

БИОМОНИТОРИНГ АЭРОТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ЭКОСИСТЕМ СЕВЕРА РОССИИ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ

А. В. Евсеев

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (Москва, Российская Федерация)

Д. О. Душкова

Берлинский университет им. Гумбольдтов (Берлин, Федеративная Республика Германия)

А. Г. Горецкая

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 27 декабря 2019 г.

Представлены результаты исследований по оценке состояния и изменения свойств окружающей природной среды в условиях аэротехногенного воздействия с использованием биомониторинга. Показано значение биомониторинга как важнейшей составляющей комплексной системы слежения за качеством окружающей среды. Проанализированы особенности распространения аэротехногенных загрязнителей, особенно тяжелых металлов, в экосистемах Севера России. Дана оценка уровней их накопления в растениях-мониторах с применением методов фитоиндикации, позволяющих оценить характер миграции и аккумуляции загрязняющих веществ в высших растениях (включая мхи) и низших растениях (лишайниках). Проанализированы основные предпосылки использования растений как объекта изучения при геоэкологической оценке состояния окружающей среды, в том числе проведения мониторинговых исследований.

Ключевые слова: биомониторинг, аэротехногенное загрязнение, тяжелые металлы, экосистемы, Север России.

Введение

Север России в отдельных районах в силу географических и экономических особенностей в значительной степени подвергается опасности загрязнения, и степень этой опасности постоянно возрастает. Поскольку Россия имеет наиболее протяженные по площади тундровую, лесотундровую и северо-таежную природные зоны, вопрос изучения последствий техногенного воздействия на северные экосистемы весьма актуален [1].

Негативные изменения ландшафтов Севера России происходят при относительно повышенных техногенных нагрузках, обусловленных в первую очередь нерациональным ведением хозяйства [2]. По данным различных исследований [3; 4], подобная

ситуация сложилась на 3—8% территории Севера России, вокруг районов интенсивного хозяйственного освоения. Большая их часть отнесена к так называемым горячим точкам экологического напряжения — environmental hot spots, которые детально изучены и охарактеризованы в наших предыдущих работах [1—5]. Большой вклад в проведение подобных эколого-географических работ внесли биомониторинговые исследования с применением методов биоиндикации [6—8]. В структуре загрязняющих веществ, поступающих с аэротехногенными выбросами на исследуемой территории, значительная доля приходится на соединения серы. Особо следует отметить тяжелые металлы, являющиеся приоритетными аэротехногенными загрязнителями (т. е. загрязняющими веществами, поступающими в результате загрязнения атмосферного воздуха выбросами

промышленных объектов) для большинства районов экологического напряжения. Оценка техногенного загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами особенно актуальна в условиях северных широт, экосистемы которых характеризуются низкой устойчивостью к антропогенному воздействию и невысокой способностью к самоочищению. Внедряясь во все типы миграций и биологический круговорот, тяжелые металлы приводят к загрязнению важнейших жизнеобеспечивающих сред — воды, воздуха, почвы. Помимо прямого токсического воздействия для многих тяжелых металлов характерны так называемые отдаленные эффекты токсичности, затрагивающие такие важнейшие функции живых организмов, как воспроизводство и продуктивность. Тем самым загрязнение тяжелыми металлами создает угрозу не только для отдельных организмов, но и для целых популяций. В отличие от многих других поллютантов (пестицидов, нефтепродуктов и пр.) они не разрушаются и не преобразуются. В природной среде в процессе миграции меняются лишь формы их нахождения и уровни концентраций. Более того, для многих тяжелых металлов характерен кумулятивный эффект — накопление негативных воздействий и эффектов от совместного нахождения отдельных загрязнителей.

В оценке состояния и изменения качества окружающей природной среды в условиях техногенного воздействия существенное развитие в последние десятилетия получил биомониторинг в связи с эффективным использованием методов биоиндикации [9—10]. Биомониторинг — важнейшая составляющая комплексной системы слежения за качеством окружающей природной среды. В отличие от воды и атмосферного воздуха, которые выступают в роли миграционных сред, растения являются наиболее объективными и стабильными индикаторами техногенного загрязнения геосистем. Они четко отражают эмиссию загрязняющих веществ и их фактическое накопление в растениях-мониторах [11—12]. Так, для фитомониторинга можно использовать многие виды мхов и лишайников, но самыми перспективными из них согласно проведенным нами ранее исследованиям являются следующие [1; 5; 9; 13]:

- мхи: *Sphagnum spp.*, *Dicranum scoparium*, *Dicranum polisetum*, *Hylocomium splendens*, *Hypnum cupressiforme*;
- лишайники: *Cladonia rungerferinu*, *Cetraria sp.*, *Hypodinum physodes*, *Xantoria pariebina*, *Lecanora coniazoides*, *Usnea filipendula*.

Целью исследований, результаты которых представлены ниже, являлось изучение особенностей распространения аэротехногенных поллютантов, в частности тяжелых металлов Cu, Ni, Co, Zn, Pb, Sr и др., на Севере России, а также оценка уровней их накопления в названных растениях-мониторах с применением методов биоиндикации. В задачи исследований входили:

- оценка фактического состояния природной среды;

- наблюдение и контроль за состоянием окружающей среды, особенно на потенциально опасных объектах и прилегающих к ним территориях;
- выделение участков повышенной экологической опасности и определение зон горячих точек экологического напряжения;
- полевые исследования с выполнением ландшафтно-географических описаний, отбором образцов названных растений-мониторов;
- последующий лабораторный анализ отобранных образцов для определения содержания тяжелых металлов и оценки ряда соответствующих параметров;
- визуализация полученных данных мониторинга окружающей среды, которые в дальнейшем могут быть использованы для формирования предложений при принятии управленческих решений, связанных с природопользованием и разработкой экологических мероприятий и планов развития Севера России.

