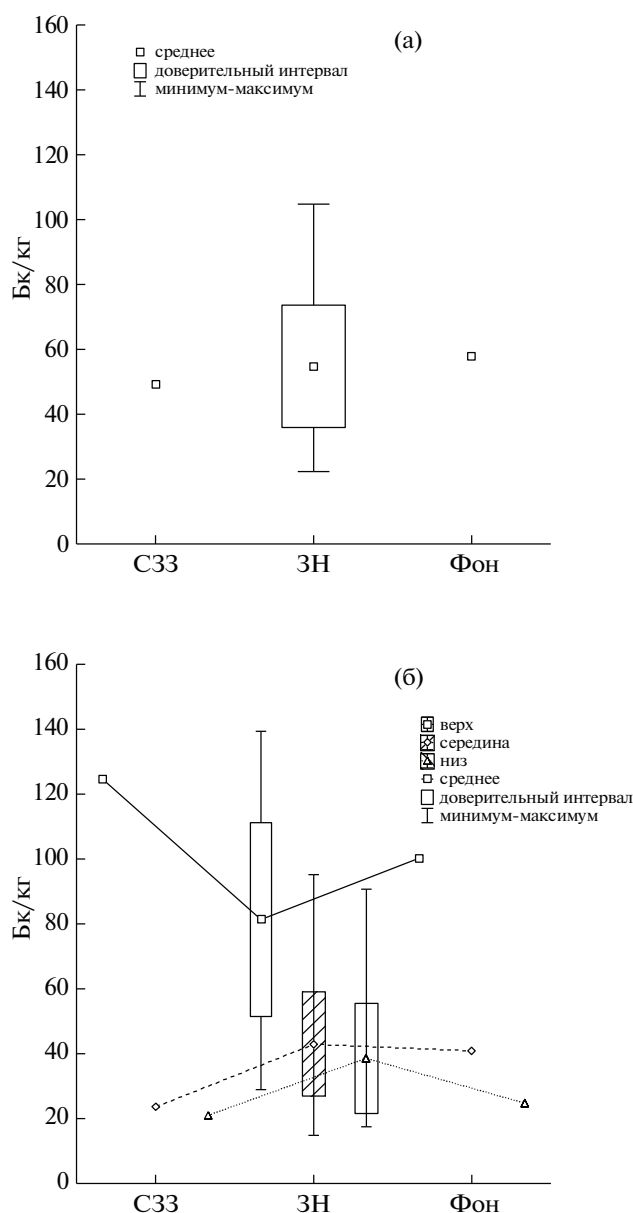


Рис. 2. Удельные активности ^{137}Cs в лишайниках санитарно-защитной зоны, зоны наблюдения и на фоновой площадке: а) средневзвешенные; б) в верхних, средних и нижних частях подециев.

Fig. 2. Specific activities of ^{137}Cs in lichens of the sanitary protection zone, observation zone and on the background site: а) weighted average; б) in the upper, middle, and lower parts of the podetium.

Стьюдента. Средняя удельная активность ^{137}Cs в верхней части подециев статистически значимо больше, чем в средней ($t = 3.48, p < 0.05$) и нижней ($t = 3.84, p < 0.05$) частях. Уровни ^{137}Cs , зафиксированные в средней и нижней частях, между собой значимо не различаются. Аналогичные результаты отмечены для удельной активности ^{40}K в этих частях подециев лишайников.

Сравнение средней удельной активности ^{137}Cs в подециях лишайников в зоне наблюдения КоАЭС с уровнями в санитарно-защитной зоне и на фоновой территории проводилось с помощью одновыборочного t -критерия Стьюдента (табл. SM3). При этом удельные активности в ЗН КоАЭС рассматривались как единая выборка, а в СЗЗ КоАЭС и на фоновой территории – как константы (рис. 2, б). Средняя удельная активность ^{137}Cs в верхней части подециев в зоне наблюдения, составившая 81.3 ± 41.7 Бк/кг, статистически значимо ниже ($t = -3.28, p < 0.05$), чем в санитарно-защитной зоне (124.6 Бк/кг), но не отличается от фонового уровня (100.3 Бк/кг). При этом уровень удельной активности ^{137}Cs , зафиксированный в верхней части лишайников в СЗЗ, превышает на 14 Бк/кг верхнюю границу 95%-ного доверительного интервала этого показателя в ЗН, но не выходит за пределы размаха варьирования.

