

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ И МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ЛИШАЙНИКОВОМ ПОКРОВЕ РАЗЛИЧНЫХ РЕГИОНОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

В.Д. Страховенко, Б.Л. Щербов, Е.И. Хожина

*Объединенный институт геологии, геофизики и минералогии СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия*

В Западно-Сибирском регионе лишайники являются весьма распространенным компонентом растительного покрова, особенно для северных территорий, где они служат одним из звеньев пищевой цепочки коренного населения. Они играют важную роль в процессах миграции и трансформации химических форм поллютантов. В работе изложены результаты изучения влияния ряда факторов на накопление химических элементов в лишайниковом покрове.

Средние содержания микроэлементов в лишайниках на всей исследуемой территории находятся на уровне фоновых значений, установленных для арктических районов Евразии. Повышенные содержания отмечаются лишь для Cd, Mn в Алтайском крае, Республике Алтай и Pb, Cr во всем Западно-Сибирском регионе. Изучены соотношения концентраций техногенных радионуклидов (^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{238-240}\text{Pu}$) и микроэлементов (Cd, Pb, Cu, Zn, Mn, Cr, Ni, Co, Hg) в верхней и базальной частях лишайника, а также подстилающем их субстрате. Установлено, что средняя удельная активность ^{137}Cs в лишайниковом покрове северных территорий Западной Сибири равна 153 Бк/кг, что выше, чем в ее южных районах — 44 Бк/кг.

Биогеохимия, лишайники, загрязнение окружающей среды, радионуклиды, микроэлементы, вертикальное и горизонтальное распределение, Западная Сибирь.

DISTRIBUTION OF RADIONUCLIDES AND TRACE ELEMENTS IN THE LICHEN COVER OF WEST SIBERIAN REGIONS

V.D. Strakhovenko, B.L. Shcherbov, and E.I. Khozhina

Lichens are widespread in the vegetative cover of West Siberia, particularly in its north, where they serve as one of the links of the natives' food chain. They play an important role in the migration and transformation of chemical pollutants. This paper presents results of studying the effect of some factors on the accumulation of chemical elements in the lichen cover.

Throughout the study area, lichens have background average contents of trace elements close to those in the Arctic regions of Eurasia. Elevated contents have been established only for Cd and Mn in the Altai Territory and for Pb and Cr throughout the West Siberian region. We studied the ratios of concentrations of man-induced radionuclides (^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{238-240}\text{Pu}$) and trace elements (Cd, Pb, Cu, Zn, Mn, Cr, Ni, Co, Hg) in the upper and basal parts of the lichen and in the underlying substrate. The average specific activity of ^{137}Cs in the lichen cover of northern West Siberia is higher than that in southern West Siberia — 153 and 44 Bq/kg, respectively.

Biogeochemistry, lichens, environmental pollution, radionuclides, trace elements, vertical and horizontal distribution, West Siberia

ВВЕДЕНИЕ

Основная задача данной работы — оценка техногенного загрязнения лишайникового покрова некоторых районов Западной Сибири.

Основным источником радиоактивного загрязнения ландшафтов Западной Сибири служили взрывы ядерных устройств на испытательных полигонах бывшего СССР, а также атомные взрывы, выполненные в мирных целях. Южные территории региона находились преимущественно под влиянием Семипалатинского полигона, северные — Новоземельского. На Новоземельский полигон приходится 94 % суммарного энерговыделения от всех ядерных испытаний в СССР и только 5,5 % — на Семипалатинский полигон. Возможность дальнего переноса радиоактивных облаков от взрывов на ядерных полигонах доказана натурными наблюдениями и математическим моделированием [1].

В последние десятилетия бурный рост промышленного производства сопровождается выбросом в атмосферу огромного количества техногенных загрязнителей, содержащих тяжелые металлы [2—4]. Например, за год при сжигании попутного газа в атмосферу выбрасывается только в Западно-Сибирском регионе свыше 400 тыс. т вредных веществ — оксидов углерода и азота, углеводородов, сажи с повышенным содержанием металлов, особенно свинца, ртути и кадмия [5, 6]. Фактические данные по различным природно-территориальным комплексам дают основание полагать, что организмы в сотни и тысячи раз могут различаться по концентрации микроэлементов [7]. Возможны значительные вариации у особей

одного вида, находящихся в неодинаковых условиях температуры, влажности, ландшафта и других [8—10].

Все это вынуждает обратить серьезное внимание на содержание в лишайниках искусственных радионуклидов и микроэлементов. Лишайники состоят из двух противоположных в физиологическом отношении компонентов — клеток гетеротрофного гриба и автотрофной водоросли. Специфическая биохимия лишайников и анатомо-физиологические особенности строения, не встречающиеся у других растений, обуславливают их высокую поглотительную способность по отношению к различного рода загрязнителям. Они усваивают атмосферную воду (дождь, снег, туман, роса) очень быстро всей поверхностью тела и в больших количествах — до 100—300 % от сухой массы слоевища [11, 12]. Однако возможность поступления неорганических веществ с растворами почвы также не отрицается [13]. Накопление поллютантов в телах лишайников приводит к попаданию токсичных элементов в трофические цепи, поскольку лишайники служат основным кормом для северных оленей большую часть года, а также входят в рацион многих диких животных в других регионах Сибири. Многочисленными работами показана прямая зависимость содержания ^{137}Cs в оленине от его активности в лишайниках [14—19]. В середине 60-х годов активность ^{137}Cs в съедаемой верхушке ягеля была в пять раз выше, чем в его основании [14]. Постепенно интерес к цепочке лишайник—олень—человек снизился из-за прекращения ядерных испытаний и, соответственно, свежих выпадений радиоактивных элементов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы лишайникового покрова собраны в ходе экспедиционных работ в течение 1998—2002 гг. на севере (Пуровский и Красноселькупский районы Ямало-Ненецкого автономного округа) и юге (Алтайский край, Республика Алтай и Новосибирская область) Западной Сибири (рис. 1). В этих регионах широко распространены лишайники одних и тех же видов, что делает их весьма удобным объектом для сравнения содержаний радионуклидов и микроэлементов. Исследуемый материал собран в местах как удаленных на значительные расстояния от промышленных площадок (буровые вышки, горно-обогатительные фабрики, нефтеперерабатывающие предприятия и другие), так и в непосредственной близости к ним. Аналитические работы выполнены в лаборатории геохимии редких элементов и экогеохимии ОИГГМ СО РАН с использованием соответствующих методик пробоподготовки и анализа [20, 21]. Определение ^{137}Cs