Материалы и методы

Исследования велись в рамках одной из главных задач мониторинга как информационной системы наблюдения с целью анализа и прогнозирования состояния окружающей природной среды, а также обеспечения экологической безопасности и сохранения оптимальных условий для жизнедеятельности населения [14—15]. Мониторинг состояния растительного покрова не ограничивался лишь регулярным наблюдением за химическим загрязнением растительности и определением концентрации химических веществ в растениях-мониторах. Изучались и выделялись типы деградации растительного покрова, которые также являются объектами проводимых биомониторинговых работ [12—13]. В данной статье большее внимание уделяется фитомониторингу. Он проводился параллельно с почвенным мониторингом, на близко расположенных площадках, поскольку на растения одновременно оказывают влияние газовая составляющая выбросов и загрязненная почва [9]. Прямое действие аэротехногенных аэрозоль на растения начинается с момента контакта и сорбции их наземными органами.

В статье использованы результаты исследований на Севере России, осуществлявшихся на протяжении последних лет, а также материалы, полученные в рамках работ по указанным ниже грантам РФФИ. Для выполнения задач исследований определялось содержание тяжелых металлов и ряда других поллютантов в почвах, растениях и других компонентах геосистем, проводился анализ особенностей использования биоиндикаторов как объекта изучения при оценке состояния природной среды и проведении мониторинговых исследований в районах с высокой степенью антропогенной нагрузки. Анализировались возможности применения классических [8; 14; 16; 17] и современных [15; 18—21] методов биоиндикации при геоэкологическом мониторинге. Основное внима-

ние уделялось биомониторингу с использованием методов фитоиндикации (на примере высших растений), лишеноиндикации (лишайников) и бриоиндикации (мхов). Это позволило оценить характер аккумуляции тяжелых металлов в высших растениях-мониторах, включая мхи, а также в лишайниках-мониторах.

В данном исследовании для оценки аэротехногенного загрязнения экосистем Севера России в основном применялись ландшафтно-географические методы и методы полевых исследований, сравнительно-описательный метод, методы математического анализа, картографический метод с применением ГИС-технологий.

Работы по экологическому мониторингу в районах Севера России велись по общепринятым методикам, включая полевые исследования с проведением ландшафтно-географических описаний, отбором образцов почв и растительности по катене.

Сбор образцов почв и растительности осуществлялся согласно следующим принципам [9; 11; 19—21]:

1. Точки закладывали в пределах водосборного бассейна, по катене — от элювиального ландшафта до субаквального и аквального.

2. Для репрезентативного сравнения данных исследования точки располагались в ландшафтах с аналогичными физико-географическими условиями (одного биотопа). Для сравнения концентраций тяжелых металлов в биоиндикаторах с непосредственно накопленными атмосферными выпадениями проводили дополнительный сбор образцов вблизи станций мониторинга атмосферных выпадений или на условно фоновых территориях.

3. Составляли комбинированные образцы в каждой точке сбора, состоящие из 5—10 образцов с площадки 50×50 м и представленные растениями разных видов.

4. Для возможности общей обработки данных каждая точка имела координаты, необходимым условием являлось обязательное составление ландшафтно-географических описаний.

5. Важное условие получения точных результатов — правильный отбор проб. Нами отобрано не менее трех образцов с каждой точки в зонах с различным уровнем загрязнения: одна точка отбиралась в районе с максимальным уровнем загрязнения и одна — с минимальным уровнем.

Для определения ответных реакций растений-мониторов на загрязнение и анализа концентраций загрязнителей были сопоставлены степени повреждения с известными концентрациями поллютантов в атмосферном воздухе, в ряде случаев растение использовалось как живой коллектор. В данном исследовании использовались мхи и лишайники. Для раздельного получения концентраций определенных токсикантов применялись растения-индикаторы, обладающие повышенной чувствительностью к одному или нескольким ингредиентам. Самыми перспективными из них являются мхи (*Sphagnum sp.*, *Hylocomium*

splendens, *Pleurozium schreberi*) и лишайники (*Cetraria sp.*, *Cladonia sp.*), которые были детально исследованы.

На заключительном этапе отобранные образцы обрабатывались в лабораториях географического факультета МГУ и Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН с целью определения в них валовых содержаний тяжелых металлов Fe, Cu, Ni, Co, Zn, Pb, Sr и др. методом атомной абсорбции на спектрофотометре Hitachi-180 (сухие растительные образцы помещали в специальные чашки и озоляли, также проводился расчет концентрации в сухом веществе почвы). С применением данных методов проведены количественные измерения загрязняющих веществ, появляющихся в тканях растений после воздействия, которые в дальнейшем были соотнесены со значениями этих концентраций в окружающей среде и подвергнуты статистической обработке.

В результате подсчетов коэффициентов концентрации загрязняющих веществ были составлены карты загрязнения тяжелыми металлами территорий изучаемых районов Севера России, с помощью которых была определена пространственная структура загрязнения.