Средняя удельная активность ^{137}Cs в средней и нижней частях подециев лишайников в зоне наблюдения статистически значимо больше ($t = 2.78, t = 2.29, p < 0.05$), чем в санитарно-защитной зоне, и не отличается от фонового уровня. При этом уровни удельной активности ^{137}Cs , зафиксированные в средней и нижней частях лишайников в СЗЗ, выходят за нижнюю границу 95%-ного доверительного интервала этого показателя в ЗН, но не выходят за пределы размаха варьирования. Следует отметить, что усредненные по всей толще подециев значения удельной активности ^{137}Cs в зоне наблюдения не имели значимых различий с уровнями, зафиксированными в СЗЗ и на фоновой территории (рис. 2, а).

Для изучения возможных взаимосвязей между удельными активностями ^{137}Cs , ^{40}K и зольностью подециев лишайников проводили корреляционный анализ с использованием коэффициента Спирмена (табл. 3).

Статистически значимая положительная корреляция отмечена между удельными активностями ^{137}Cs в верхней, средней и нижней частях подециев. При этом таких взаимосвязей не выявлено между удельными активностями этого техногенного радионуклида в подециях лишайников и нижележащих горизонтах почвы.

В верхней и нижней частях подециев лишайников зафиксированы статистически значимые ($p < 0.10$) положительные коэффициенты корреляции между удельными активностями ^{137}Cs и ^{40}K . При этом прямая взаимосвязь с зольностью отмечена только для удельной активности ^{40}K в средней и нижней частях подециев лишайников, тогда как для ^{137}Cs такая положительная корреляция не выявлена.

Корреляционный анализ был дополнен поиском взаимосвязей между удельными активностями

Таблица 3. Коэффициенты корреляции Спирмена между удельной активностью ¹³⁷Cs, ⁴⁰K, зольностью в различных подстилах лишайников и горизонтах почвы (*n* = 12)
Table 3. Spearman correlation coefficients between the specific activities of ¹³⁷Cs, ⁴⁰K and ash content in various lichen podetium and soil horizons (*n* = 12)

Показатели		Удельная активность радионуклидов в подстилах лишайников					
		¹³⁷ Cs			⁴⁰ K		
		верхняя часть	средняя часть	нижняя часть	верхняя часть	средняя часть	нижняя часть
¹³⁷ Cs	Верхняя часть подстилов лишайников	1.00					
	Средняя часть подстилов лишайников	+0.64**	1.00				
	Нижняя часть подстилов лишайников	+0.52*	+0.92***	1.00			
	Горизонт О почвы	-0.41	+0.06	+0.18			
	Горизонт АО почвы	+0.02	-0.26	-0.20			
	Горизонт Е почвы	-0.36	-0.16	-0.29			
	Горизонт В1f почвы	+0.10	+0.52*	+0.53*			
⁴⁰ K	Верхняя часть подстилов лишайников	+0.54*	+0.18	+0.27	1.00		
	Средняя часть подстилов лишайников	-0.52*	+0.08	+0.19	-0.14	1.00	
	Нижняя часть подстилов лишайников	-0.22	+0.32	+0.56*	-0.12	+0.61**	1.00
Зольность	Верхняя часть подстилов лишайников	-0.34	+0.21	+0.36	-0.10	+0.49	+0.70**
	Средняя часть подстилов лишайников	-0.56*	+0.01	+0.08	-0.26	+0.53*	+0.50*
	Нижняя часть подстилов лишайников	-0.57*	-0.25	-0.04	-0.37	+0.46	+0.52*
Расстояние от АЭС		-0.06	+0.20	+0.01	-0.71**	-0.01	-0.08
Повторяемость ветра		-0.34	-0.30	-0.40	-0.34	+0.16	-0.33
Скорость ветра		+0.66**	+0.31	+0.36	+0.46	-0.65**	-0.06
Высота над уровнем моря		+0.05	+0.15	+0.06	-0.30	+0.16	+0.18

Примечание. Статистически значимая корреляция: * *p* < 0.10, ** *p* < 0.05, *** *p* < 0.01.

ми радионуклидов и показателями, которые могут свидетельствовать о влиянии КоАЭС на их пространственное распределение: расстоянием до атомной станции, повторяемостью и скоростью преобладающих со стороны атомной станции ветров, а также высотой над уровнем моря (табл. 3). Выявлена статистически значимая взаимосвязь (*r* = +0.66; *p* < 0.05) между скоростью ветра и удельной активностью ¹³⁷Cs в верхней части подстилов. На основе результатов корреляционного анализа не обнаружено влияние расстояния от АЭС и абсолютной высоты рельефа исследованных площадок на уровни удельной активности ¹³⁷Cs в подстилах лишайников.