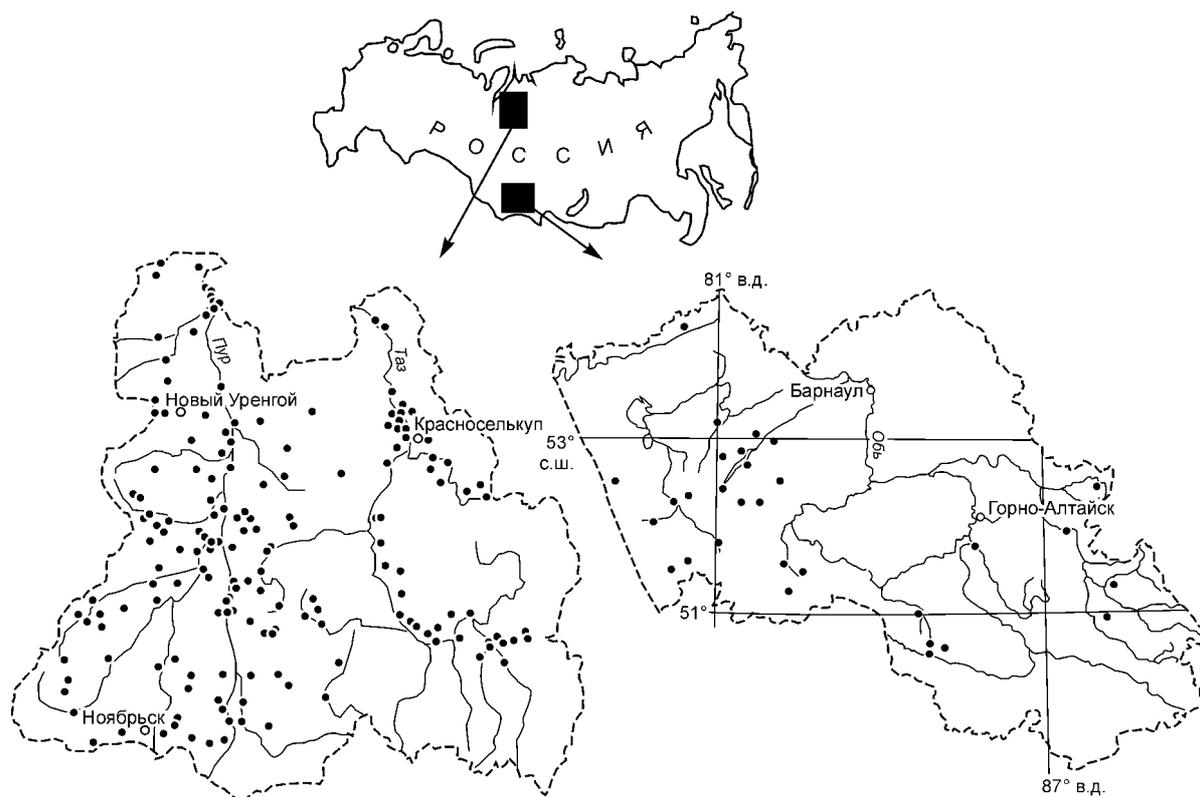


Рис. 1. Карта-схема точек отбора проб лишайника на территории Западной Сибири.

проведено гамма-спектрометрическим методом (аналитик А.С.Степин), ^{90}Sr — бэта-радиометрией с радиохимической подготовкой и $^{238-240}\text{Pu}$ измерялся на L-спектрометре после радиохимического выделения и электрометрического осаждения на стальную мишень (аналитик И.В. Макарова), а микроэлементов (Cd, Pb, Cu, Zn, Mn, Cr, Ni, Co, Hg) — атомной абсорбцией (аналитики Л.Д. Иванова, О.Г. Галкова). Лаборатория аккредитована Ассоциацией аналитических центров „АНАЛИТИКА“ и зарегистрирована в Государственном реестре под № РОСС Ru 0001.510590.

При отборе проб лишайникового покрова использовались методы „конверта“ и „площадок“. Метод „конверта“ заключается в отборе проб по вершинам квадрата и в центре (например размером 10×10 м) [22]. На протяжении нескольких лет нами проводились методические исследования, определяющие размер и количество отбираемой пробы лишайникового покрова. На основе этих данных предложен следующий отбор проб методом „площадок“: на территории размером 1 км^2 выбираются три наиболее информативные площадки размером 1×1 м, с которых материал собирается полностью. Под информативными площадками мы понимаем компоненты ландшафта, где первичные выпадения поллютантов имеют максимальную сохранность [23].

Видовой состав лишайников, произрастающих на изученной территории, представлен главным образом кустистыми и листоватыми лишайниками. В коллекцию растений вошли в основном лишайники рода *Cladonia*, произрастающие повсеместно и являющиеся доминантными в местах распространения сплошного лишайникового покрова: *Cladonia stellaris*, *Cladonia rangiferina*, *Cladonia arbuscula*, *Cetraria islandica*, *Alectoria ochroleuca* и некоторые другие. Среди них особый интерес представляют первые три вида, широко распространенные на обследованной территории [11, 12]. Видовой состав определен к.б.н. Н.В. Седельниковой, за что авторы искренне ей благодарны.

С целью выяснения индивидуальной способности отдельных видов к накоплению поллютантов в Пуровском районе, где наиболее широко развит лишайниковый ковер, на трех участках размером не более 10×10 м каждый собраны коллекции произрастающих совместно лишайников. Первая площадка расположена в 3 км к юго-западу от пункта (п.). Самбург. Ландшафт представляет собой пологоовражистую возвышенность с редкими куртинами тундровой лиственницы. Пробы отобраны среди редких лиственниц на вершине пологой возвышенности. Почвенный покров представляет собой, скорее, лесную подстилку. Эти подстилки имеют мощность от 1,5—2 до 5—6 см. Ниже они резко сменяются песком или суглинком с почти полным отсутствием гумусового материала, что коренным образом отличает их от почв юга Западной Сибири, где доминируют различные черноземы с хорошо развитыми дерновым и гумусовым горизонтами. Следует оговориться, однако, что в некоторых точках северной части Пуровского района почвы имеют слабо развитый дерновый слой, резко сменяющийся суглинистым субстратом с небольшим количеством гумуса. Такие почвы встречаются на возвышенных слабозалесенных участках ландшафта. Однако мерзлотные трещины и вспучивание приводят к перемешиванию дернового и гумусового слоев с почвообразующим суглинком, что делает эти почвы непредставительными при изучении их радиоактивной загрязненности.