Результаты исследований

В результате исследований выявлено, что атмосферный воздух ряда городов и промышленных районов Севера России испытывает значительные нагрузки разнообразных техногенных выбросов и насыщен веществами сложного химического состава. Было выявлено более 100 подобных горячих точек экологического напряжения, представленных на рис. 1. Их детальный анализ имеется в более ранних работах [3; 4; 6; 22]. Наибольшее количество горячих точек сконцентрировано в районах Европейского Севера России, в первую очередь в Мурманской и Архангельской областях, а также в районах добычи углеводородного сырья.

Биоиндикаторы играют ведущую роль в изучении распространения аэротехногенных поллютантов на огромных пространствах Севера Евразии. Использование отдельных видов мхов и лишайников, широко представленных на изучаемой территории и имеющих преимущественно атмосферное питание, показало, что на фоновых территориях концентрации тяжелых металлов в растениях-мониторах достаточно однообразны. Это позволило выделить фоновые концентрации, сходные для всех незагрязненных районов (табл. 1).

Было выявлено, что наиболее устойчивые виды растений-мониторов (например, *Sphagnum sp.*, *Cladonia sp.*) способны накапливать тяжелые металлы до уровня, превышающего фоновые значения более чем в 100 раз. Такие концентрации характерны для центральных частей импактных районов, например Норильска, Мончегорска, Воркуты, Никеля и пр. (табл. 2). Степень загрязненности территории оценивалась на основе классификации Б. И. Ко-

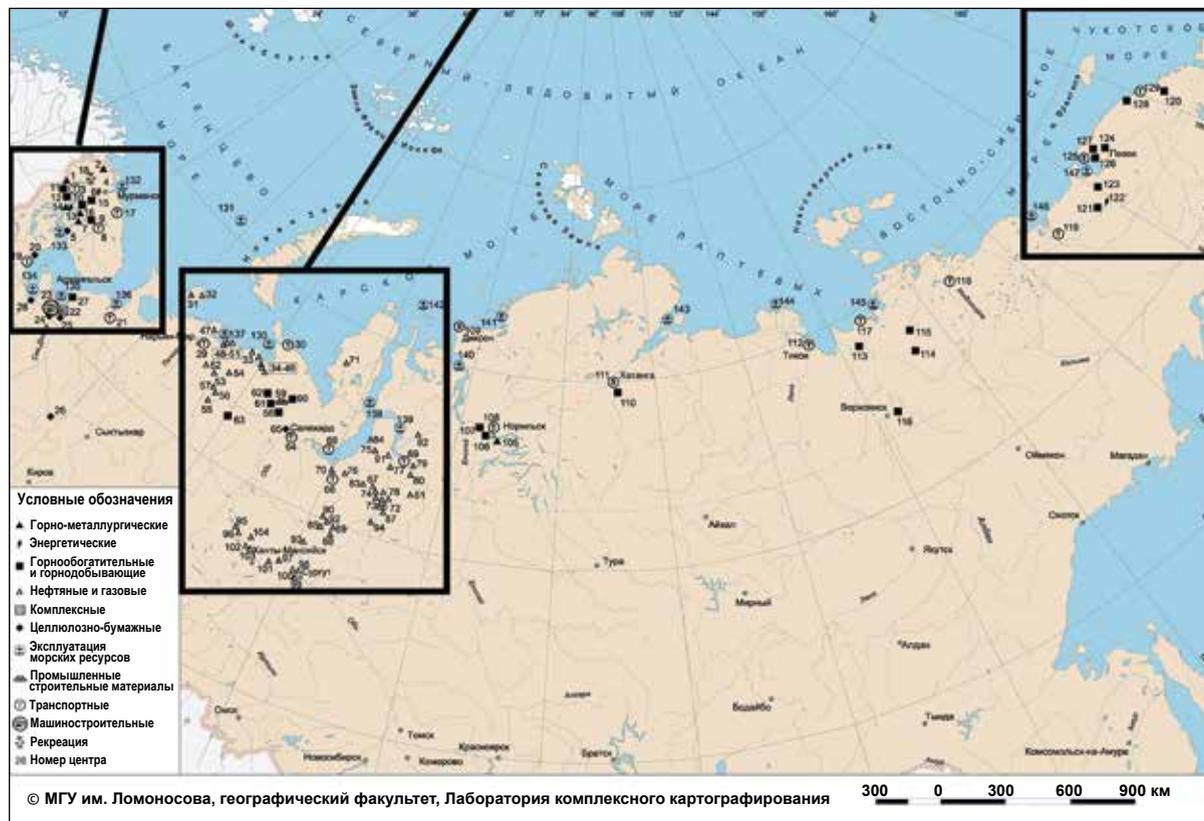


Рис. 1. Горячие точки экологического напряжения на Севере России (обозначены порядковым номером с указанием источника промышленной нагрузки)

Fig. 1. Environmental hot spots – the main areas of anthropogenic impact in the North of Russia (marked by a serial number, indicating the source of industrial impact)

чурова [23]. Характеристика изменения геосистем и подходы к ее выделению детально представлены в более ранних работах авторов [1—2; 5—7]. Оценка накопления тяжелых металлов сопоставлялась с данными по их фоновому содержанию в растениях. Коэффициенты местного накопления рассчитывались как отношение концентрации тяжелого металла в биомассе растений (лишайников/мхов) к его

фоновой концентрации в растениях. Рассчитанные коэффициенты накопления выявили эффективную аккумуляцию легкоподвижных тяжелых металлов стронция (эпигейные зеленые мхи), меди, марганца (эпифитные лишайники), а также малоподвижного цинка (в основном эпифитные лишайники). Ряд видов накапливает малоподвижный свинец и железо (все виды эпифитных лишайников, зеленых мхов).