С целью изучения закономерностей вертикального распределения удельных активностей ¹³⁷Cs в подстилах лишайников и в сопряженных с ними почвенных профилях проводился кластерный анализ данных с итеративной процедурой

разбиения на три кластера. Статистически значимые (*p* < 0.05) различия средних значений удельной активности ¹³⁷Cs, превышающие внутрикластерное варьирование, выявлены в верхней части подстилов лишайников и горизонте подстилки О (рис. 3).

В результате проведенного кластерного анализа выделенный кластер 1 объединяет площадки, для которых характерна высокая удельная активность ¹³⁷Cs в подстилах лишайников, но низкое значение этого показателя в горизонте подстилки О. В этот кластер 1 отнесены восемь исследованных площадок, преимущественно относящихся к экотопам сосняков чернично-лишайниковых и зеленомошно-лишайниково-черничных, которые располагались как в санитарно-защитной зоне, так и в зоне наблюдения и на фоновой территории.

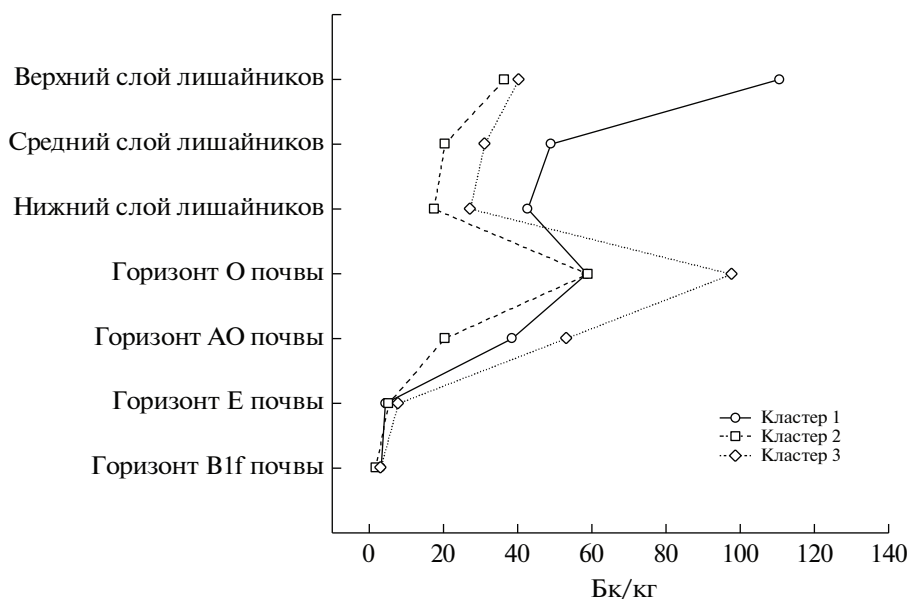


Рис. 3. Вертикальное распределение средних значений удельной активности ^{137}Cs в слоях подстилки лишайников и горизонтах почвы для выделенных кластеров 1, 2, 3.

Fig. 3. Vertical distribution of average values of ^{137}Cs specific activity in lichen podetium layers and soil horizons for selected clusters 1, 2, and 3.

В кластер 2 включены площадки П-4 и К-III с низкими удельными активностями ^{137}Cs по всему вертикальному профилю: в подстилке лишайников и горизонтах подстилки О и ОА почвы. Следует отметить, что площадка П-4 расположена в экотопе ельника воронично-чернично-зеленомошного. В кластер 3 объединены площадки П-3 и К-II, характеризующиеся низкими и средними уровнями удельной активности ^{137}Cs в подстилке лишайников, но самыми высокими уровнями этого показателя в горизонтах подстилки О и ОА (рис. 3).

ОБСУЖДЕНИЕ

Выявленные на исследованной территории вокруг КоАЭС средние уровни удельной активности ^{137}Cs в подстилке лишайников рода *Cladonia* сопоставимы с диапазоном 5–90 Бк/кг, который зафиксирован на фоновых территориях Скандинавии и Кольского полуострова в ряде лихенологических исследований [23, 24, 4, 25, 20]. Более высокие коэффициенты вариации (табл. 2), отмеченные для удельных активностей ^{137}Cs по сравнению с ^{40}K , могут указывать на процессы локального перераспределения техногенного радионуклида в подстилке лишайников, не связанные с их калийным питанием. Увеличение удельных активностей в верхней части подстилки лишайников и в верхнем подстилочном горизонте почвы свидетельствует о накоплении этого радионуклида именно в этих природных компонентах.

