



ОПРЕДЕЛЕНИЕ И АНАЛИЗ ПРИРОДНОГО И АНТРОПОГЕННОГО ГЕОХИМИЧЕСКОГО ФОНА ДЛЯ МЕТОДА МХОВ-БИОМОНИТОРОВ

Н.С. Рогова, Н.К. Рыжакова, А.Л. Борисенко

**Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Национальный исследовательский Томский государственный университет**

Проведено исследование содержания химических элементов в эпифитном мхе *Pylaisia polyantha* (Hedw.) V. S. G. Образцы мха отобраны на 6 фоновых территориях Западно-Сибирского региона, а также на территории г. Томска. Содержание химических элементов определено с помощью нейтронно-активационного анализа. Проведена проверка гипотезы о нормальном/логнормальном распределении концентраций химических элементов с помощью критерия χ^2 , для выборок меньше 20 использовали показатели асимметрии и эксцесса. При подтверждении гипотезы фоновые концентрации химических элементов определены как средние значения $\pm 2\sigma$. Концентрации каждой фоновой территории подчиняются нормальному закону распределения. Для подавляющего числа элементов антропогенный фон г. Томска превышает природный в два раза и более.

Ключевые слова: мох-биоиндикатор, геохимический фон, загрязнение атмосферы, НАА, тяжелые металлы, фоновые концентрации

Definition and Analysis of Natural and Anthropogenic Geochemical Background for the Moss-Biomonitoring Method

N.S. Rogova, N.K. Ryzhakova, A.L. Borisenko

**National Research Tomsk Polytechnic University, 634050 Tomsk, Russia,
National Research Tomsk State University, 634050 Tomsk, Russia**

A study was conducted on the content of chemical elements in the epiphytic moss of *Pylaisia polyantha* (Hedw.) V.S.G. The moss samples were taken from 6 background areas of the West Siberian region, as well as in the city of Tomsk. The content of chemical elements is determined using neutron activation analysis. The hypothesis about the normal/log-normal distribution of the concentrations of chemical elements was tested using the χ^2 criterion; asymmetry and kurtosis were used for samples less than 20. When the hypothesis is confirmed, the background concentrations of chemical elements are defined as mean values $\pm 2\sigma$. The concentrations of each background area are subject to the normal distribution law. For the overwhelming number of elements, the anthropogenic background of the city of Tomsk is 2 times or more natural.

Key words: moss bio indicator, geochemical background, air pollution, NAA, heavy metals, background concentrations

DOI: 10.18412/1816-0395-2019-06-58-63

Эффективным методом контроля содержания тяжелых металлов в атмосферном воздухе является метод мхов-биоиндикаторов [1]. Мхи способны получать питательные вещества из влажного и сухого осадочного слоя, обладают высокой аккумуляционной способностью и большой поверхностью, широко распространены, обычно растут группами, обладают продолжительным жизненным циклом (от 1 года до 15 лет) и выживают в сильно загрязнённой окружающей среде.

Их часто используют в качестве биоиндикаторов не только из-за морфологических и физиологических свойств, но также из-за экономических преимуществ — это наиболее дешёвые и простейшие индикаторы для контроля концентрации тяжелых металлов в атмосфере.

В странах Европы результаты исследования мхов широко используются при изучении пространственных и временных тенденций в накоплении тяжелых металлов на обширных территориях, а также при изучении

трансграничного переноса [2]. Следует отметить, что при проведении экологических исследований особый интерес представляет оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха урбанизированных территорий. В этом случае возникает необходимость определения фоновых концентраций химических элементов в мхах-индикаторах [3, 4].

Термин "геохимический фон" определяет естественный диапазон концентраций элементов для данной среды, не подверженной антропогенной деятельности.

Однако при оценке вклада крупных предприятий в загрязнение атмосферного воздуха урбанизированных территорий имеет смысл использовать понятие антропогенного фона [5], учитывающего наряду с природным содержанием химических элементов вклад множества поверхностных источников (например, транспорта, пыли и т.д.) и удаленных крупных источников загрязнения. Очевидно, сравнение антропогенного геохимического фона с природным фоном позволит оценить средний уровень загрязнения атмосферного воздуха урбанизированной территории.