Таблица 1. Типичное содержание ряда металлов в биоиндикаторах (мхах и лишайниках) в фоновых районах Севера России, мкг/г (воздушно-сухая масса)

Растение	Fe	Cu	Zn	Pb	Cd	Ni	Co	Sr
<i>Лишайники</i>								
<i>Nephroma sp.</i>	500,0	5,0	20,0	1,0	0,2	2,0	1,0	1,0
<i>Cladonia sp.</i>	150,0	1,5	15,0	2,0	0,2	1,0	0,2	0,4
<i>Cetraria sp.</i>	130,0	4,5	25,0	3,0	0,1	2,0	0,2	1,0
<i>Мхи</i>								
<i>Sphagnum sp.</i>	800,0	3,0	20,0	4,0	0,3	4,0	0,5	2,5
<i>Politrichum sp.</i>	200,0	10,0	30,0	4,0	0,15	5,0	1,0	2,0
<i>Pleurozium schreberi</i>	400,0	12,0	40,0	5,0	0,2	2,0	1,0	3,0

Таблица 2. Соотношение коэффициента местного накопления металлов (Fe, Cu, Ni, Co, Zn, Pb, Sr и др.) в исследуемых видах мхов и лишайников, а также степени измененности геосистем Севера России

Коэффициент местного накопления		Степень загрязненности территории	Изменение геосистем
по отдельным элементам	средний		
Более 100	Более 50	Высокая	Полная деградация (техногенная пустошь)
50—100	25—50	Повышенная	Прогрессирующее
25—50	10—25	Умеренная	Значительное
10—25	5—10	Пониженная	Начальное
2—10	2—5	Низкая	Практически неизменное (возможно накопление ряда металлов)
Менее 2	Менее 2	Фоновая	Неизменное (типичные геосистемы)

Механизм накопления элементов различными видами лишайников малоизучен. В связи с этим исследовалось анатомическое строение лишайников и определялось относительное содержание ряда элементов в различных частях их таллома. Выявлено, что для таких металлов, как Zn и Cu, характерно относительно равномерное распределение по морфологическим частям таллома всех исследованных видов лишайников.

В результате получилась картина распространения аэротехногенных поллютантов (тяжелых металлов) как в целом по региону, так и по отдельным районам. На основании коэффициента местного накопления и степени загрязненности территории были получены детальныe характеристики импактных районов и горячих точек экологического напряжения. Под импактным районом понимается участок в пределах территориально-промышленного комплекса, на котором в результате антропогенного воздействия произошли негативные изменения природной среды, приведшие к появлению и развитию острых экологических ситуаций. Следует отметить, что для импактных районов характерны сильные техногенные нарушения всех компонентов природной среды, пагубно сказывающиеся не только на нарушении природно-ресурсного потенциала, но и на здоровье местного населения. В итоге на основе данных бимониторинга аэротехногенного загрязнения были выделены пять основных очагов экологического напряжения — четыре на Европейском Севере России (Западно-Кольский, Центрально-Кольский, Архангельский и Воркутинский импактные районы), а также в районе Норильска. Анализ групп импактных районов показал, что химическое загрязнение обуславливает формирование импактных районов в центрах развития цветной металлургии (Норильске, Мончегорске, Заполярном), целлюлозно-бумажной промышленности, судостроения

и теплоэнергетики (Архангельске и Северодвинске), горнодобывающей промышленности (Воркуте). Распространение аэротехногенных поллютантов составляет десятки километров по направлению преобладающих ветров, что было установлено с помощью растений-мониторов. Комплексные химические и механические нарушения характерны для импактных районов горнодобывающей промышленности (Кировска, Талнаха, Депутатского). Механические нарушения преобладают в местах развития добычи золота и алмазов на севере Якутии. К потенциальным импактным районам относятся и зоны радиационного риска. Наиболее обширные импактные районы сформировались в результате химического загрязнения. Приоритетными поллютантами для исследуемых импактных районов являются: оксиды серы и азота, тяжелые металлы, нефтяные и полиароматические углеводороды, радионуклиды, твердые отходы, включая затопленную древесину. Экологическое состояние территории оценивается как кризисное и критическое согласно классификации Б. Б. Кочурова [23] (рис. 2).

По результатам исследований выделены различные стадии (зоны) изменения геосистем на Севере России — от зоны техногенной пустоши до зоны начальных изменений (рис. 3). Подобные зоны были выявлены в районах предприятий металлургии, расположенных в Норильске, Мончегорске и Заполярном. Их детальная характеристика представлена в более ранних работах авторов [5; 9].