Выявленное статистически значимое увеличение удельной активности ^{137}Cs и ^{40}K в верхней части подстилки лишайников (рис. 1) может быть обусловлено аэральным путем поступления на поверхность растительного покрова в составе глобальных радиоактивных выпадений. Радиоцезий поглощается лишайниками рода *Cladonia* преимущественно из слабоминерализованных атмосферных осадков и способен накапливаться в мембранах и клеточных стенках лишайников [30]. Верхняя часть подстилки исследуемых лишайников достаточно плотная и может выступать механическим и геохимическим барьером на пути вертикальной миграции ^{137}Cs в нижележащие слои [28]. Кроме того, верхняя часть подстилки является наиболее молодой и активно растущей, что способствует более интенсивному поглощению биофильного элемента калия и одновременно ^{137}Cs , схожего с ним по химическим свойствам.

При анализе удельной активности ^{137}Cs на разных расстояниях от КоАЭС следует отметить особое индикаторное значение верхнего слоя подстилки лишайников. Статистически значимое уменьшение удельной активности ^{137}Cs в верхней части подстилки для зоны наблюдения по сравнению с санитарно-защитной зоной (рис. 2) может отражать различный уровень глобальных выпадений на разных участках района расположения КоАЭС. Сравнение с фоновой территорией показывает, что в зоне наблюдения не отмечено накопление ^{137}Cs в лишайниках, из чего можно сделать вывод, что возможное влияние АЭС на уровни

ни удельной активности этого техногенного радионуклида ограничивается санитарно-защитной зоной. Зафиксированная удельная активность ^{137}Cs в верхнем слое лишайников в санитарно-защитной зоне АЭС в 1.1 раза больше, чем верхняя граница доверительного интервала средней величины этого показателя в зоне наблюдения, и в 1.3 раза больше, чем уровень на фоновой площадке.

Выявленная статистически значимая положительная корреляция между удельной активностью ^{137}Cs в верхней, средней и нижней частях подстилки лишайников (табл. 3) указывает на сопряженный процесс вертикального распределения этого радионуклида в них. Отсутствие взаимосвязи между удельной активностью ^{137}Cs в подстилке лишайников и почвах под ними может свидетельствовать о том, что этот радионуклид поступает из атмосферных выпадений. При этом лишайниковый покров выступает в качестве биогеохимического барьера на пути нисходящей миграции ^{137}Cs из аэрозолей в почву.

Зафиксированная положительная корреляция между удельными активностями ^{137}Cs и ^{40}K в верхней и нижней частях подстилки свидетельствует о совместном поглощении этих радионуклидов в процессах калийного питания лишайников. При этом с зольностью коррелирует только ^{40}K , являющийся изотопом стабильного ^{39}K — биогенного элемента.

Увеличение удельной активности ^{137}Cs в подстилке лишайников на площадках с повышенными скоростями ветров можно связать с большей интенсивностью атмосферных выпадений в таких локальных метеорологических условиях. Усиление ветра приводит к увеличению количества радионуклидов, которое лишайники отфильтровывают из воздуха. В рамках данного исследования такое влияние, вероятно, сглаживается условием отбора проб внутри лесных массивов, которые дробят и ослабляют воздушные потоки. Отсутствие корреляционной зависимости между расстоянием от КоАЭС и удельной активностью ^{137}Cs (табл. 3) в подстилке лишайников указывает на преимущественную роль глобальных выпадений этого радионуклида, формирующих его пространственное распределение.

Результаты кластерного анализа показывают, что для исследованной территории вокруг КоАЭС характерны три типа вертикального распределения ^{137}Cs в подстилке лишайников и верхних почвенных горизонтах. Для большинства экотопов сосняков: восемь площадок, объединенных в кластер 1, характерно накопление ^{137}Cs в верхней части подстилки лишайников, выступающих главным биогеохимическим барьером. Вместе с тем в отдельных экотопах сосняков на площадках П-3

и К-II, включенных в кластер 3, наибольшие уровни удельной активности ^{137}Cs приурочены к подстилочным горизонтам почвы, тогда как в подстилке лишайников накопление радионуклида не выражено (рис. 2). В ельнике на площадке П-4 и в одном из сосняков на площадке К-III, включенных в кластер 2, значения удельных активностей ^{137}Cs в подстилке лишайников и подстилке снижены, указывая на их слабую аккумулялирующую способность по сравнению с остальными исследованными экотопами.

