

Изучение аккумуляционных свойств мхов, используемых при мониторинге загрязнения атмосферы

Н.С. Рогова¹, Н.К. Рыжакова¹, А.Л. Борисенко², В.Г. Меркулов^{1*}

¹Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

²Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 4.10.2010 г.

Представлены результаты исследований аккумуляционных способностей мхов, используемых для мониторинга загрязнения атмосферы. Объектами исследований являлись 4 вида лесных, 4 вида болотных и 2 вида эпифитных мхов. Определение содержания химических элементов во мхах произведено с помощью нейтронно-активационного и атомно-эмиссионного методов анализа. Показано, что аккумуляционные способности мхов отличаются не только среди представителей разных систематических групп, но и внутри группы. Определены оптимальные тест-объекты для регионального и локального контроля загрязнения атмосферы.

Ключевые слова: мхи-биоиндикаторы, нейтронно-активационный анализ, атомно-эмиссионная спектрометрия, аккумуляционные способности, загрязнение атмосферы; moss-indicators, neutron-activation analysis, atom-emission spectrometry, accumulation properties, atmospheric pollution.

Введение

Морфологические и физиологические свойства мхов наряду с широким их распространением делают эти растения очень полезными биоиндикаторами для оценки состояния окружающей среды. Мхи эффективно концентрируют большинство тяжелых металлов и других микроэлементов из воздуха и осадков. Более того, они не имеют корневой системы и, следовательно, вклад других источников, кроме атмосферных выпадений, в большинстве случаев ограничен. Сбор образцов несложен, анализ мхов значительно проще, чем осадков, период экспозиции может быть определен достаточно точно — обычно для анализа берется трехлетний прирост мха.

В европейской программе мониторинга «Атмосферные выпадения тяжелых металлов в Европе — оценки на основе анализа мхов» в качестве индикаторов рекомендуют использовать лесные наземные мхи *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., *Hylocomium splendens* (Hedw.) B.S.G., *Hypnum cupressiforme* (Hedw.) и *Scleropodium purum* (Hedw.) [1–3]. Возможность использования указанных видов для оценки загрязнения той или иной территории не отвергается, однако следует заметить, что возникают некоторые ограничения при интерпретации полученных данных.

Во-первых, следует помнить, что при использовании этих и других наземных видов мхов

невозможно исключить влияние почвы и того загрязнения, что в ней аккумуляровано, а установить источник (воздух, вода или материнская порода) такого загрязнения иногда затруднительно.

Во-вторых, наши предварительные исследования показали, что существуют отличия в аккумуляционных способностях мхов не только из разных систематических групп, например, болотных и лесных, но и между представителями разных экологических групп, принадлежащих к одной систематической группе, например разных видов болотных мхов. Кроме того, использование наземных видов мхов позволяет оценить пути и источники поступления загрязняющих веществ только на больших лесных территориях, в то время как изучение атмосферы урбанизированных территорий с помощью данных мхов невозможно. Следует отметить, что лазерные [4] или традиционные методы [5], используемые для этих целей, позволяют производить краткосрочные и локальные наблюдения за газоаэрозольным составом атмосферного воздуха.

К числу оптимальных тест-объектов можно отнести эпифитные мхи, имеющие широкое распространение, высокую встречаемость, продолжительный жизненный цикл и обладающие способностью значительной биологической аккумуляции различных атмосферных загрязнений. Особый интерес к эпифитным мхам обусловлен также тем, что их использование позволяет изучить загрязнение атмосферы промышленных центров и населенных пунктов [6]. Эпифиты произрастают на коре старых деревьев (осин, тополей), не соприкасаются с почвой, а следовательно, на них практически не сказывается ее гетерогенный химический состав (что особенно ярко проявляется именно на урбанизированных

* Наталья Сергеевна Рогова (rogova@interact.phd.tpu.ru); Надежда Кирилловна Рыжакова; Алексей Леонидович Борисенко (alb@sibmail.com); Виктор Георгиевич Меркулов.

и иных синантропных территориях), а влияние субстрата (коры деревьев) полностью снимается его единообразием. Таким образом, эпифитные мхи соответствуют всем основным требованиям, предъявляемым к биоиндикаторным видам [7].

В данной статье рассмотрены аккумуляционные способности мхов, используемые для контроля состояния атмосферы с целью определения видов мхов, оптимальных для регионального и локального мониторинга состояния атмосферы.