Вторая площадка находится в 30 км к востоку от п. Тарко-Сале в лесотундровой зоне на западном окончании обширного торфяного бугра мерзлотного пучения. Третья площадка изучена за полярным кругом в районе среднего течения р. Караль-Яха (100 км к северу от п. Новый Уренгой). Местность представляет собой типичную северную тундру.

На юге Западной Сибири, где такого разнообразия видов лишайников, как на севере, нет, также было изучено несколько площадок с совместно произрастающими, как минимум, четырьмя видами лишайников (ленточные боры Алтайского края и горные ландшафты Республики Алтай). Только два вида лишайников (*Cladonia stellaris* и *Cladonia rangiferina*) являются сквозными, т. е. произрастающими на всех исследуемых территориях.

Особого внимания заслуживает проблема вертикального распределения искусственных радионуклидов в телах лишайников. В самом начале исследований радиоактивного загрязнения Крайнего Севера было обращено внимание на преимущественное накопление ^{137}Cs верхними ризоидами кустистых лишайников [15—18]. Это положение продолжало утверждаться до последнего времени [19]. Для выявления более конкретного вертикального распределения радионуклидов и микроэлементов в теле лишайников в 22 точках опробование лишайников проводилось послойно. Число рассматриваемых слоев было увеличено: верхние ризоиды, выросшие за последние 2—3 года, средние, базальные, отмершие ризоиды лишайника, подстилка и почвообразующий субстрат. Натурные наблюдения авторов позволяют утверждать, что олени съедают не только верхушки лишайников, но зачастую выедают его целиком (до подстилки).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Аналитические данные в табл. 1 показывают, что средняя удельная активность ^{137}Cs в лишайниках Пуровского района является самой высокой среди обследованных нами других районов Западной Сибири.

Таблица 1.

Удельная активность ^{137}Cs в лишайниках Западной Сибири

Регион	Кол-во проб	^{137}Cs , Бк/кг		
		Средняя концентрация/медиана	Мин/макс значения	Стандартное отклонение
Пуровский район	237	155/117	7/685	129
Алтайский край	58	29/20	1/212	29
Республика Алтай	76	24/18	0/102	22

Примечание. Статистическая обработка данных производилась в программе „Статистика“.

Следует оговориться, что приведенное в табл. 1 значение активности ^{137}Cs (Бк/кг) для лишайников включает в себя данные анализа отмершей части лишайника, имеющей всегда самые высокие активности радионуклида.

Достаточно представительное количество точек наблюдения в Пуровском районе дает возможность выделить отдельные площади с различной степенью радиоактивного загрязнения для данной территории (рис. 2). Неравномерное пространственное распределение ^{137}Cs проявляется обычно не только на каких-либо больших территориях, но и локально, на „микроуровне“, о чем свидетельствует опробование лишайников и почв методом „конверта“, на ровной поляне среди смешанного леса в районе п. Харампур. Почва покрыта сплошным ковром лишайника *Cl. stellaris* (рис. 3). Мелкозернистый песок отделен от лишайникового покрова маломощным слоем подстилки. Активность ^{137}Cs в лишайниках разных точек на этом небольшом участке различается почти на 70 %, а в почвах, отобранных стандартным кольцом высотой 50 мм (в пробы вошли как подстилка, так и песок), это различие составляет 100 %. Содержание радиоцезия в таких пробах не коррелирует с мощностью подстилки.

При дальнейшем изучении распределения элементов по площади были выбраны несколько участков на территории Пуровского района, в Алтайском крае и Новосибирской области с учетом ландшафтных особенностей, а также с максимальным распространением лишайникового покрова и видового разнообразия. На каждом из участков намечалось по две-три площадки размером 1×1 м на расстоянии до 300 м между ними. Данные табл. 2 показывают, что концентрации радиоцезия внутри отдельного компонента профилей одного участка, за исключением субстрата, отличаются незначительно (на 2 %). Для субстрата это значение составляет 25 %. В среднем вариация не превышает 10 %. Подобный отбор проб значительно повышает достоверность получаемых значений.

Средние содержания микроэлементов в лишайниках на всей территории региона находятся на уровне фоновых значений, установленных для арктических районов Евразии (табл. 3). Повышенные содержания отмечаются лишь для Pb, Sr в лишайниках всего Западно-Сибирского региона и для Cd, Mn в Алтайском крае.

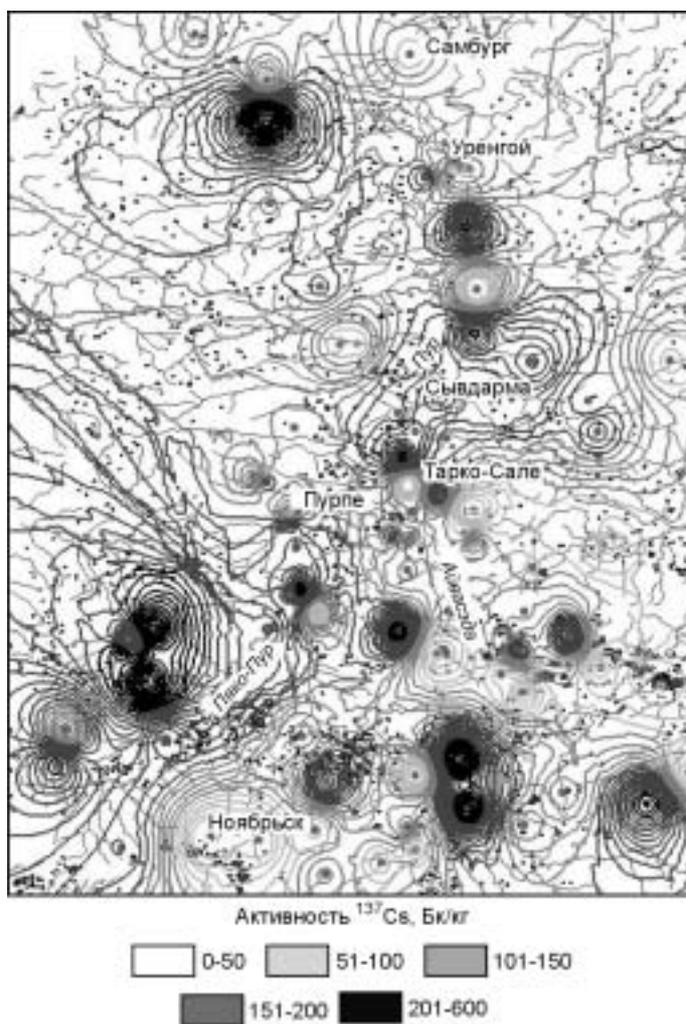


Рис. 2. Распределение ^{137}Cs в лишайниках по площади северного региона Западной Сибири (карта построена по 153 точкам).