Для оценки как природного (для чистых территорий), так и антропогенного (для урбанизированных территорий) геохимического фона наиболее перспективным является подход, основанный на использовании статистических методов. В пределах однородной по своим природно-климатическим характеристикам территории пробоотбора концентрации элементов, имеющие природное происхождение, а также обусловленные действием множества источников, подчиняются нормальному или логнормальному распределению. В таком случае как природный, так и антропогенный геохимический фон можно определить как среднее значение $\pm 2\sigma$. В работе [6] такой метод продемонстрирован для наземных мхов *Hylocomium splendens* и *Pleurozium schreberi* при оценке вклада природных и антропогенных компонент в содержание тяжелых металлов.

Необходимо подчеркнуть, что широко используемые в европейских исследованиях лесные напочвенные мхи не позволяют определить антропогенный геохимический фон большой городской территории. В данном исследовании в качестве биоиндикатора загрязнения выбран эпифитный мох *Pylaisia polyantha* (Hedw.) B. S. G. Этот мох растет на коре осин, тополей, берез, поэтому может быть отобран на обширных урбанизированных территориях. Кроме того, этот мох обладает высокими аккумуляционными способностями по сравнению с другими видами мхов, используемыми при био-

мониторинге [7]. Цель данной работы — оценка природного и антропогенного геохимического фона с помощью статистических методов обработки результатов измерений содержания химических элементов в пробах мха *Pylaisia polyantha*, отобранного на разных территориях Западно-сибирского региона (рис. 1).

Материалы и методики исследования

Пробы для оценки природного геохимического фона в 2010 г. брали на шести удаленных от промышленных центров территориях следующим образом:

- 10 образцов — Нижневартовский район Ханты-Мансийского АО (ХМАО), окрестности п. Ваховск, средняя тайга (с коры осины в смешанном полидоминантном лесу);
- 30 образцов — Александровский район Томской области, среднее течение р. Трайгородская, средняя тайга (с коры осины в смешанном полидоминантном лесу);
- 15 образцов — северо-запад Кargasокского района Томской области, окрестности вахтового п. Пионерный, средняя тайга (с коры осины в смешанном мелкотравном лесу);
- 7 образцов — юг Кargasокского района Томской области, истоки р. Васюган, южная тайга (с коры тополя в разнотравном лесу);
- 15 образцов — Кожевниковский район Томской области, окрестности п. Киреевск, расположенного на расстоянии 60 км от г. Томска, южная тайга (с коры тополя в полидоминантном лесу);
- 10 образцов — Онгудайский район Республики Алтай, окрестности д. Хабаровка, вдоль р. Мал. Ильгумень, таежный пояс Горного Алтая (с коры тополя в пойменных зарослях).

Оценка геохимического фона урбанизированной территории проведена для химических элементов во мхах, отобранных в г. Томске в 2011 г. (рис. 2). Всего отобрано 99 проб эпифитного мха *Pylaisia polyantha*.

Для сопоставимости и достоверности получаемых результатов пробоотбор проводили в сухую погоду с коры старых тополей и осин на высоте 1,5–2 м над уровнем почвы. Собранный мох упа-

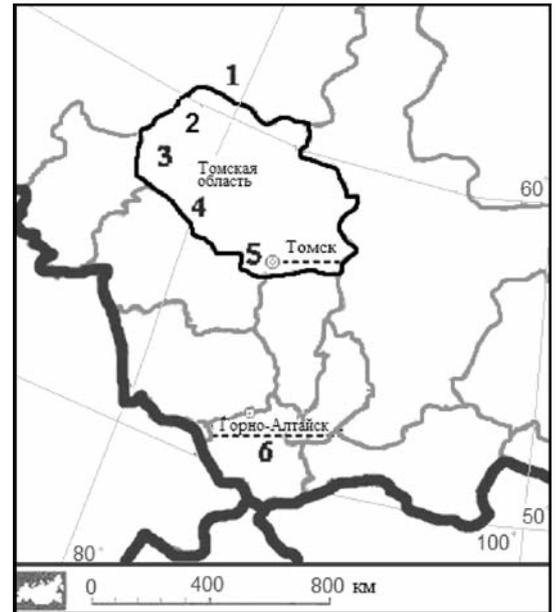


Рис. 1. Территории (1–6) отбора фоновых образцов мха *Pylaisia polyantha*

Fig. 1. Territories (1–6) of background moss sampling of *Pylaisia polyantha*

ковывали в бумажные конверты. Сразу же после отбора образцы мха предварительно очищали в лабораторных условиях от различных примесей (насекомых, семян растений, почечных чешуек и т.п.) и помещали в бумажные конверты, в которых и хранили до начала анализа.