В качестве примера можно привести результаты исследований, проведенных на Кольском полуострове (табл. 3). Характерно резкое различие в содержаниях металлов в исследуемых пробах мхов и лишайников вблизи промышленных предприятий и на фоновых территориях. Мхи и лишайники характеризуются низкой зольностью — 2,69. В импактной зоне вблизи Мончегорска содер-



а



б



в



г



д



е

Рис. 2. Основные промышленные центры Севера России – важнейшие горячие точки экологического напряжения: *а* – Норильск, *б* – Мончегорск, *в* – Воркута, *г* – Заполярный, *д* – Кировск, *е* – Архангельск

Fig. 2. The main industrial centers in the North of Russia – the most important hotspots of environmental stress: *a* – Norilsk, *б* – Monchegorsk, *в* – Vorkuta, *г* – Zapolyarny, *д* – Kirovsk, *е* – Arkhangelsk



Рис. 3. Зоны изменения геосистем на Севере России по данным биомониторинга
 Fig. 3. Zones of changes in geosystems in the North of Russia according to biomonitoring data

Таблица 3. Центральная часть Кольского полуострова (Мончегорский район). Оценки основных статистик случайных величин содержания тяжелых металлов в лишайниках *Cetraria sp.* и *Cladonia sp.*

№	Имя переменной	Среднее	Стандарт	Асимметрия	Экссесс	Коэффициент вариации	Гармонические		Минимум	Максимум	Количество
							Среднее	Стандарт			
1	Zol *	2,61	2,47	6,06	45,77	0,94	1,92	2,57	0,56	22,90	94
2	Cu	58,89	115,89	2,73	7,32	1,97	6,32	127,38	1,01	500,40	94
3	Zn	28,39	47,29	8,74	78,52	1,67	20,02	48,04	8,20	469,70	94
4	Fe	368,16	515,54	2,38	5,20	1,40	122,26	571,74	21,65	2466,60	94
5	Mn	115,64	747,78	9,41	86,65	6,47	18,39	754,15	3,40	7241,80	93
6	Pb	5,42	7,06	6,17	45,95	1,30	1,72	7,99	0,10	63,00	93
7	Cd	0,13	0,13	3,25	12,97	1,05	0,06	0,15	0,01	0,90	94
8	Ni	23,27	58,91	4,45	21,74	2,53	2,59	62,47	0,30	405,10	94
9	Co	1,25	2,56	3,65	14,87	2,04	0,20	2,77	0,07	16,50	94
10	Cr	0,75	0,68	2,59	7,92	0,91	0,41	0,76	0,08	4,10	94
11	Sr	5,76	13,54	6,88	54,01	2,35	0,51	14,53	0,01	120,98	94
12	Li	0,34	0,95	8,24	71,76	2,82	0,11	0,98	0,01	9,05	94

* Общая зольность.

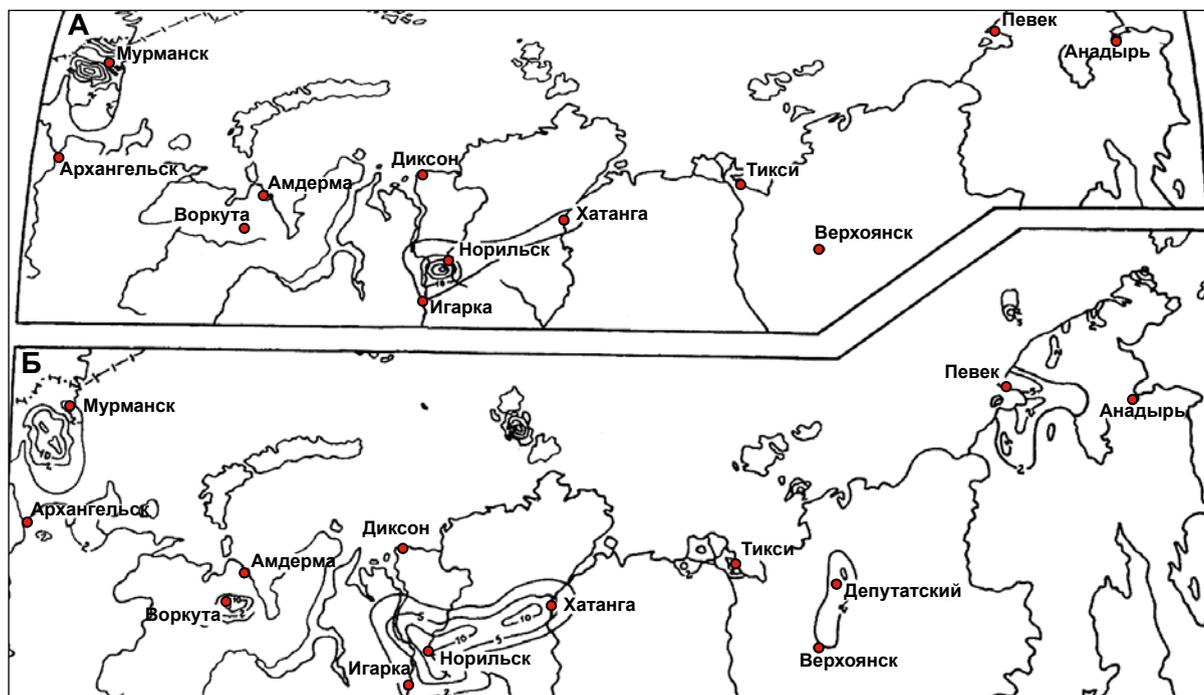


Рис. 4. Фрагмент карты распределения коэффициентов накопления меди (А) и стронция (Б) в растениях-индикаторах (мхах и лишайниках) на Севере России – ареалы показывают кратность превышения концентраций над фоновыми значениями
 Fig. 4. A fragment of the distribution map of the accumulation coefficients of copper (A) and strontium (B) in bio-indicators (mosses and lichens) in the North of Russia – areas show the multiplicity of excess concentrations above background values

жание меди в лишайнике *Cladonia sp.* достигает 169,6 мг/кг сухого вещества, никеля — 95,5 мг/кг, свинца — 8,8 мг/кг.