Методы и объекты исследования

В данной статье проведено сравнение аккумуляционных способностей четырех лесных видов (*Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., *Dicranum polysetum* Sw., *Ptilium crista-castrensis* (Hedw.) De Not., *Hylocomium splendens* (Hedw.) B.S.G.), собранных на одном участке зеленомошно-кустарничкового соснового леса площадью около 1 м², четырех болотных видов (*Aulacomnium palustre* (Brid.) Mitt., *Sphagnum angustifolium* (Russ. ex Russ.) C. Jens., *Sphagnum squarrosum*, *Sphagnum centrale* C. Jens. ex H. Arnell et C. Jens.), собранных на кустарничково-осоково-сфагновом болоте в небольшой мочажине площадью около 5 м², и двух эпифитных видов (*Pylaisia polyantha* (Hedw.) B.S.G., *Orthotrichum obtusifolium* Brid.), отобранных с коры старых тополей на участке площадью около 8–10 м². Все отобранные мхи произрастали на одинаковом удалении от дороги и располагались в одном районе, т.е. подвергались одинаковой антропогенной нагрузке.

В целях статистической обработки из каждого образца изготовлено 6–10 параллельных проб. В каждой пробе определено содержание до 30 химических элементов с помощью нейтронно-активационного анализа и атомно-эмиссионной спектроскопии.

Нейтронно-активационный анализ (НАА) проводили на реакторе ИРТ-Т НИИ ЯФ г. Томск. Погрешность измерений нейтронно-активационным методом для всех элементов составляет 10–15%. Наиболее токсичные элементы – свинец, медь, кадмий и некоторые другие – определялись методом атомно-эмиссионной спектроскопии (АЭС) с индуктивно связанной плазмой iCAP6300 DUO в НАЦ ТПУ (г. Томск). Погрешность измерений атомно-

эмиссионным методом составляла: для Cr, Zn – 20%, Fe – 28%, Ba, Ca, Mn – 30%, Co, K, Mo, Na – 40%, As, Sb – 50%.

Результаты исследований и их анализ

Для оценки влияния видов мхов на накопительные способности по отношению к разным химическим элементам в каждом семействе лесных и болотных мхов проведен однофакторный дисперсионный анализ с помощью критерия Фишера [8]. Полученные коэффициенты Фишера по всем химическим элементам (табл. 1) значительно превышают критические значения, что свидетельствует о разных аккумуляционных способностях разных видов как болотных, так и лесных мхов. Высокие значения коэффициентов Фишера для болотных мхов по As, Zn и для лесных мхов по Hf, Na, Sm можно объяснить тем, что концентрации по данным элементам среди сравниваемых видов отличаются на порядок и более. Следовательно, использование в одном исследовании разных наземных мхов, собранных даже с одного исследуемого участка, некорректно.

Результаты анализа двух эпифитных мхов *Pylaisia polyantha* (Hedw.) B.S.G. и *Orthotrichum obtusifolium* Brid. с помощью метода сравнения рядов распределения по дисперсиям и средним представлены в табл. 2, 3.

В табл. 2 жирным шрифтом выделены значения критерия Фишера, превышающие критическое, для химических элементов выборки, концентрации которых значимо отличаются друг от друга.

Для элементов, у которых отношение дисперсий не превышает критическое значение коэффициента Фишера, проведено сравнение средних значений концентраций. В табл. 3 жирным шрифтом выделены значения критерия Стьюдента, превышающие критическое значение. Данный анализ показал, что лишь три элемента – Th, Cs, Co – не имеют значимого различия в сравниваемых дисперсиях и средних.

Таким образом, можно утверждать о неоднородности сравниваемых выборок, а именно о различии в аккумуляционных способностях различных видов эпифитного мха по большинству химических элементов.