Содержание химических элементов в пробах мха определено

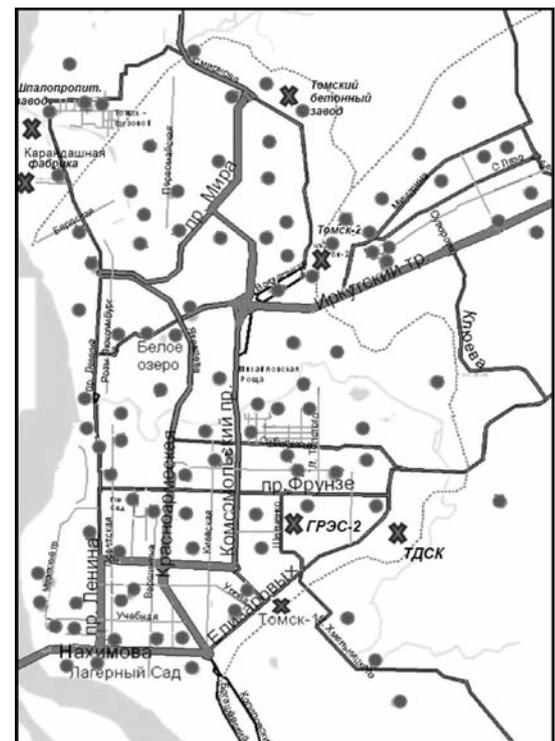


Рис. 2. Точки отбора проб мхов в г. Томске

Fig. 2. Moss sampling points in Tomsk

Таблица 1. Средние значения концентраций элементов во мхах, отобранных в одной растительной зоне в условиях одинакового фитоценоза, мкг/г
Table 1. The average values of the concentrations of elements in mosses selected in the same plant zone under the conditions of the same phytocenosis, mcg/g

Элемент	Южная тайга			Средняя тайга с учетом фитоценоза		
	\bar{C}	σ	$\bar{C}\pm 2\sigma$	\bar{C}	σ	$\bar{C}\pm 2\sigma$
Ba	210	57	324	—	—	—
Br	—	—	—	13,5	3,1	19,7
Ca	—	—	—	13760	2890	19540
Cr	7,9	3,2	14,3	5,6	1,3	8,2
Fe	2480	1780	6040	920	184	1288
Lu	0,029	0,019	0,067	0,010	0,003	0,016
Na	595	150	895	—	—	—
Sb	0,18	0,02	0,22	0,23	0,07	0,37
Sr	34,7	21,7	78,3	—	—	—
Tb	0,045	0,027	0,099	0,014	0,004	0,022
Yb	0,122	0,083	0,288	0,064	0,026	0,116
Zn	247	39	325	—	—	—

Примечание. — — не подчиняются нормальному/логнормальному распределению; \bar{C} — средняя концентрация; σ — среднеквадратичное отклонение; $\bar{C}\pm 2\sigma$ — верхняя граница природного геохимического фона.

с помощью нейтронно-активационного анализа (НАА) на исследовательском реакторе ИРТ-Т ТПУ, г. Томск РФ. Пробоподготовку для НАА начинали с промывки образцов дистиллированной водой. Лёгкое промывание образцов водой в течение нескольких секунд позволяет увеличить достоверность определения концентраций микроэлементов в исследуемом мхе, так как при этом смываются грубые и тяжёлые минеральные частицы; в соответствии с рекомендациями работы [2] в качестве объекта анализа использовали верхнюю зелёную часть мха. Далее образцы мха высушивали при температуре 80–100 °С до постоянной массы, а затем путем пе-

ремешивания и тщательного пектирования в фарфоровых ступках подвергали процессу гомогенизации. После гомогенизации из порошка каждой пробы пресовали гранулы в виде таблеток массой 0,15–0,45 г и диаметром 1 см.

Для определения содержания элементов по долгоживущим изотопам подготовленные образцы облучали в потоке тепловых нейтронов плотностью $5,5 \cdot 10^{13}$ нейтрон/см²·с в течение 3–5 ч. После окончания облучения пробы выдерживали в течение 5–7 дней.