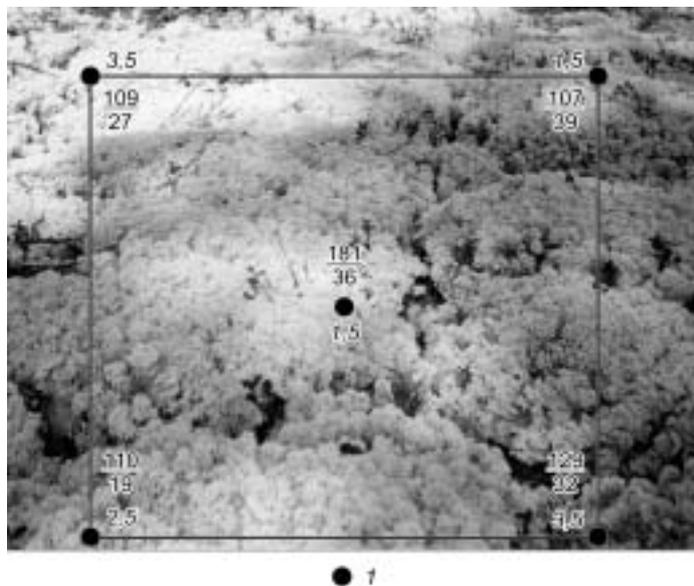


Рис. 3. Удельная активность ^{137}Cs (Бк/кг) в лишайнике *Cladonia stellaris* (цифра над чертой) и почвенном слое (цифра под чертой) на „конверте“ в районе п. Харампур.

Цифры курсивом — мощность дернового горизонта (см). 1 — места отбора проб.

Анализ зависимости накопления радионуклидов и микроэлементов в лишайниках разных видов, совместно произрастающих на трех участках, показал, что самые высокие содержания радиоцезия характерны для трех видов: *Cladonia rangiferina*, *Cetraria islandica*, *Alectoria ochroleuca* (табл. 4).

Широкая распространенность этих видов лишайников в Пуровском районе и их способность к поглощению радиоцезия в большом количестве способствуют его концентрированию в трофических цепях.

Таблица 2. Удельная активность ^{137}Cs в разрезах ягель—подстилка—почва, отобранных на одной точке пробоотбора

Номер точки	Компонент	^{137}Cs , Бк/кг		
		1 разрез	2 разрез	3 разрез
<i>Пуровский район (ЯНАО)</i>				
91	Лишайник	138	126	152
	Отмершие подстилки лишайника	465	317	518
	Подстилка	246	253	444
	Песок	11	5	7
243	Лишайник	54	50	76
	Отмершие подстилки лишайника	241	225	240
	Подстилка	219	206	188
	Песок	2	4	0
212	Лишайник	36	41	—
	Отмершие подстилки лишайника	69	109	—
	Подстилка	197	205	—
	Песок	16	9	—
79	Лишайник	101	74	—
	Отмершие подстилки лишайника	322	339	—
	Подстилка	324	372	—
	Песок	6	11	—
<i>Алтайский край</i>				
190	Лишайник	18	15	—
	Отмершие подстилки лишайника	56	53	—
	Подстилка	212	220	—
	Песок	42	26	—
<i>Новосибирская область</i>				
191	Лишайник	14	14	11
	Отмершие подстилки лишайника	51	54	45
	Подстилка	140	183	154
	Песок	35	35	30

Таблица 3. Содержание микроэлементов в лишайниках (мг/кг) в различных регионах Западной Сибири

Регион	Кол-во проб	Cd	Pb	Cu	Zn	Mn	Cr	Ni	Co	Hg
Ямало-Ненецкий автон. округ	210	0,17	14	32	18	66	5,4	3,5	0,65	0,056
		0,01 – 0,54	1,15 – 77	0,2 – 30	6 – 40	4 – 422	0,2 – 37	0,5 – 15	0,06 – 4,4	0,01 – 0,31
Алтайский край	98	0,3	13,6	4,8	31	123	5	2,3	0,87	0,063
		0,07 – 0,87	5 – 42	1,8 – 18	16 – 93	1 – 618	1 – 35	0,4 – 12	0,06 – 9	0,0 – 0,38
Республика Алтай	55	0,3	10,6	4	32	114	2	1,3	0,39	0,086
		0,11 – 0,75	3,9 – 31	1,3 – 23	15 – 229	28 – 559	0,4 – 5,4	0,4 – 2,5	0,05 – 2,3	0,003 – 0,32
Фоновые арктические р-ны Евразии и Канады [24]		0,171	4,2	8,5	24,1	47,7	1,6	2,5	0,51	0,09
Дальневост. регион. фон [13]		0,35	5	1,5	25	200	—	—	—	—

Примечание. Над чертой — среднее содержание, под чертой — минимальное и максимальное значения.

Анализ предпочтительного накопления элементов одним видом относительно других видов, произрастающих совместно, не выявил каких-либо четких закономерностей. Например, *Cetraria islandica* характеризуется самой высокой активностью ^{137}Cs среди пяти видов на втором участке, а на третьем — одной из самых низких. Подобное замечание справедливо и для *Alectoria ochroleuca*. И только *Cl. rangiferina* устойчиво показывает повышенное содержание радиоцезия и некоторых микроэлементов, особенно Pb, Cu и Co (рис. 4), а *Cl. stellaris* имеет средний уровень концентрации радионуклидов.

На южных территориях Западной Сибири активность радиоцезия в различных видах лишайника невысока и от вида к виду изменяется незначительно.