В результате был составлен ряд карт, представляющих собой картографическое обеспечение мониторинговых исследований районов интенсивного загрязнения. Фрагмент одной из них представлен на рис. 4, где показано распределение коэффициентов накопления меди и стронция как приоритетных аэротехногенных поллютантов российской Арктики. Таким образом, биоиндикаторы позволяют составить пространственную картину накопления поллютантов как в целом по региону, так и на его отдельных территориях.

Заключение

Проведенные исследования подтверждают важную роль методов биоиндикации при мониторинге состояния геосистем. Фитоиндикаторы, рассмотренные в данной работе, дают возможность составить пространственную картину распространения и накопления важнейших поллютантов. В частности, это отражено в составленной нами серии карт загрязнения отдельными тяжелыми металлами как в целом по региону, так и на отдельных территориях. Полученные с помощью фитоиндикации научные результаты полевых исследований позволяют дополнить информацию об источниках поступления аэротехногенных поллютантов, закономерностях их пространственно-го распределения и могут послужить основанием для

разработки стратегии развития природопользования в регионе. Более того, результаты подобных исследований необходимы для определения направления и содержания специальных реабилитационных мероприятий по снижению опасных уровней загрязнения природной среды и восстановлению нормального функционирования геосистем.

Исследования выполнены в рамках работы по проектам РФФИ «Выявление и картографирование потенциальных конфликтов природопользования при перспективном хозяйственном освоении Арктической зоны Российской Федерации» (№ 18-05-00335) и «Математико-картографическая оценка медико-экологической ситуации в городах Европейской территории России для их комплексной экологической характеристики (РФФИ)» (№ 18-05-00236).

Литература

1. Душкова Д. О., Евсеев А. В. Современное природопользование в российской Арктике и устойчивое развитие геосистем циркумполярных территорий // Проблемы регион. экологии. — 2012. — № 1. — С. 216—220.
2. Евсеев А. В., Красовская Т. М. Стратегия экономического развития арктического региона России: проблема формирования экологического каркаса // Проблемы регион. экологии. — 2015. — № 1. — С. 95—98.

3. Gordeev V. V., Danilov A. A., Evseev A. V. et al. Diagnostic analysis of the environmental status of the Russian Arctic // *Advanced Summary. Global environmental facility* / B. Morgunov (ed.); UN Environmental programme, NPA Arctic project. — [S. l.], 2011. — 171 p.
4. Krasovskaya T. M., Yevseev A. V., Solntzeva N. P. Environmental Hot-Spots and Impact Zones of the Russian Arctic: ACOPS-Report, 2009. — URL: <http://www.acops.org>.
5. Душкова Д. О., Евсеев А. В. Экология и здоровье человека: региональные исследования на европейском Севере России. — М.: Геогр. фак. МГУ, 2011. — 192 с.
6. Красовская Т. М., Евсеев А. В. Закономерности формирования импактных зон в Арктике и Субарктике России // *География и природные ресурсы*. — 1997. — № 4. — С. 19—24.
7. Красовская Т. М., Евсеев А. В. Экологический каркас Севера России // *Проблемы региональной экологии*. — 2014. — № 1. — С. 8—11.
8. Manning W. J., Feder W. A. Biomonitoring of air pollutants with plants. — London: Applied science publ. Ltd., 1985. — 143 p.
9. Евсеев А. В. Геоэкологический мониторинг. — М.: Геогр. фак. МГУ, 2010. — 124 с.
10. Горецкая А. Г. Биоиндикация // *Региональная физическая география в новом столетии*. — Вып. 7. — Минск: БГУ-БГПУ, 2013. — С. 245—250.
11. Горецкая А. Г., Евсеев А. В. Биоиндикационные аспекты в учебных курсах // *Экология речных бассейнов: Труды 8-й Междунар. науч.-практ. конф. / Под общ. ред. проф. Т. А. Трифионовой*. — [Б. м.], 2016. — С. 419—423.
12. Мелехова О. П., Егорова Е. И., Евсеева Т. И. и др. Биологический контроль окружающей среды: биоиндикация и биотестирование: Учебное пособие для студентов высших учебных заведений / Под ред. О. П. Мелеховой и Е. И. Егоровой. — М.: Изд. центр «Академия», 2007. — 288 с.
13. Душкова Д. О., Горецкая А. Г., Евсеев А. В. Применение биоиндикационных методов при проведении мониторинговых исследований окружающей среды // *Проблемы региональной экологии*. — 2017. — № 2. — С. 10—15.
14. Герасимов И. П. Научные основы современного мониторинга окружающей среды // *Изв. АН СССР. Сер. географ.* — 1975. — № 3. — С. 13—25.
15. Zakrzewska M., Sawicka-Kapusta K., Szarek J. et al. Bioindication of the Environment Contamination by Heavy Metals // *Contemporary problems of Management and environmental protection*. — 2010. — Vol. 5. — P. 107—120.
16. Биоиндикация загрязнений наземных экосистем / Под ред. Р. Шуберта; Пер. с нем. — М.: Мир, 1988. — 350 с.
17. Израэль Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды. — М.: Гидрометеоздат, 1984. — 560 с.
18. Burger J. Bioindicators: Types, Development, and Use in Ecological Assessment and Research // *Environmental Bioindicators*. — 2006. — Vol. 1. — P. 22—39.
19. Markert B. From biomonitoring to integrated observation of the environment — the multi-markered bioindication concept // *Ecological Chemistry and Engineering*. — 2008. — Vol. 15 (3). — P. 315—330.
20. Monitoring of atmospheric heavy metal and nitrogen deposition in Europe using bryophytes / United Nations economic commission for Europe convention on long-range transboundary air pollution. Monitoring manual. — Gwynedd, United Kingdom, 2010. — 98 p.
21. Will-Wolf S., Scheidegger C., McCune B. Methods for monitoring biodiversity and ecosystem function // *Monitoring with lichens — monitoring lichens* / P. L. Nimis, C. Scheidegger, P. A. Wolseley (eds.); NATO Science Series. IV. Earth and Environmental Sciences, 7. — Dordrecht: The Netherlands: Kluwer Academic Publ., 2002. — 408 p.
22. Красовская Т. М., Евсеев А. В. Горячие точки Российской Арктики // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География*. — 2010. — № 5. — С. 48—55.
23. Кочуров Б. И. Экодиагностика и сбалансированное развитие: Учебное пособие. — Москва; Смоленск: Маджента, 2003. — 384 с.