ВЫВОДЫ

1. В 30-километровой зоне Кольской атомной электростанции средневзвешенные удельные активности ^{137}Cs в лишайниках рода *Cladonia* находятся в диапазоне от 22.3 до 104.8 Бк/кг. Увеличение удельной активности в верхних частях подстилки связано с их морфофизиологическими особенностями: большей плотностью и активным ростом, а также с аэральным путем поступления ^{137}Cs в растительный покров.

2. Возможное влияние КоАЭС на уровни удельной активности ^{137}Cs в верхних частях подстилки лишайников ограничивается санитарно-защитной зоной, в которой этот показатель в 1.3 раза больше, чем на фоновой площадке. В зоне наблюдения КоАЭС не отмечено накопление ^{137}Cs в лишайниках по сравнению с фоновой территорией.

3. Положительная корреляция между удельной активностью ^{137}Cs в верхней, средней и нижней частях подстилки лишайников указывает на сопряженность вертикального распределения этого радионуклида. Отсутствие взаимосвязи между удельной активностью ^{137}Cs в подстилке лишайников и почвах под ними свидетельствует о поступлении этого радионуклида из атмосферных выпадений.

4. Отсутствие корреляционной зависимости между расстоянием от КоАЭС и удельной активностью ^{137}Cs в подстилке лишайников указывает на преимущественную роль глобальных выпадений этого радионуклида, формирующих его пространственное распределение.

5. Выявлена статистически значимая взаимосвязь между скоростью ветра и удельной активностью ^{137}Cs в верхней части подстилки, что может быть обусловлено большей интенсивностью атмосферных выпадений в таких локальных метеорологических условиях.