Для выяснения основных закономерностей распределения элементов в теле лишайника особое внимание было уделено изучению вертикального распределения элементов в системе слои лишайника — подстилка — субстрат. Как показали наши исследования, среди многих десятков образцов из различных регионов Сибири, проанализированных послойно, верхние ризоиды обеднены радиоцезием в сравнении с базальными частями. В 22 точках различных районов Западной Сибири опробование лишайников проводилось более детально с увеличением числа рассматриваемых слоев. Образцы проанализированы не только на радиоцезий, но и другие техногенные радионуклиды (^{90}Sr и $^{239,240}\text{Pu}$) и на микроэлементы (Cd, Pb, Cu, Zn, Mn, Cr, Ni, Co, Be, Hg, Sb). Исследования показали, что часто в самой молодой части верхних ризоидов лишайника, выросшей за последнее 2—3 года, концентрация ^{137}Cs несколько повышена по сравнению с более старыми (рис. 5). Тем не менее суммарная активность ^{137}Cs в обоих слоях верхних ризоидов значительно меньше, чем в базальных частях лишайников. В отмерших частях лишайников и подстилке происходит максимальное накопление радионуклида. В песке содержание ^{137}Cs низкое.

Таблица 4. Удельная активность ^{137}Cs в лишайниках разных видов, произрастающих в Пуровском районе

№ п/п	Вид лишайника	^{137}Cs , Бк/кг		
		п. Самбург	п. Тарко-Сале	р. Караль-Яха
1	<i>Cladonia stellaris</i>	70	130	94
2	<i>Cladonia rangiferina</i>	144	203	111
3	<i>Stereocalon tomentosum</i>	65	—	—
4	<i>Cetraria islandica</i>	9	212	64
5	<i>Alectoria ochroleuca</i>	58	190	107
6	<i>Cladonia cornuta</i>	86	—	—
7	<i>Cladonia cervicornis</i>	—	160	—
8	<i>Cetraria richardsonii</i>	—	—	45

Примечание. Видовое определение лишайников проведено по коллекциям Верхнетазовского заповедника; прочерк — вид лишайника не обнаружен.

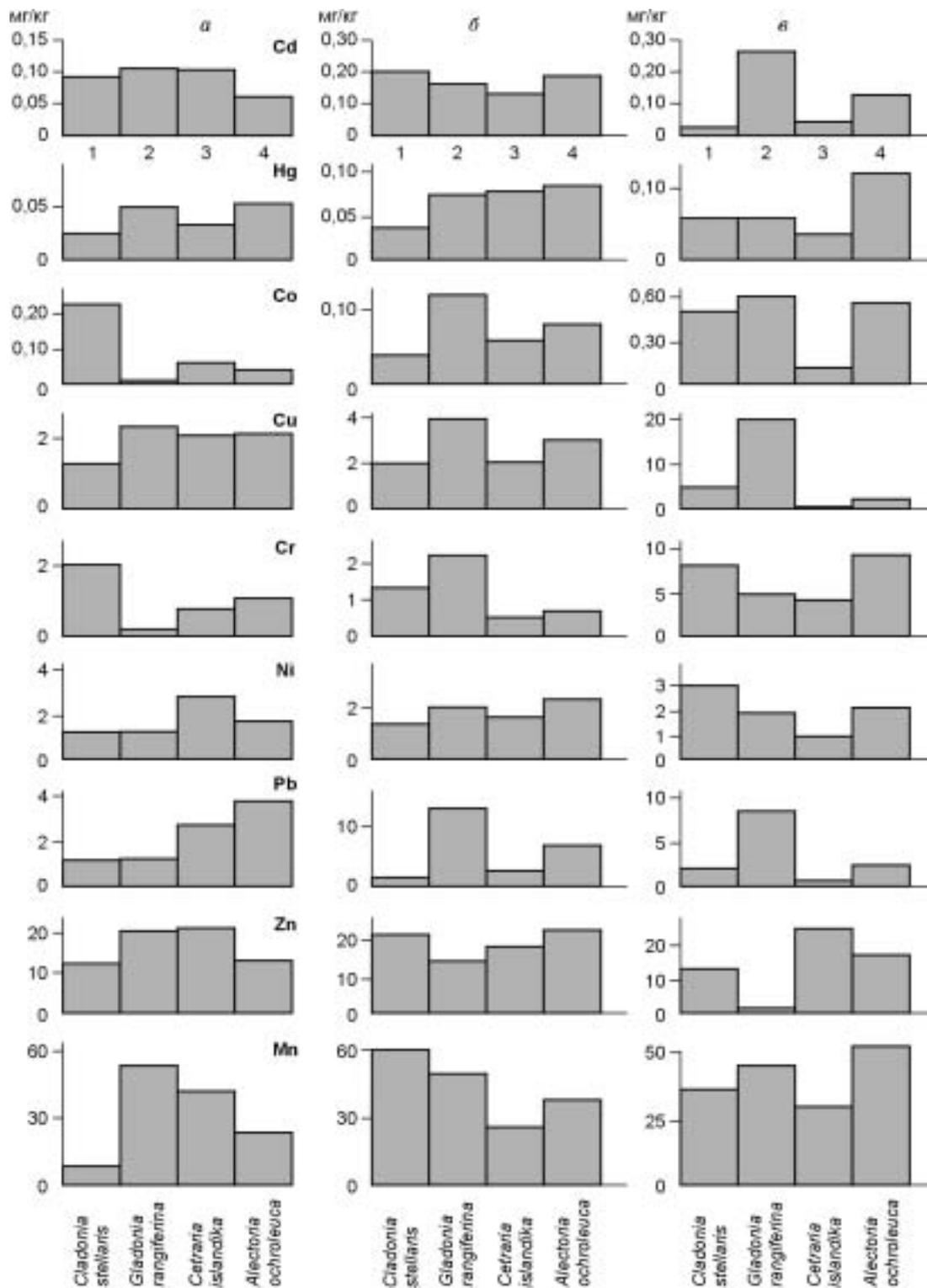


Рис. 4. Содержание микроэлементов в различных видах лишайников на трех площадках: *a* — первая площадка, *b* — вторая, *c* — третья.

Общая активность ^{90}Sr и $^{239,240}\text{Pu}$ на территории Западной Сибири всегда ниже, чем у ^{137}Cs (см. рис. 5). Вертикальное распределение этих радионуклидов в профилях слой лишайника—подстилка—песок значительно сложнее, но подметить какую-либо закономерность не удастся.