Таблица 1

Коэффициенты Фишера для лесных и болотных мхов: $F_{кр} = 2,8$ для элементов, определенных НАА, $F_{кр} = 3,09$ для элементов, определенных с помощью АЭС, при уровне значимости 0,95

Химический элемент	As	Al*	Ba	Br	Ca	Co	Cs	Cr	Cu*	Eu	Fe	Hg	Hf	K*	La
<i>F</i> для болотных мхов	2435	31	475	10	112	384	141	23	104	119	331	197	10	312	439
<i>F</i> для лесных мхов	572	5,6	32	11	111	230	232	446	5,4	51	163	199	805	9,1	589
Химический элемент	Mg*	Mn*	Mo	Na	Ni	Rb	Sb	Sc	Si*	Sm	Sr	Ti*	Th	V*	Zn
<i>F</i> для болотных мхов	145	144	382	225	236	158	397	214	39	287	133	87	111	50	1575
<i>F</i> для лесных мхов	20	15	182	700	182	67	354	208	3,2	755	123	6,6	298	2,6	120

*Элементы, определенные с помощью АЭС.

Таблица 2

Отношение дисперсий, подсчитанное для разных видов мха (объем выборки $n = 9$, критическое значение коэффициента Фишера $F_{кр} = 3,3$ при вероятности 0,95)

Химический элемент	Sm	Mo	Ca	Br	As	Na
F	5,8	959,8	5,6	45,6	13,2	2,6
Химический элемент	Cr	Ba	Th	Sr	Cs	Ni
F	3,1	6,1	1,1	1,2	2,1	1,7
Химический элемент	Fe	Zn	Sc	Co	Sb	Rb
F	6,4	1,	8,5	3,0	2,5	13,9

Таблица 3

Сравнение средних значений концентраций элементов в различных видах мха (объем выборки $n = 9$, критическое значение коэффициента Стьюдента $t_{кр} = 2,3$ при вероятности 0,95)

Химический элемент	Na	La	Cr	Th	Sr
t	6,0	5,1	23	0,3	4,1
Химический элемент	Cs	Ni	Zn	Co	Sb
t	1,6	11,1	31,4	1,7	8,6

Для определения степени аккумуляционных способностей мхов проведено ранжирование средних значений концентраций всех химических элементов по мере их возрастания для исследованных

Полученные данные хорошо объясняются анатомо-морфологическим строением мхов. Так, например, самая высокая сумма рангов среди лесных мхов получена для *Dicranum polysetum*, который имеет обильный ризоидный войлок и плотный характер дерновинок, что, очевидно, способствует удержанию загрязняющих компонентов. Мох вида *Hylocomium splendens* имеет наименьшую сумму рангов, т.е. данный вид мха обладает наименьшими аккумуляционными способностями, что объясняется рыхлым строением его дерновинок и характером расположения веточек на побеге. Среди болотных мхов наибольшими аккумуляционными способностями обладает *Aulacomnium palustre* с обильным ризоидным войлоком по всему побегу. *Sphagnum centrale* и *Sphagnum angustifolium* имеют примерно одинаковую сумму рангов, так как относятся к одному биологическому роду и обладают сходными анатомо-морфологическими и физиологическими характеристиками [10].

Используемые для мониторинга в Европе мхи вида *Hylocomium splendens* и *Pleurozium schreberi* имеют примерно одинаковую сумму рангов. Следует отметить, что данные мхи обладают разными аккумуляционными способностями по отношению к тем или иным химическим элементам. При сравнении абсолютных значений концентраций химических элементов в этих мхах видно, что *Pleurozium schreberi*

Таблица 4

Средние значения концентраций Mo, Cr, Zn в различных видах мха и соответствующие им ранги

Вид мха	Химический элемент					
	Mo		Cr		Zn	
	Среднее значение	Ранг	Среднее значение	Ранг	Среднее значение	Ранг
<i>Dicranum polysetum</i>	1,66	6	16,11	8	55,53	4
<i>Aulacomnium palustre</i>	1,923	8	9,844	4	66,939	7
<i>Ptilium crista-castrensis</i>	1,019	3	11,603	7	55,738	5
<i>Sphagnum centrale</i>	0,455	2	11,020	5	45,967	2
<i>Hylocomium splendens</i>	1,034	4	8,432	3	38,170	1
<i>Sphagnum angustifolium</i>	1,729	7	8,103	1	56,141	6
<i>Sphagnum squarrosum</i>	1,042	5	11,228	6	126,161	8
<i>Pleurozium Schreberi</i>	0,449	1	8,261	2	50,766	3
<i>Pylaisia polyantha</i>	72,30	10	92,26	10	307,51	9
<i>Orthotrichum obtusifolium</i>	4,09	9	50,03	9	542,10	10