6. Верхняя часть подстилки лишайников выступает основным геохимическим барьером для ^{137}Cs в большинстве исследованных биогеоценозов. В отдельных экотопах сосняков наибольшие уровни ^{137}Cs приурочены к подстилочным горизонтам почвы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-34-90103.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матишов Д.Г., Матишов Г.Г. Радиационная экологическая океанология. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2001. 417 с. [Matishov D.G., Matishov G.G. Radiatsionnaya ekologicheskaya okeanologiya (Radiation ecological oceanology). Apatity: Ed. KSC RAS, 2001. 417 p. (in Russ.)]
2. Евсеев А.В., Телелекова А.Д. Современное состояние экосистем Кольского полуострова // Арктика XXI век. Естественные науки. 2014. № 1. С. 33–37. [Evseev A.V., Teleleikova A.D. Current geoeological conditions of the Kola peninsula ecosystems // Arktika XXI century. Natural Sciences. 2014. № 1. P. 33–37. (in Russ.)]
3. Лурье А.А., Кубасова М.С. Экологическая оценка современного содержания ^{137}Cs в почвах и некоторых биообъектах в лесах Архангельской области // Известия ТСХА. 2016. Вып. 1. С. 5–23. [Lurie A.A., Kubasova M.S. Ecological evaluation of ^{137}Cs contents in soils and some biological objects in forests of the Arkhangelsk region // Izvestiya TSHA. 2016. Issue. 1. P. 5–23. (in Russ.)]
4. Кизеев А.Н. Содержание ^{137}Cs и ^{40}K в почвенно-растительном покрове в районе расположения Кольской атомной электростанции // Глобальный научный потенциал. 2016. № 5. С. 56–59. [Kizeev A.N. Content of ^{137}Cs and ^{40}K in soil and vegetation within proximity of the Kola nuclear power plant // Global scientific potential. 2016. № 5. P. 56–59.]
5. Михеева Е.В., Нифонтова М.Г. Радиоактивное загрязнение окружающей среды: биологические объекты как источник информации для оперативного и долгосрочного мониторинга // Технологии гражданской безопасности. 2008. № 1–2. С. 179–183. [Mikheeva E.V., Nifontova M.G. Radioactive environmental contamination: biological objects as the information source for operative and long term monitoring // Civil Security Technologies. 2008. № 1–2. P. 179–183. (in Russ.)]
6. Ежов А.Ю. Тяжелые металлы в растительном покрове Северо-Запада Кольского полуострова // Преподаватель XXI век. 2011. № 1. С. 221–226. [Yezhov A.Yu. Heavy metals in the vegetation cover of the North-West of the Kola Peninsula // Teacher of the XXI Century. 2011. № 1. P. 221–226. (in Russ.)]
7. Сухарева Т.А. Элементный состав талломов лишайника *Cladonia stellaris* в условиях атмосферного загрязнения // Тр. Карельского научного центра РАН. 2016. № 4. С. 70–82. [Sukhareva T.A. Elemental composition of thalli of the lichen *Cladonia stellaris* under air pollution // Proc. Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2016. № 4. P. 70–82. (in Russ.)]
8. Ганеева М.В., Законнов В.В., Ложкина Р.А. и др. Оценка загрязнения тяжелыми металлами малонаселенных территорий на примере Северо-Западного региона России // Экология человека. 2018. № 3. С. 4–9. [Gapeeva M.V., Zakonnov V.V., Lozhkina R.A. et al. Heavy metals pollution assessment of underpopulated regions using the example of the north-western region of // Human Ecology. 2018. № 3. P. 4–9. (in Russ.)] <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2018-3-4-9>
9. Бязров Л.Г. Лишайники – индикаторы радиоактивного загрязнения. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2005. 476 с. [Byazrov L.G. Lishayniki – indicator of radioactive contamination (Lichens are indicators of radioactive contamination). Moscow: Association of scientific publications KMK, 2005. 476 p. (in Russ.)]
10. Нифонтова М.Г. Использование лишайников и мхов для оперативного определения радиоактивного загрязнения природной среды // Дефектоскопия, 2005. Т. 41. № 1. С. 80–84. [Nifontova M.G. Use of lichens and mosses for on-line testing of environmental radioactive contamination // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2005. V. 41. № 1. P. 60–63. (In Russ.)]
11. Gómez-Guzmán J.M. et al. Level and origin of ^{129}I and ^{137}Cs in lichen samples (*Cladonia alpestris*) in central Sweden // J. Environ. Radioact. 2011. № 102. P. 200–205.
12. Цветнова О.Б., Щеглов А.И., Столбова В.В. К вопросу о методах биодиагностики в условиях радиоактивного загрязнения // Радиационная биология. Радиэкология. 2014. Т. 54. № 4. С. 423–431. [Tsvetnova O.B., Shcheglov A.I., Stolbova V.V. On the Problem of Biodiagnostics under Conditions of Radioactive Contamination // Radiats. biologiya. Radioecologiya. 2014. V. 54. № 4. P. 423–431.] <https://doi.org/10.7868/S0869803114030163> (in Russ.)]
13. Куликов И.В., Молчанова И.В., Караваева Е.Н. Радиэкология почвенно-растительного покрова. Свердловск: УрО АН СССР, 1990. 173 с. [Kulikov I.V., Molchanova I.V., Karavaeva E.N. Radioecologiya pochvenno-rastitel'nogo pokrova (Radioecology of the soil and vegetation cover). Sverdlovsk: Ural Branch of the Academy of Sciences of the USSR, 1990. 173 p. (in Russ.)]
14. Кузьменкова Н.В. Оценка радиационного состояния почв и лишайников Северо-Западного побережья Кольского залива // Вестн. Моск. Ун-та. Серия 5. География. 2009. № 2. С. 32–36. [Kuzmenkova N.V. Evaluation of the radiological state of ecosystems on the north-western coast of the Kola bay // Bulletin of the Moscow University. Series 5. Geography. 2009. № 2. P. 32–36. (in Russ.)]
15. Нифонтова М.Г., Безель В.С., Рябкова К.А., Таршиц Г.И. Лишайники и мхи в радиэкологическом мониторинге // Инновационный потенциал естественных наук: Тр. междунар. науч. конф. 2006. Т. 2. С. 239–242. [Nifontova M.G., Bezel V.S., Ryabkova K.A., Tarshits G.I. Lichens and mosses in radioecological monitoring // Innovative potential of natural sciences: Tr. mezhdunar. nauch. konf. 2006. T. 2. P. 239–242.]