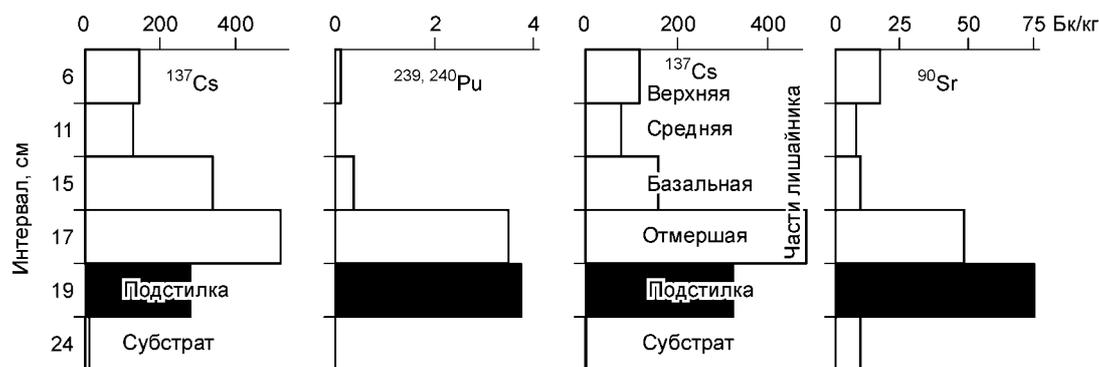


Рис. 5. Удельная активность радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239,240}\text{Pu}$ в профиле слою лишайника—подстилка—субстрат.

Сводные графики средних содержаний микроэлементов (усреднение проб из разных разрезов производилось послойно) лишь в общих чертах характеризуют вертикальное распределение элементов в профиле, нивелируя влияния многих факторов. Однако общая тенденция поведения микроэлемента выявляется довольно четко. Такие элементы, как Ni, Cr, Co и Cd, Hg, Zn, Pb имеют сходное распределение во всех изученных регионах: Ni, Cr, Co — в теле лишайника не накапливаются, и их содержание значительно ниже, чем в подстилающем субстрате (рис. 6). Для Cd, Hg характерно максимальное накопление в горизонте, состоящем из отмерших пододея лишайника, а для Zn, Pb отмечается их синхронное изменение в разных регионах Западной Сибири.

Корреляционный анализ концентраций микроэлементов, проведенный с помощью пакета Statistica, в профилях лишайников из разных мест тундры Ямало-Ненецкого АО и территории Алтайского края показал, что изучаемые элементы для лишайникового покрова северных территорий разделились на две группы (рис. 7): первая — элементы, поступившие из воздуха, или техногенные (Pb, Cd, Hg, ^{137}Cs),

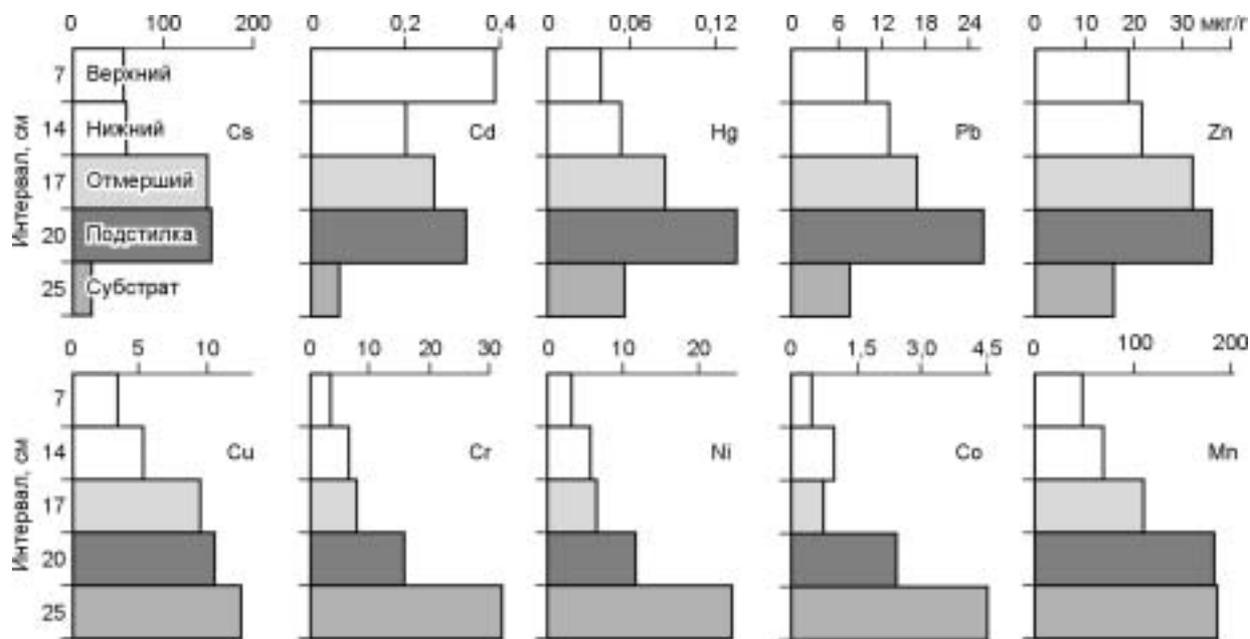


Рис. 6 Сводные графики распределения микроэлементов в системе слою лишайника—подстилка—субстрат для территории Западной Сибири.

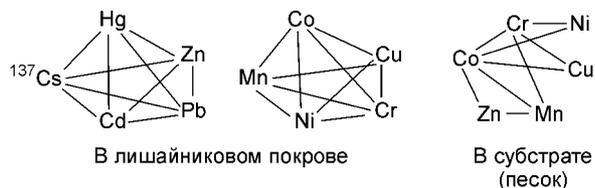


Рис. 7. Схема значимых корреляционных связей между микроэлементами.