Активность каждой анализируемой пробы измеряли с помощью гамма-спектрометра на базе особо чистого германия и спек-

трометрической системы Genie 2000 (Canberra, USA). Содержание 27 элементов рассчитывали путем сравнения интенсивности гамма-линий аналитических радионуклидов с интенсивностью соответствующих линий стандартов МАГАТЭ: FFA (Fine Fly Ash) — пыль летучая; V-10 (HAV) — сено; СБМП-02 — зерна пшеницы; ЛБ-1 — лист березы и ТАБАК-5 массой 150–200 мг.

При математической обработке результатов для г. Томска (99 проб) в соответствии с рекомендациями Манна и Вальда диапазон концентраций химических элементов разбивали на 18 интервалов и строили гистограммы. Проверку гипотезы о нормальном и логнормальном распределении осуществляли с помощью критерия χ^2 . Для чистых территорий, где выборки меньше 20, использованы показатели асимметрии и эксцесса. Статистическая обработка полученных данных выполнена в программе Excel из пакета Microsoft Office 2013.

Результаты исследования и обсуждение

Хорошо известно, что на концентрацию какого-либо химического элемента наиболее существенное влияние оказывает аккумуляционная способность мха по отношению к данному элементу [7]. Процессы аккумуляции химических элементов являются очень сложными и малоизученными. Однако можно с уверенностью утверждать, что протекание этих процессов зависит не только от морфологических и физиологических особенностей мхов. Большое влияние оказывают также природно-климатические условия обитания: геологические особенности и температурный режим территории, количество осадков, роза ветров, рельеф участка и характер растительности на участке пробоотбора, загушенность (сомкнутость) крон деревьев. Кроме вышеперечисленных факторов содержание химических элементов во мхах зависит от глобального и регионального фона, а также от наличия внешних источников. Очевидно, при отсутствии доминирующего влияния распределение концентраций будет подчиняться нормальному/

Таблица 2. Средние значения концентраций элементов во мхах, отобранных на различных фоновых территориях, мкг/г

Table 2. Average values of concentrations of elements in mosses, selected in different background areas, mcg /g

Элемент	Номер территории (см. рис. 1)					
	1	2	3	4	5	6
Ba	975/100	350/80	480/120	133/22	245/17	75/9,5
Br	18/2,4	12/1,4	10/1,5	9,1/0,9	11/1,7	3,8/0,3
Ca	18000/1040	12400/1600	17600/1270	22000/760	10700/1860	11100/740
Cr	4,7/0,5	5,9/1,3	13/2,9	12/1,7	6,1/1,6	13/1,7
Fe	805/110	958/184	3220/877	4600/715	1465/535	4270/345
Lu	0,010/0,005	0,009/0,002	0,040/0,015	0,053/0,009	0,018/0,008	0,050/0,007
Na	2050/870	280/28	2540/260	640/130	570/150	2440/140
Sb	0,18/0,02	0,18/0,02	0,36/0,07	0,24/0,03	0,22/0,08	0,32/0,08
Sr	56/2,3	33/12	47/11	11/1,3	46/16	17/7,2
Tb	0,01/0,002	0,02/0,003	0,06/0,02	0,08/0,01	0,03/0,01	0,06/0,01
Yb	0,05/0,03	0,06/0,02	0,22/0,08	0,11/0,08	0,13/0,05	0,35/0,08
Zn	554/115	206/23	244/12	205/28	266/24	140/14

Примечание. Числитель \bar{C} ; знаменатель — σ .