- kova K.A., Tarshis G.I.* Lishayniki i mkhi v radioekologicheskom monitoring (Lichens and mosses in radioecological monitoring) // Innovative potential of natural sciences: Proc. Int. Sci. Conf. 2006. V. 2. P. 239–242. (in Russ.)]
16. *Mattson L.J.S.* ¹³⁷Cs in the reindeer lichen *Cladonia alpestris*: deposition, retention and internal distribution, 1961–1970 // Health Phys. Press. 1975. V. 28. P. 233–248.
 17. *Puhakainen M., Rahola T., Heikkinen T., Illuka E.* ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs in lichen (*Cladonia stellaris*) in southern Finland // Boreal Environ. Res. 2007. № 12. P. 29–35.
 18. *Амозова Л.П., Глинский Н.А., Попов Н.Т., Потифоров А.И.* Содержание цезия-137 в почве, ягодах, грибах, лишайниках // Экологический атлас Мурманской области. Москва–Апатиты, 1999. С. 30, 38. [*Amozova L.P., Glinsky N.A., Popov N.T., Potiforov A.I.* Soderzhanie tseziya-137 v pochve, yzgodakh, gribakh, lishaynikakh (The content of cesium-137 in soil, berries, mushrooms, lichens) // Ecological atlas of the Murmansk region. Moscow–Apatity, 1999. P. 30, 38. (in Russ.)]
 19. *Телелева А.Д., Евсеев А.В.* Радионуклиды в природной среде Кольского полуострова // Эволюция и динамика геосистем. 2014. № 5. С. 89–94. [*Teleleva A.D., Evseev A.V.* Radionuklidy v prirodnoy srede Kol'skogo poluostrova (Radionuclides in the environment of the Kola Peninsula) // Evolution and Dynamics of Geosystems. 2014. № 5. P. 89–94. (in Russ.)]
 20. *Koivurova M., Leppanen A.-P., Kallio A.* Transfer factors and effective half-lives of ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs in different environmental sample types obtained from Northern Finland: case Fukushima accident // J. Environ. Radioact. 2015. № 146. P. 73–79.
 21. *Усачева А.А., Семенов И.Н., Мирошников А.Ю.* Распределение ¹³⁷Cs в растениях и почвах фоновых Западно-Сибирских ландшафтов тундры и тайги // Успехи совр. естествознания. 2016. № 9. С. 185–189. [*Usacheva A.A., Semenov I.N., Miroshnikov A.Yu.* Raspredeleniye ¹³⁷Cs v rasteniyakh i pochvakh fonykh Zapadno-Sibirskikh landshaftov tundry i taygi (Distribution of ¹³⁷Cs in plants and soils of background West Siberian tundra and taiga landscapes) // Successes of Modern Natural Sciences. 2016. № 9. P. 185–189. (in Russ.)]
 22. *Михайловская Л.Н., Гусева В.П., Рукавишников О.В., Михайловская З.Б.* Техногенные радионуклиды в почвах и растениях наземных экосистем в зоне воздействия атомных предприятий // Экология. 2020. № 2. С. 110–118. [*Mikhailovskaya L.N., Guseva V.P., Rukavishnikova O.V., Mikhailovskaya Z.B.* Technogenic radionuclides in soils and plants of terrestrial ecosystems in the zone of impact from nuclear enterprises // Russ. J. Ecol. 2020. V. 51. № 2. P. 127–135. <https://doi.org/10.1134/S1067413620020095>]
 23. *Семенихина М.Е.* Некоторые аспекты радиоэкологического мониторинга объектов окружающей природной среды в районе размещения КАЭС // Вестн. МГТУ. 2006. Т. 9. № 5. С. 843–846. [*Semenikhina M.E.* Nekotoryye aspekty radioekologicheskogo monitoringa ob"yektov okruzhayushchey prirodnoy sredy v rayone razmesheniya KAES (Some aspects of radioecological monitoring of environmental objects in the area of the KNPP location) // Bulletin of MSTU. 2006. V. 9. № 5. S. 843–846. (in Russian)]
 24. *Кузьменкова Н.В.* Миграция и аккумуляция ¹³⁷Cs в ландшафтах Северо-Западной части Кольского полуострова: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2010. 25 с. [*Kuzmenkova N.V.* Migratsiya i akkumulyatsiya ¹³⁷Cs v landshaftakh Severo-Zapadnoy chasti Kol'skogo poluostrova (Migration and accumulation of ¹³⁷Cs in the landscapes of the Northwestern part of the Kola Peninsula): Author's abstract ... diss. candidate of geographic sciences. M., 2010. 25 p. (in Russ.)]
 25. *Воробьева Т.А., Евсеев А.В., Кузьменкова Н.В.* Радиогеохимические исследования состояния ландшафтов Кольского полуострова // Арктика: Экология и экономика. 2017. № 2. С. 17–26. [*Vorobieva T.A., Evseev A.V., Kuzmenkova N.V.* Radiogeochemical investigations of the Kola Peninsula landscapes // Arktika: Ecology and Economy. 2017. № 2. P. 17–26. (in Russ.)]
 26. *Попова М.Б., Манахов Д.В., Кизеев А.Н. и др.* Содержание и распределение ¹³⁷Cs в подзолах в районе расположения Кольской атомной электростанции // Почвоведение. 2020. № 7. С. 891–900. [*Popova M.B., Manakhov D.V., Lipatov D.N., et al.* Contents and distribution of ¹³⁷Cs in podzols in the area of the Kola nuclear power plant // Eurasian Soil Science. 2020. V. 53. № 7. P. 986–994. <https://doi.org/10.1134/S106422932007011X> (In Russ.)] <https://doi.org/10.31857/S0032180X20070114>
 27. *Нифонтова М.Г.* Лихено- и бриоиндикация радиоактивного загрязнения среды: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Пермь, 2003. 50 с. [*Nifontova M.G.* Likheno- i brioindikatsiya radioaktivnogo zagryazneniya sredy (Licheno- and bryoindication of radioactive contamination of the environment): Abstr. Diss. ... Doctor of Biological Sciences. Perm, 2003. 50 p. (in Russ.)]
 28. *Бязров Л.Г., Пельгунова Л.А.* Состав и соотношение химических элементов на разных по высоте поверхностях подетиев ягельного лишайника *Cladonia rangiferina* // Принципы экологии. 2016. № 2. С. 27–42. [*Vyazrov L.G., Pelgunova L.A.* Composition and ratio of the chemical elements on the surfaces different by height of reindeer lichen podetia *Cladonia rangiferina* // Princip. Ecol. 2016. № 2. P. 27–42. (in Russ.)] <https://doi.org/10.15393/j1.art.2016.4983>
 29. *Тюпкина Г.И., Окунева С.В., Корниенко И.П., Белецкий С.Л.* Биохимический состав лишайников – корма северных оленей на арктической территории // Инновационные технологии производства и хранения материальных ценностей для государственных нужд. 2019. № 12. С. 223–232. [*Tyupkina G.I., Okuneva S.V., Kornienko I.P., Beletsky S.L.* Biokhimicheskiy sostav lishaynikov – korma severnykh oleney na