вторая — поступившие из нижележащих пород (Co, Ni, Cr, Cu, Mn), они характерны для подстилки. Для субстрата четко выделяется группа элементов, поступающих за счет подстилающих пород.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно расчетам М.Н. Троицкой и группы исследователей [25], при условии отсутствия выпадений от новых ядерных испытаний динамика снижения концентраций ^{137}Cs в лишайниках, а следовательно, и в оленине по отношению к максимуму, наблюдавшемуся в 1965 г., должна идти по следующей схеме (%): 1965 г. — 100; 1967 — 58; 1969 — 35; 1971 — 22; 1973 — 14; 1975 — 9; 1977 — 6. Даже если учесть замечание тех же авторов о возможности более медленного снижения активности ^{137}Cs в лишайниках (например в 2 раза) и принять за точку отсчета самое высокое значение для тех лет в 3219 Бк/кг [26], то его активность в этих растениях к настоящему времени не должна превышать 15—20 Бк/кг. Но по данным М.Г. Нифонтовой [26], собиравшей материал в 1991—1996 гг., содержание ^{137}Cs в мохово-лишайниковом покрове северотаежного ландшафта составляет 130 Бк/кг, максимальное — до 400 Бк/кг. Полученные нами данные показывают, что это далеко не предельные значения.

Современная высокая активность ^{137}Cs в лишайниковом покрове северных территорий, скорее всего, связана с двумя факторами. Пространственная близость исследуемых районов к Новой Земле дает основание считать главным источником их загрязнения техногенными радионуклидами ядерные взрывы на Новоземельском полигоне [27]. Другой важной причиной может служить специфика природных условий Севера — низкие температуры, наличие многолетнемерзлых пород, небольшая продуктивность ценозов и их пониженная устойчивость к повреждающим факторам [28]. Эффективный период полувыведения ^{137}Cs в арктических лишайниках длится, по крайней мере, 10 лет, что в 2—3 раза дольше, чем у сосудистых растений других регионов [29]. Возможно, игнорирование этого фактора и привело к тому сильному расхождению расчетных данных М.Н. Троицкой с реально существующими сейчас содержаниями в лишайниках.

Анализ лишайников разных видов из различных районов Западной Сибири, произрастающих совместно, показывает, что в целом кустистые разновидности накапливают поллютанты охотнее, чем листоватые. По-видимому, эта закономерность связана с различием сорбционной поверхности кустистых и листоватых видов. Однако отмечаются случаи, когда она не выдерживается (см. табл. 4, р-н п. Тарко-Сале). Особого обсуждения заслуживает проблема вертикального распределения ^{137}Cs в телах кустистых лишайников. Как нами установлено, в абсолютном большинстве случаев последний анализ показывает предпочтительное накопление радионуклида в базальных частях растений. Это противоречит данным о его содержании в верхних ризоидах, что уже отмечалось выше. По-видимому, в период активных ядерных испытаний на полигонах СССР и США лишайники захватывали радиоцезий, поступающий из атмосферных осадков, а в настоящее время его источником, скорее всего, является субстрат.

Что касается распределения активностей ^{90}Sr и $^{239,240}\text{Pu}$ в профилях: части лишайника—подстилка—песок, то можно констатировать более активную миграцию их в базальные части разрезов для всех изучаемых территорий.

Корреляционный анализ показал, что при рассмотрении вертикального распределения микроэлементов в системе лишайник—субстрат они разделились на две группы. В первую попали Cd, Hg, Pb, а также Zn и ^{137}Cs . Для всех элементов этой группы характерна минимальная концентрация в субстрате (от 2—5 до 30 Бк/кг) и максимальная в подстилке и отмерших слоевищах. Поскольку ^{137}Cs имеет техногенное происхождение [1, 14], то можно предположить, что и для элементов, имеющих тесные связи с ним, привнос осуществляется за счет техногенной составляющей. Этот вывод базируется на том, что основным источником питания для лишайников рода *Cladonia* являются атмосферные осадки; Zn является биофильным элементом и концентрируется в наиболее молодых побегах растений [30]. Другой особенностью элементов этой группы является их накопление в отмерших частях и подстилке. Возможно, что при разложении органических соединений, составлявших тело лишайника, эти элементы из него не вымываются, а остаются и концентрируются.

Вторая группа микроэлементов включает в себя Cu, Cr, Ni, Co. Для них характерна максимально высокая концентрация в субстрате и низкая в теле лишайника. В отличие от элементов первой группы, концентрация элементов второй группы в отмерших частях лишайника незначительно выше, чем в верхних частях. Существенное превышение наблюдается только для Cu. Вероятно, элементы второй группы в телах лишайников имеют почвенный источник.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные данные свидетельствуют о том, что средняя удельная активность ^{137}Cs в лишайниках одних и тех же видов из северных территорий Западной Сибири значительно выше, чем на юге. Этот факт находится в противоречии с данными авторов о более высокой радиоактивности донных отложений замкнутых пресных водоемов Алтая по сравнению с донными осадками северных территорий. В то же время активность радионуклидов в свежей хвое одних и тех же пород деревьев северных регионов выше, чем южных. Эти факты пока не находят своего однозначного объяснения, можно лишь предположить последующее перераспределение радионуклидов в растительном покрове северных территорий.

Средние содержания микроэлементов в лишайниках на всей территории Западной Сибири находятся на уровне фоновых значений, установленных для арктических районов Евразии. Повышенные содержания отмечаются лишь для Cd, Pb, Sr для Алтайского края.

Полученные результаты позволяют сделать вывод об отсутствии четких закономерностей в накоплении радионуклидов и микроэлементов лишайниками в зависимости от их видовой принадлежности, однако в целом кустистые виды накапливают их предпочтительнее листоватых.

В лишайниках рода *Cladonia* различных ландшафтов Западной Сибири, проанализированных по слою, верхние молодые части растений обеднены радионуклидами в сравнении с базальными частями.