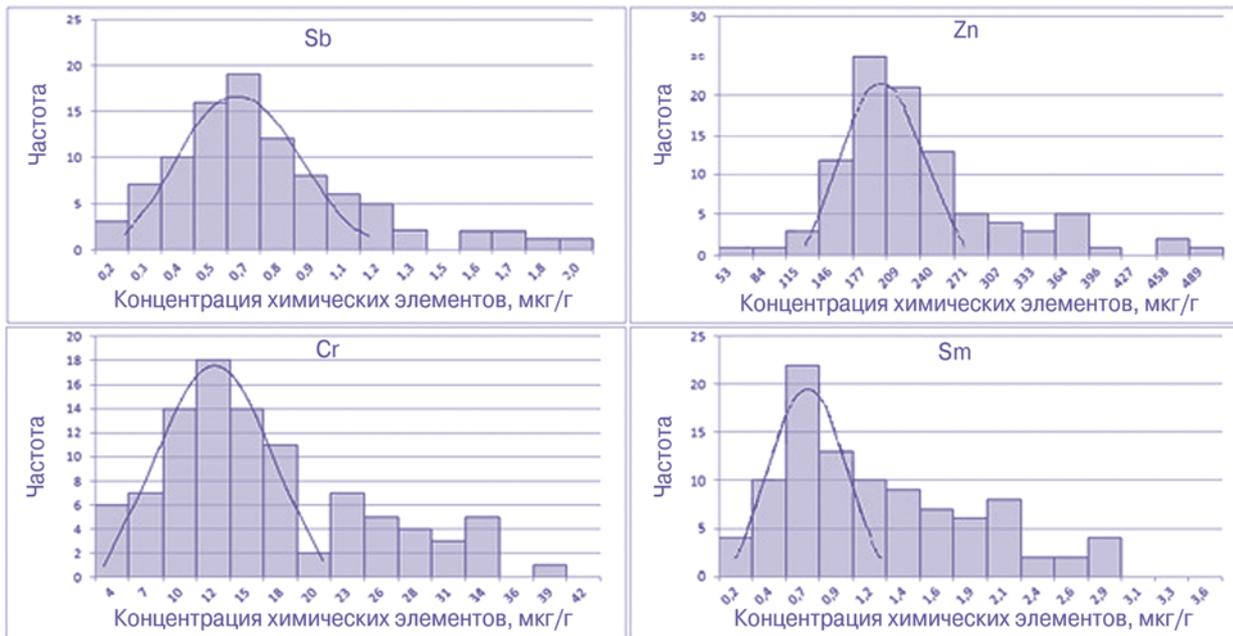


Рис. 3. Распределение частот концентраций и рассчитанные нормальные распределения

Fig. 3. Frequency distribution of concentrations and calculated normal distributions

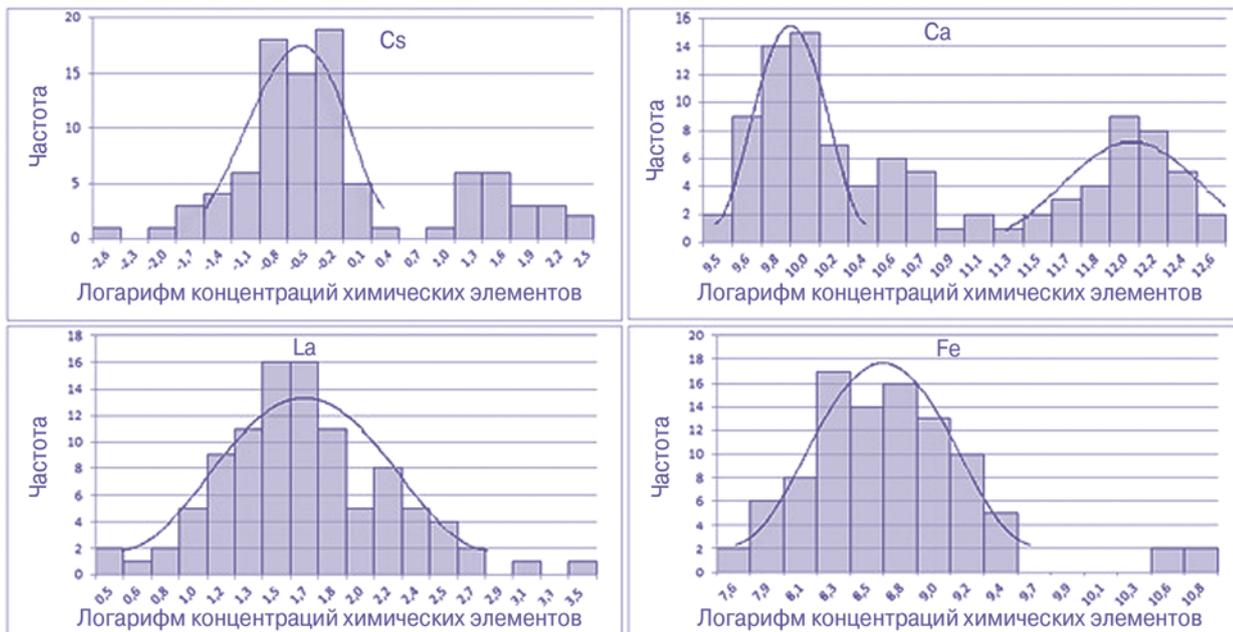


Рис. 4. Распределение частот логарифмов концентраций и рассчитанные логнормальные распределения