- arkticheskoy territorii (Biochemical composition of lichens – food for reindeer in the Arctic territory) // Innovative technologies for the production and storage of material assets for state needs. 2019. № 12. P. 223–232. (in Russ.)]
30. Страховенко В.Д., Хожина Е.И., Щербов Б.Л. Распределение радиоцезия и микроэлементов в системе лишайник-субстрат и в теле лишайника // Геохимия. 2008. № 2. С. 141–150. [Strakhovenko V.D., Khozhina E.I., Shcherbov B.L. Distribution of radioactive Cs and trace elements in the lichen-substrate system and in the lichen body // Geochem. Int. 2008. V. 46. № 2. P. 116–124. (in Russ.)] <https://doi.org/10.1007/s11476-008-2002-x>

Accumulation of ^{137}Cs by *Cladonia* Lichens in the Impact Zone of the Kola Nuclear Power Plant

M. B. Popova^{a, #}, D. N. Lipatov^b, D. V. Manakhov^b, A. N. Kizeev^c, and S. F. Ushamova^d

^a Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^b Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

^c North-West Scientific Center for Hygiene and Public Health of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, St. Petersburg, Russia

^d Lapland State Nature Biosphere Reserve, Murmansk region, Monchegorsk, Russia

[#]E-mail: marbpop@gmail.com

The accumulation of ^{137}Cs and its stratification in *Cladonia* lichens growing in the Kola nuclear power plant area have been studied. For this, samples of reindeer lichens were selected at 12 test sites in the sanitary protection zone of the station, the observation zone and in the background area. The specific activities of ^{137}Cs in the samples were determined using a scintillation gamma spectrometer. The weighted average specific activities of ^{137}Cs in *Cladonia* lichens were 22.3–104.8 Bq/kg, while most of the radiocaesium was concentrated in the upper layers of the lichen. Statistical data processing using a single-sample t-test, Spearman's coefficient, and cluster analysis indicated the dominant role of global fallout in the ^{137}Cs input into the lichens, while the possible impact of the Kola nuclear power plant on this process is limited to the sanitary protection zone.

Keywords: *Cladonia* lichens, ^{137}Cs , ^{40}K , Kola Nuclear Power Plant, correlation analysis