Таблица 5

Сумма рангов для различных наземных мхов

Вид мха	<i>Aulacomnium palustre</i>	<i>Sphagnum centrale</i>	<i>Sphagnum angustifolium</i>	<i>Sphagnum squarrosum</i>	<i>Dicranum polysetum</i>
Сумма рангов	108	57	59	95	142
Вид мха	<i>Ptilium crista-castrensis</i>	<i>Hylocomium splendens</i>	<i>Pleurozium schreberi</i>	<i>Pylaisia polyantha</i>	<i>Orthotrichum obtusifolium</i>
Сумма рангов	104	62	75	173	170

видов мхов (в табл. 4 в качестве примера приведено ранжирование концентраций Mo, Cr, Zn) [9]. Каждому среднему значению концентрации того или иного химического элемента присвоен порядковый номер-ранг; количество рангов равно количеству исследованных видов мхов, в нашем случае 10. Подсчитаны суммы рангов всех химических элементов для каждого вида мха (табл. 5).

накапливает в 1,5–2 раза больше As, Ba, Ni, Hf, Zn, Na, а *Hylocomium splendens* – Sm, Mo, Th, Hg (табл. 6). Некоторыми авторами для проведения сравнительного анализа концентраций химических элементов, аккумулярованных разными видами мхов, предлагается использовать межвидовую калибровку для каждого исследуемого химического элемента [11], однако точность методики вызывает сомнения.

Изучение аккумуляционных свойств мхов, используемых при мониторинге загрязнения атмосферы

81

Таблица 6

Средние значения концентраций для мхов вида *Hylocomium splendens* и *Pleurozium schreberi*, мкг/г

Химический элемент	Sm	Mo	Ca	Br	As	Na	La	Cr	Hf	Ni
Вид мха										
<i>Hylocomium splendens</i>	0,6	1,0	7397	2,7	0,05	229	2,6	8,4	1,1	4,8
<i>Pleurozium Schreberi</i>	0,4	0,4	8068	2,9	0,1	785	2,3	8,2	0,4	10
Химический элемент	Rb	Fe	Zn	Sc	Co	Eu	Sb	Al*	Cd*	Th
Вид мха										
<i>Hylocomium splendens</i>	13	1730	36	0,56	0,80	0,06	0,25	1340	0,26	0,7
<i>Pleurozium Schreberi</i>	18	2077	52	0,54	0,83	0,07	0,32	1149	0,37	0,5
Химический элемент	Sr	Cs	Hg	Se*	Si*	Te*	Ti*	V*	Ba	
Вид мха										
<i>Hylocomium splendens</i>	35	0,3	0,03	4,9	1166	9,4	100	3,1	66	
<i>Pleurozium Schreberi</i>	46	0,4	0,02	5,2	1046	10	86	2,7	90	

*+См. примечание к табл. 1.

В табл. 7 приведены средние значения концентраций химических элементов, полученные для двух эпифитных мхов (*Pylaisia polyantha*, *Orthotrichum obtusifolium*) и наземного мха (*Dicranum polysetum*), обладающих наибольшими аккумуляционными способностями. Из сравнения данных табл. 6 и 7 видно, что эпифитные мхи накапливают и удерживают химические элементы в большей степени по сравнению с наземными мхами.

Для регионального мониторинга атмосферы с помощью наземных мхов рекомендуется использовать обладающий наибольшими накопительными способностями мох вида *Dicranum polysetum*.

Для мониторинга атмосферы урбанизированных территорий оптимальным тест-объектом является эпифитный мох *Pylaisia polyantha* как наиболее распространенный и характеризующийся высокими аккумуляционными свойствами.

Таблица 7

Средние значения концентраций для двух эпифитных мхов (*Pylaisia polyantha*, *Orthotrichum obtusifolium*) и наземного мха (*Dicranum polysetum*), мкг/г

Химический элемент	Sm	Mo	Ca	Br	As	Na	La	Cr	Cs
Вид мха									
<i>Pylaisia polyantha</i>	2,5	7,2	12444	5,2	0,9	3075	8,1	92	0,4
<i>Orthotrichum obtusifolium</i>	2,1	4,1	13661	18	0,8	2476	7,2	50	0,6
<i>Dicranum polysetum</i>	1,3	1,6	10535	3,2	0,5	1174	4,7	16	0,5
Химический элемент	Th	Sr	Fe	Ni	Rb	Ba	Zn	Sb	Co
Вид мха									
<i>Pylaisia polyantha</i>	0,3	145	15703	60	24	291	307	1,2	2,2
<i>Orthotrichum obtusifolium</i>	0,3	167	5916	80	19	343	542	0,9	2,0
<i>Dicranum polysetum</i>	0,9	68	2800	12	18	89	55	0,7	1,3