Информация об авторах

Евсеев Александр Васильевич, доктор географических наук, ведущий научный сотрудник, профессор, географический факультет, МГУ им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1), e-mail: avevseev@yandex.ru.

Душкова Диана Олеговна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт географии, Берлинский университет им. Гумбольдтов (10099, Германия, Берлин, Унтер ден Линден, 6), e-mail: kodiana@mail.ru.

Горецкая Александра Григорьевна, преподаватель, географический факультет, МГУ им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1), e-mail: aggoretskaya@ya.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Евсеев А. В., Душкова Д. О., Горецкая А. Г. Биомониторинг аэротехногенного загрязнения экосистем Севера России тяжелыми металлами // *Арктика: экология и экономика*. — 2020. — № 3 (39). — С. 23—33. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-23-33.

BIOMONITORING OF AEROTECHNOGENIC CONTAMINATION OF ECOSYSTEMS IN THE NORTH OF RUSSIA BY HEAVY METALS

Evseev A. V.

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography (Moscow, Russian Federation)

Dushkova D. O.

Humboldt University Berlin, Department of Geography (Berlin, Federal Republic of Germany)

Goretskaya A. G.

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography (Moscow, Russian Federation)

The article was received on December 27, 2019

Abstract

The paper presents the study results on the assessment of the state and changes in the environment properties under the conditions of aerotechnogenic impact using biomonitoring. The authors outline the importance of biomonitoring as an essential component of a comprehensive system for the environment quality monitoring and assessment. The researchers have analyzed the distribution features of technogenic pollutants, especially heavy metals, in the ecosystems of the Russian North. They have estimated the levels of pollutant accumulation in monitor plants using phytoindication methods that allow assessing the nature of migration and accumulation of pollutants in higher plants, including mosses, and in lower ones (lichens). The authors have analyzed the basic prerequisites for using plants as an object of study in the geoecological assessment of the environment, including monitoring studies.

Keywords: *biomonitoring, aerotechnogenic contamination, heavy metals, ecosystems, North of Russia.*

The studies were carried out as part of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) projects "Identification and mapping of potential environmental management conflicts in the prospective economic development of the Russian Arctic zone" (No. 18-05-00335) and "Mathematical and cartographic assessment of the medical and environmental situation in cities of the European territory of Russia for their integrated environmental characteristics (RFBR)" (No. 18-05-00236).

References

1. Dushkova D. O., Evseev A. V. *Sovremennoe prirodopol'zovanie v rossiiskoi Arktike i ustoychivoe razvitiye geosistem tsirkumpolyarnykh territorii*. [Modern nature use in Russian Arctic and sustainable development of circumpolar geosystems]. *Problemy region. ekologii*, 2012, no. 1, pp. 216—220. (In Russian).
2. Evseev A. V., Krasovskaya T. M. *Strategiya ekonomicheskogo razvitiya arkticheskogo regiona Rossii: problema formirovaniya ekologicheskogo karkasa*. [Economic development strategy of the Russian Arctic Zone: the issue of ecological buffer territories creation]. *Problemy region. ekologii*, 2015, no. 1, pp. 95—98. (In Russian).
3. Gordeev V. V., Danilov A. A., Evseev A. V., Kochemasov Ju. V., Moiseenko T. V. *et al.* *Diagnostic analysis of the environmental status of the Russian Arctic*. *Advanced Summary. Global environmental facility. B. Morgunov (ed.); UN Environmental programme, NPA Arctic project*. [S. l.], 2011, 171 p.
4. Krasovskaya T. M., Yevseev A. V., Solntzeva N. P. *Environmental Hot-Spots and Impact Zones of the Russian Arctic: ACOPS-Report*, 2009. Available at: <http://www.acops.org>.
5. Dushkova D. O., Evseev A. V. *Ekologiya i zdorov'e cheloveka: regional'nye issledovaniya na evropeiskom Severe Rossii*. [Environment and human health: regional research at the European North of Russia]. Moscow, Geogr. fak. MGU, 2011, 192 p. (In Russian).
6. Krasovskaya T. M., Evseev A. V. *Zakonomernosti formirovaniya impaktnykh zon v Arktike i Subarktike Rossii*. [Patterns of impact zones formation in the Russian Arctic and Subarctic]. *Geografiya i prirod. resursy*, 1997, no. 4, pp. 19—24. (In Russian).
7. Krasovskaya T. M., Evseev A. V. *Ekologicheskii karkas Severa Rossii*. [Nature buffer zone of the Russian North]. *Problemy region. ekologii*, 2014, no. 1, pp. 8—11. (In Russian).
8. Manning W. J., Feder W. A. *Biomonitoring of air pollutants with plants*. London, Applied science publ. ltd., 1985, 143 p.
9. Evseev A. V. *Geoekologicheskii monitoring*. [Environmental monitoring]. Moscow, Geogr. fak. MGU, 2010, 124 p. (In Russian).
10. Goretskaya A. G. *Bioindikatsiya*. [Bioindication]. *Regional'naya fizicheskaya geografiya v novom stoletii*. Iss. 7. Minsk, BGU-BGPU, 2013, pp. 245—250. (In Russian).
11. Goretskaya A. G., Evseev A. V. *Bioindikatsionnye aspekty v uchebnykh kursakh*. [Bioindication aspects in training courses]. *Ekologiya rechnykh basseinov: Trudy*