Fig. 4. Frequency distribution of log concentration and calculated lognormal distributions

логнормальному закону [6, 8]. Гипотеза о нормальном законе распределения подтвердилась для каждой выборки, соответствующей определенной территории пробоотбора. Поэтому полученные средние значения $\pm 2\sigma$ являются фоном для соответствующей территории. Однако проверка гипотезы о нормальном или логнормальном распределении концентраций для всех проб, отобранных на чистых территориях Западной Сибири, дала положительный

результат только для элементов Eu, Sr, Yb, Zr. Следовательно, содержание этих элементов зависит только от глобального фона и климатических особенностей исследованного региона. Таким образом, соответствующие средние значения $\pm 2\sigma$ для этих элементов можно считать региональным фоном. Отсутствие нормальных/логнормальных распределений для концентраций большинства химических элементов свидетельствует о наличии доминирующих факторов,

связанных с конкретными условиями обитания мхов.

Влияние конкретных условий обитания мха *Pyloisia polyantha* на концентрации подтвердилось в результате проверки на нормальный/логнормальный закон распределения концентраций, полученных для образцов мхов, объединенных по типу растительных подзон (средняя и южная тайга). Например, во мхах, отобранных в растительной подзоне южной тайги (юг Каргасокского района и Кожевниковский

Таблица 3. Средние значения концентраций элементов во мхах, полученные для антропогенного фона г. Томска, мкг/г

Table 3. The average values of concentrations of elements in mosses obtained for anthropogenic background of the city of Tomsk, µg / g

Элемент	\bar{C}	σ	$\bar{C}\pm 2\sigma$	Элемент	\bar{C}	σ	$\bar{C}\pm 2\sigma$
Ba	98	37	172	Na	1130	423	1976
Br	5,3	1,9	9,1	Sb	0,64	0,23	1,1
Ca (1)	20670	740	22150	Sr	99	30	159
Ca (2)	273200	11800	296800	Tb	0,23	0,17	0,57
Cr	12	4,1	20,2	Yb	0,37	0,17	0,71
Fe	6150	2540	11230	Zn	223	76	375

район), больше половины химических элементов (Ba, Cr, Fe, La, Lu, Na, Sb, Sc, Sr, Ta, Tb, Zn, Yb,) имеют нормальное/логнормальное распределение. Однако для растительной подзоны средней тайги нормальное/логнормальное распределение подтвердилось только для 6 элементов — Br, Ca, Nd, Ni, Rb, Yb. Но если учесть ещё и влияние условий фитоценоза (при обработке учитывались результаты, полученные для мха, отобранного в одной растительной подзоне и только в смешанном полидоминантном лесу — Нижневартовский район, ХМАО и Александровский район), то число элементов, концентрации которых подчиняются нормальному/логнормальному распределению, увеличивается в 2 раза — Br, Ca, Co, Cr, Fe, La, Lu, Nd, Ni, Sb, Sc, Ta, Tb, Yb. Выявленная зависимость содержания химических элементов во мхе пилезия от фитоценоза согласуется с результатами, полученными для других видов мхов [9]. В табл. 1 приведены верхние границы диапазонов природного геохимического фона для южной и средней тайги с учетом особенностей фитоценоза для нескольких элементов.

Как отмечено выше, не только вид растительной подзоны и фитоценоз влияют на концентрацию химических элементов. Без сомнения, большое влияние на содержание химических элементов в эпифитных мхах оказывает, например, загущенность крон деревьев. Следует отметить, что при пассивном биомониторинге, как правило, не удается проводить отбор проб мха в одинаковых условиях. Данный недостаток можно устранить, используя метод "активного" мониторинга [10]. Однако при реализации "активного" биомо-

нитинга также возникают трудности. Корректная оценка уровня загрязнения возможна только при сохранении жизнедеятельности трансплантированного мха. К сожалению, не везде удается разместить сложные установки, обеспечивающие жизнедеятельность мхов от нескольких недель до нескольких месяцев. Кроме того, существуют проблемы с выбором оптимальных форм и размеров мешков, способов размещения мха в мешках и т.д. Обзор литературы по "активному" биомониторингу показывает, что большинство проблем "активного" биомониторинга в полном объеме до сих пор не решено.