Таким образом, преимущество использования эпифитных мхов в качестве биомониторов заключается не только в отсутствии влияния почвы на содержание химических элементов, что обеспечивает высокую сравнимость полученных на разных территориях результатов, но и в их высоких аккумуляционных способностях по сравнению с наземными мхами. Кроме того, применение эпифитных мхов дает возможность изучения загрязнения атмосферы промышленных центров и населенных пунктов, что практически невозможно при использовании лесных и болотных мхов.

Заключение

При мониторинге загрязнения атмосферы следует использовать один вид мха, так как выявлены существенные отличия в аккумуляционных способностях мхов не только из разных систематических групп, но и между представителями, принадлежащими к одной систематической группе.

1. Harmens H., David N. and participants of the moss survey. Spatial and temporal trends in heavy metal accumulation in Europe (1990–2005). Bangor. Wales. Programme Coordination centre for the ICP Vegetation. Centre for Ecology and Hydrology Centre for Ecology and Hydrology, 2008. P. 51. <http://www.ceh.ac.uk/products/publications/SpatialandTemporalTrendsInHeavyMetalAccumulati-2005.html>
2. Nikodemus O., Brūmelis G., Tabors G., Lapina L., Pope S. Monitoring of air pollution in Latvia between 1990 and 2000 using moss // J. Atmos. Chem. 2004. V. 49, N 1–3. P. 521–531.
3. Andrzej Klos, Malgorzata Rajfur, Maria Waclawek, Witold Waclawek, Marina V. Frontasyeva, Julia S. Pankratova. The influence of unidentified pollution sources on the irregularity of biomonitoring tests results // Water, air and soil pollution. 2008. V. 191, N 1–4. P. 345–352.
4. Росляков П.В. Система непрерывного мониторинга и контроля вредных выбросов ТЭЦ в атмосферу. М.: Изд-во МЭИ, 2000. 158 с.
5. Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 1. Научно-методические основы. Ч. 2. Новые приборы и методи-

- ки измерений / Под ред. В.Е. Зуева, М.В. Кабанова. Томск: Спектр, 1997. 221 с.
6. Рыжакова Н.К., Борисенко А.Л., Меркулов В.Г., Рогова Н.С. Контроль состояния атмосферы с помощью мхов-биоиндикаторов // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 1. С. 101–104.
 7. Борисенко А.Л., Рыжакова Н.К., Меркулов В.Г. Вид *Рулaisia polyantha* (Hedw.) V.S.G. (пилезия многоцветковая) как объект экологического мониторинга загрязнения атмосферы // Современная экология – наука XXI века: Материалы Междунар. научно-практ. конф. (Рязань, 17–18 октября 2008 г.). Рязань: РГУ, 2008. С. 177–179.
 8. Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М.: Наука, 1968. 288 с.
 9. Венецкий И.Г., Венецкая В.И. Основные математико-статистические понятия и формула в экономическом анализе. М.: Статистика, 1974. 280 с.
 10. Tyler G. Bryophytes and heavy metals: a literature review // Botanical journal of Linney society. 1990. V. 104, N 1–3. P. 231–253.
 11. Shotbolt L., Bükер P., Ashmore M. Reconstructing temporal trends in heavy metal deposition: Assessing the value of herbarium moss samples // Environ. Pollut. 2007. V. 147, N 1–3. P. 120–130.

Natalia S. Rogova, Nadezhda K. Ryzhakova, Alex L. Borisenko, Viktor G. Merkulov. Study of moss accumulation properties, used in the atmospheric pollution monitoring.

The paper represents results of studies of moss accumulation properties, used for atmospheric pollution monitoring. Four species of the forest moss, 4 species of paludal moss and 2 species of epiphytic moss were taken as research objects. The determination of chemical element contents in moss was carried out, using the neutron-activation and atom-emission methods of analysis. It is shown that moss accumulation properties differ both among representatives of different systematic groups and inside a group. The optimal test-objects for regional and local atmospheric pollution monitoring were determined.