- 8-i Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Pod obshch. red. prof. T. A. Trifonovoi. [S. I.], 2016, pp. 419—423. (In Russian).
12. Melekhova O. P., Egorova E. I., Evseeva T. I. et al. Biologicheskii kontrol' okruzhayushchei sredy: bioindikatsiya i biotestirovanie: Uchebnoe posobie dlya studentov vysshizh uchebnykh zavedenii. [Biocontrol of environment: Bioindication and biotesting]. Pod red. O. P. Melekhovoi i E. I. Egorovoi. Moscow, Izd. tsentr "Akademiy", 2007, 288 p. (In Russian).
13. Dushkova D. O., Goretskaya A. G., Evseev A. V. Primenenie bioindikatsionnykh metodov pri provedenii monitoringovykh issledovaniy okruzhayushchei sredy. [The use of bioindication methods for environmental monitoring]. Problemy region. ekologii, 2017, no. 2, pp. 10—15. (In Russian).
14. Gerasimov I. P. Nauchnye osnovy sovremennogo monitoringa okruzhayushchei sredy. [Scientific basis for modern environmental monitoring]. Izv. AN SSSR. Ser. geograf., 1975, no. 3, pp. 13—25. (In Russian).
15. Zakrzewska M., Sawicka-Kapusta K., Szarek J. et al. Bioindication of the Environment Contamination by Heavy Metals. Contemporary problems of Management and environmental protection, 2010, vol. 5, pp. 107—120.
16. Bioindikatsiya zagryaznenii nazemnykh ekosistem. [Bioindication of terrestrial ecosystems contamination]. Pod red. R. Shuberta; Per. s nem. Moscow, Mir, 1988, 350 p. (In Russian).
17. Izrael' Yu. A. Ekologiya i kontrol' sostoyaniya prirodnoi sredy. [Ecology and control of natural environment]. Moscow, Gidrometeoizdat, 1984, 560 p. (In Russian).
18. Burger J. Bioindicators: Types, Development, and Use in Ecological Assessment and Research. Environmental Bioindicators, 2006, vol. 1, pp. 22—39.
19. Markert B. From biomonitoring to integrated observation of the environment — the multi-markered bioindication concept. Ecological Chemistry and Engineering, 2008, vol. 15 (3), pp. 315—330.
20. Monitoring of atmospheric heavy metal and nitrogen deposition in Europe using bryophytes. United Nations economic commission for Europe convention on long-range transboundary air pollution. Monitoring manual. Gwynedd, United Kingdom, 2010, 98 p.
21. Will-Wolf S., Scheidegger C., McCune B. Methods for monitoring biodiversity and ecosystem function. Monitoring with lichens — monitoring lichens. P. L. Nimis, C. Scheidegger, P. A. Wolseley (eds.); NATO Science Series. IV. Earth and Environmental Sciences, 7. Dordrecht: The Netherlands: Kluwer Academic Publ., 2002, 408 p.
22. Krasovskaya T. M., Evseev A. V. Goryachie tochki Rossiiskoi Arktiki. [Environmental hot-spots in the Russian Arctic]. Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya, 2010, no. 5, pp. 48—55. (In Russian).
23. Kochurov B. I. Ekodiagnostika i sbalansirovannoe razvitie: Uchebnoe posobie. [Ecodiagnosics and balanced development: Manual]. Moscow; Smolensk: Madzhenta, 2003, 384 p. (In Russian).

Information about the authors

Evseev Aleksandr Vasil'evich, Doctor of Geography, Leading Researcher, Professor, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskiye gory, Moscow, Russia, 119991), e-mail: avevseev@yandex.ru.

Dushkova Diana Olegovna, PhD of Geography, Senior Researcher, Department of Geography, Humboldt University Berlin (6, Unter den Linden, Berlin, Germany, 10099), e-mail: kodiana@mail.ru.

Goretskaya Aleksandra Grigor'evna, Lecturer, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskiye gory, Moscow, Russia, 119991), e-mail: aggoretskaya@ya.ru.

Bibliographic description of the article

Evseev A. V., Dushkova D. O., Goretskaya A. G. Biomonitoring of aerotechnogenic contamination of ecosystems in the North of Russia by heavy metals. Arctic: Ecology and Economy, 2020, no. 3 (39), pp. 23—33. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-23-33. (In Russian).

© Evseev A. V., Dushkova D. O., Goretskaya A. G., 2020