Во мхах, отобранных на территории г. Томска, для всех химических элементов, кроме кобальта, удалось выявить такой диапазон концентраций, в котором распределение подчиняется нормальному или логнормальному закону (рис. 3, 4). Концентрации кальция имеют бимодальное распределение (рис. 4). Первая мода обусловлена природным содержанием Ca во мхах (см. рис. 1, точка пробоотбора, расположенная на расстоянии 60 км от г. Томска, и данные табл. 2). Вторая мода, очевидно, связана с действием большого количества поверхностных источников загрязнения. Для второй моды среднее значение более чем на порядок превышает природное содержание кальция, что свидетельствует о высокой запыленности г. Томска. Для полученных диапазонов рассчитаны средние значения и среднеквадратичные отклонения, в табл. 3 представлены полученные результаты для нескольких элементов. Высокие концентрации химических элементов, не подчиняющиеся нормальному распределению, очевидно, обусловлены

воздействием крупных источников загрязнения.

Данные табл. 2 и 3 показывают, что концентрации большинства химических элементов в образцах, отобранных на территории г. Томска, превышают природное содержание химических элементов более чем в 2 раза. Имеются два исключения. Для цинка природный и антропогенный фон совпадают, что связано с отсутствием металлургических производств на территории г. Томска. В больших лесных массивах содержание бария выше, чем в г. Томске, что не противоречит данным по древесной растительности.

Наиболее высокие концентрации, превышающие антропогенный фон в 5 и более раз, получены в северной части города для элементов Ce, Cs, Yb. Основным крупным источником загрязнения г. Томска является теплоэнергетическая станция с высотой трубы $H = 100$ м, расположенная на расстоянии примерно 3 км южнее от загрязненной территории (см. рис. 2). Это примерно соответствует расстояниям, на которых наблюдаются максимальные концентрации загрязняющих веществ и которые больше высоты трубы примерно в 10–20 раз. Высокие концентрации загрязняющих веществ обнаружены также вблизи железнодорожных станций и авторазвязок с высоким трафиком.

Выводы

На основе статистического подхода определен геохимический природный фон чистых территорий Западно-сибирского региона и антропогенный фон г. Томска для мха-биоиндикатора *Pylaisia polyantha*.

Анализ результатов, полученных для чистых территорий Западно-Сибирского региона, выявил наличие существенного влияния вида растительной подзоны и фитоценоза на содержание химических элементов в эпифитном мхе *Pylaisia polyantha*.

Использование антропогенного геохимического фона позволяет оценить средний уровень загрязнения атмосферного воздуха урбанизированных территорий и выявить крупные источники выбросов вредных веществ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-77-10060). Часть проекта проведено в рамках Программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.

Литература

1. Bačeva K., Stafilov T., Šajn R., Tănăselia C. Moss biomonitoring of air pollution with heavy metals in the vicinity of a ferronickel smelter plant. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*. 2012. Vol. 47. P. 645–656.
2. Harmens H. et al. Mosses as biomonitors of atmospheric heavy metal deposition: Spatial patterns and temporal trends in Europe. *Environmental Pollution*. 2010. Vol. 158(10). P. 3144–3156.
3. Aničić M., Frontasyeva M., Tomašević M., Popović A. Assessment of atmospheric deposition of heavy metals and other elements in Belgrade using the moss biomonitoring technique and neutron activation analysis. *Environmental Monitoring Assessment*. 2007. Vol. 129. P. 207–219.
4. Панкратова Ю.С., Зельниченко Н.И., Фронтасьева М.В., Павлов С.С. Атмосферные загрязнения на территории Удмуртской Республики — оценки на основе анализа мхов-биоиндикаторов. Проблемы региональной территории. 2009. № 1. С. 57–63.
5. Galuszka A. Different Approaches in Using and Understanding the Term "Geochemical Background" Practical Implications for Environmental Studies. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2007. Vol. 16(3). P. 389–395.
6. Šakalys J., Kvietkus K., Sucharová J., Suchara I., Valiulis D. Changes in total concentrations and assessed background concentrations of heavy metals in moss in Lithuania and the Czech Republic between 1995 and 2005. *Chemosphere*. 2009. Vol. 76(1). P. 91–97.
7. Рогова Н.С., Рыжакова Н.К., Борисенко А.Л., Меркулов В.Г. Изучение аккумуляционных свойств мхов, используемых при мониторинге загрязнения атмосферы. Оптика атмосферы и океана. 2011. №24(1). С. 79–83.
8. Martínez J., Llamas J., de Miguel E., Rey J., Hidalgo M.C. Determination of the geochemical background in a metal mining site: example of the mining district of Linares (South Spain). *Journal of Geochemical Exploration*. 2007. Vol. 94 (1-3). P. 19–29.
9. Boquete M.T., Fernández J.A., Aboal J.R., Carballeira A., Martínez-Abaigar J., Tomás-Las-Heras R., Núñez-Olivera E. Trace element concentrations in the moss *Hypnum cupressiforme* growing in a presumably unpolluted area. *Chemosphere*. 2016. Vol. 158. P. 177–183.
10. Capozzi F., et al. Best options for the exposure of traditional and innovative moss bags: A systematic evaluation in three European countries. *Environmental Pollution*. 2016. Vol. 214. P. 362–373.