Средние содержания Pb, Hg, Cd и некоторых других элементов в лишайниках незначительно превышают фоновые значения, что может свидетельствовать об относительно слабой техногенной нагрузке на изученные районы Западной Сибири. В то же время повышенное радиоактивное загрязнение лишайникового покрова северных территорий, поскольку он связан с трофическими цепями коренного населения, служит основанием для проведения дальнейших исследований.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 02-05-64646 и 03-05-06134).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Новоземельский полигон.** Факты, свидетельства, воспоминания / Ред. В.А. Логачев. М., Изд-во АТ, 2000, 483 с.
2. **Давиденко Н.М.** Проблемы экологии нефтегазоносных и горно-добывающих регионов Севера России. Новосибирск, Наука, 1998, 224 с.
3. **Barhudarov R.M., Marej A.N., Novikova N.P.** Factors fix the increased migration of the ^{137}Cs from the environment to the human // *Environmental Behaviour of Radionuclides Released Nucl.Ind.* Vienna, 1973, p. 365—371.
4. **Бурова Л.П.** О вымывании загрязняющих веществ из атмосферы Арктики // *Метеорология и гидрология*, 1992, № 9, с. 49—56.
5. **Московченко Д.В.** Нефтегазодобыча и окружающая среда: эколого-геохимический анализ Тюменской области. Новосибирск, Наука, 1998, 112 с.
6. **Виноградова А.А.** Микроэлементы в составе арктического аэрозоля (обзор) // *Изв. РАН, Физика атмосферы и океана*, 1993, т. 29, № 4, с. 437—456.
7. **Виноградова А.А., Егоров В.А.** О возможности дальнего атмосферного переноса загрязнений в Российскую Арктику // *Изв. РАН, Физика атмосферы и океана*, 1996, т. 32, № 6, с. 796—802.
8. **Власова Т.М.** Состояние лишайников в условиях атмосферного загрязнения // *Научно-технический бюллетень СО ВАСХНИЛ*, 1987, № 24—25, с. 240—259.
9. **Елсаков В.В.** Распределение тяжелых металлов в талломах *Peltigera aphthosa* (L.) Willd // Тезисы 4 молодежно-научной конференции Ин-та биологии „Актуальные проблемы биологии“ (Сыктывкар, 11—12 апр., 1996), Сыктывкар, 1996, с. 45.
10. **Pyatt F.B., Grattan J.P.** Comparative effectiveness of *Tillandsia usneoides* L. and *Parmotrema praesorediosum* (Nyl) Hale as bioindicators of atmospheric pollution in Louisiana (USA) // *Water, Air, and Soil Pollut.*, 1999, v. 111, № 1—4, p. 317—326.
11. **Жизнь растений.** Т. 3. Водоросли и лишайники / Ред. М.М. Голлербах. М., Просвещение, 1977, 488 с.
12. **Шапиро И.А.** Загадки растения-сфинкса: лишайники и экологический мониторинг. Л., Гидрометеизд, 1991, 80 с.
13. **Аржанова В.С., Скирина И.Ф.** Значение и роль лишайниковых исследований при эколого-геохимической оценке состояния окружающей среды // *География и природные ресурсы*, 2000, № 4, с. 33—40.
14. **Моисеев А.А., Рамзаев П.В.** Цезий-137 в биосфере. М., Атомиздат, 1975, 182 с.
15. **Hanson W.C., Palmer H.E.** The accumulation of fallout Cs-137 in the northern alaskan natives // *Nucl. Sci. Abstrs*, 1965, v. 19, № 8, p. 13625.

16. **Liden K., Gustafson M.** Relationships and seasonal variation of Cs-137 in lichen, reindeer, and man in Northern Sweden, 1961—1965 // Radioecological concentration processes. Oxford, Pergamon Press, 1967, p. 193—208.
17. **Paliouris G., Taylor H.W., Wein R.W. et al.** Fire as an agent in redistributing fallout¹³⁷Cs in the Canadian boreal forest // Sci. Total Environ., Int. symp. „Ecological Effects of Arctic Airborne Contaminants“ Reykjavik, 4—8 Oct., 1993. Reykjavik, 1995, v. 160—161, p. 153—166.
18. **Нижников А.И., Невструева М.А., Рамзаев П.В. и др.** Цезий-137 в цепочке лишайник—олень—человек на Крайнем Севере СССР (1962—1968 гг.). М., Атомиздат, 1969, 16 с.
19. **Поляков В.А., Мельников Е.С.** Оценка радиэкологической обстановки на территории северной части Западной Сибири // Криосфера Земли, 1998, т. 11, № 1, с. 36—43.
20. **Симонова В.И., Смертина Л.Н., Голованова Н.П. и др.** Определение микроэлементов в водах, донных осадках и почвах // Аналитика Сибири-90 (Тез. докл. III региональной конференции, Ч. 2: Объекты анализа). Иркутск, Изд-во ИГХ СО АН СССР, 1990, с. 293—294.
21. **Бобров В.А., Гофман А.М.** Лабораторный гамма-спектрометрический анализ естественных радиоактивных элементов (методические разработки). Новосибирск, Изд-во ИГиГ СО АН СССР, 1971, 67 с.
22. **Инструкции и методические указания по оценке радиационной обстановки на загрязненной территории** / Под ред. А.Н. Силантьева, Ф.И. Павлоцкой и др., М., 1989, 69 с.
23. **Маликова И.Н., Ковалев С.И., Сухоруков Ф.В. и др.** Обоснование оптимальной схемы опробования почв для ретроспективной оценки радиоактивных выпадений // Сибирский экологический журнал, 2002, № 1, с. 9—20.
24. **Reimann C., Caritat P.** Chemical elements in the environment. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998, 398 p.
25. **Троицкая М.Н., Рамзаев П.В., Моисеев А.А. и др.** Радиэкология ландшафтов Крайнего Севера // Современные проблемы радиобиологии, Т. 2: Радиэкология. М., Атомиздат, 1971, с. 325—353.
26. **Нифонтова М.Г.** Содержание долгоживущих искусственных радионуклидов в мохово-лишайниковом покрове наземных экосистем Урало-Сибирского региона // Экология, 1998, № 3, с. 196—200.
27. **Дубасов Ю.В., Думик В.П., Зеленцов С.А. и др.** Хронология ядерных испытаний, проведенных СССР в атмосфере, космическом пространстве и под водой (1949—1962 гг.) // Бюл. ЦОИ по атомной энергии, 1994, № 2, с. 36—43.
28. **Москаленко Н.Г.** Антропогенная динамика растительности равнин криолитозоны России. Новосибирск, Наука, 1999, 280 с.
29. **Crittenden P.** The use of lichens as indicators of environmental conditions // Народное хозяйство Республики Коми, 1994, т. 3, № 1, с. 76—78.
30. **Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.** Микроэлементы в почвах и растениях. М., Мир, 1989, 439 с.

*Рекомендована к печати 18 июня 2004 г.
Г.Н. Аношиным*

*Поступила в редакцию 11 ноября 2003 г.,
после доработки — 14 апреля 2004 г.*