References

1. Bačeva K., Stafilov T., Šajn R., Tănăselia C. Moss biomonitoring of air pollution with heavy metals in the vicinity of a ferronickel smelter plant. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*. 2012. Vol. 47. P. 645–656.
2. Harmens H. et al. Mosses as biomonitors of atmospheric heavy metal deposition: Spatial patterns and temporal trends in Europe. *Environmental Pollution*. 2010. Vol. 158(10). P. 3144–3156.
3. Aničić M., Frontasyeva M., Tomašević M., Popović A. Assessment of atmospheric deposition of heavy metals and other elements in Belgrade using the moss biomonitoring technique and neutron activation analysis. *Environmental Monitoring Assessment*. 2007. Vol. 129. P. 207–219.
4. Pankratova Yu.S., Zel'nichenko N.I., Frontas'eva M.V., Pavlov S.S. Atmosfernye zagryazneniya na territorii Udmurtskoi Respubliki — otsenki na osnove analiza mkhov-biomonitirov. *Problemy regional'noi territorii*. 2009. № 1. S. 57–63.
5. Galuszka A. Different Approaches in Using and Understanding the Term "Geochemical Background" Practical Implications for Environmental Studies. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2007. Vol. 16(3). P. 389–395.
6. Šakalys J., Kvietkus K., Sucharová J., Suchara I., Valiulis D. Changes in total concentrations and assessed background concentrations of heavy metals in moss in Lithuania and the Czech Republic between 1995 and 2005. *Chemosphere*. 2009. Vol. 76(1). P. 91–97.
7. Rogova N.S., Ryzhakova N.K., Borisenko A.L., Merkulov V.G. Izuchenie akkumulyatsionnykh svoystv mkhov, ispol'zuemykh pri monitoringe zagryazneniya atmosfery. *Optika atmosfery i okeana*. 2011. №24(1). S. 79–83.
8. Martínez J., Llamas J., de Miguel E., Rey J., Hidalgo M.C. Determination of the geochemical background in a metal mining site: example of the mining district of Linares (South Spain). *Journal of Geochemical Exploration*. 2007. Vol. 94 (1-3). P. 19–29.
9. Boquete M.T., Fernández J.A., Aboal J.R., Carballeira A., Martínez-Abaigar J., Tomás-Las-Heras R., Núñez-Olivera E. Trace element concentrations in the moss *Hypnum cupressiforme* growing in a presumably unpolluted area. *Chemosphere*. 2016. Vol. 158. P. 177–183.
10. Capozzi F., et al. Best options for the exposure of traditional and innovative moss bags: A systematic evaluation in three European countries. *Environmental Pollution*. 2016. Vol. 214. P. 362–373.

Н.С. Рогова — канд. техн. наук, старший преподаватель, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Россия, г. Томск, пр. Ленина 30, e-mail: rogoval@tpu.ru • Н.К. Рыжакова — канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: nkryzh@tpu.ru • А.Л. Борисенко — канд. биол. наук, доцент, Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050 Россия, г. Томск, пр. Ленина 36, e-mail: alb@sibmail.com

N.S. Rogova — Dr. Sci. (Eng.), Senior Lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University, 634050 Russia, Tomsk, Lenin prospect 30, e-mail: rogoval@tpu.ru • N.K. Ryzhakova — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, e-mail: nkryzh@tpu.ru • A.L. Borisenko — Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor, National Research Tomsk State University, 634050 Russia, Tomsk, Lenin Ave. 36, e-mail: alb@sibmail.com