

Р. А. Баймуратов, М. Г. Напреенко, А. А. Шангина

АККУМУЛЯЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ
МОХООБРАЗНЫХ ТОРФЯНО-БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ
КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

Поступила в редакцию 24.11.2024 г.

Принята к публикации 25.01.2025 г.

doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-4

58

Для цитирования: Баймуратов Р. А., Напреенко М. Г., Шангина А. А. Аккумуляционная способность мохообразных торфяно-болотных экосистем Калининградской области // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2025. №1. С. 58–70. doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-4.

Представлены результаты изучения накопительных способностей мохообразных в двух торфяно-болотных экосистемах разной степени нарушенности на территории Калининградской области – на болоте Большом и торфянике Виттгирренском. Были изучены широко распространённые виды болотных мхов: *Aulacomnium palustre*, *Polytrichum strictum*, *Sphagnum centrale*, *S. cuspidatum*, *S. fuscum*, *S. magellanicum* и *S. squarrosum*, а также эталонный вид *Pleurozium schreberi*. В ходе исследования, методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии, определено содержание 8 макро- и микроэлементов Mn, Zn, Ni, Fe, Br, Rb, Sr и Ca. Во мхах установлено статистически значимое отличие концентраций Mn, Zn, Ni, Br и Rb. Отмечена высокая корреляционная зависимость между железом и кальцием, что может свидетельствовать об одном источнике попадания данных элементов в растения. Виды мхов *Aulacomnium palustre* и *Sphagnum centrale* выделены как сходные по аккумуляционным способностям с эталонным *Pleurozium schreberi*.

Ключевые слова: аккумуляционные способности, мохообразные, нарушенные торфяники, биомониторинг, сфагнум, рентгенофлуоресцентная спектроскопия, Калининградская область

Введение

Мохообразные активно используются в качестве индикаторов состояния окружающей среды, а также для оценки уровня атмосферных осадений [1]. Ввиду отсутствия у мохообразных корневой системы, они получают минеральные вещества непосредственно из атмосферы, что делает их высоко чувствительными и эффективными индикаторами загрязнения воздуха [2]. Биомониторинг с использованием мохообразных



является хорошим вариантом оценки атмосферного осаждения загрязняющих веществ благодаря дешевизне, широкому распространению объектов исследования и устойчивости к стресс-реакциям [3].

Исследования аккумуляционных способностей мохообразных позволили определить наиболее подходящие (эталонные) для мониторинговых работ виды мхов: *Pleurozium schreberi*, *Hylocomium splendens*, *Pseudoscleropodium purum*, *Hypnum cupressiforme* [4]. Одним из перспективных направлений развития методологии «моховой техники» на сегодняшний день стало выявление новых видов-индикаторов с аналогичными накопительными способностями. В литературных источниках помимо эталонных видов часто упоминаются *Abietinella abietina*, *Barbula indica*, *Camptothecium lutescens*, *Homalothecium sericeum* [5–7].

Накопительные способности некоторых болотных мхов также отражают геохимические особенности местности, но данные растения пока не относятся к индикаторным видам [8]. Тем не менее интерес к изучению их аккумуляционных способностей растет и способствует развитию метода бриоиндикации. Важно учитывать и то, что мохообразные выступают широко распространенными и даже средообразующими видами некоторых экосистем, в частности, болот.

В Калининградском регионе накопительные способности рассматриваемых видов растений изучаются сравнительно недавно, начиная с 1995 г. [9–13], при этом на территории области сфагновые мхи произрастают в основном на торфяных болотах, занимающих чуть более 5% площади [14].

Целью данного исследования является сравнение способностей доминирующих видов мхов накапливать различные химические элементы, включая тяжелые металлы на торфяниках с разной степенью антропогенной нарушенности.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования для изучения аккумуляционных способностей были выбраны торфяно-болотные экосистемы, расположенные в центральной части Калининградской области и характеризующиеся разной степенью антропогенной трансформации (рис. 1).



Рис. 1. Расположение исследуемых торфяно-болотных экосистем на территории Калининградской области



Болото Большое (далее — ББ), занимает площадь 600 га, расположено в Черняховском районе, внутри лесного массива Гремячьего (54°26'27.6" с. ш., 21°22'19.2" в. д.). В настоящий момент на ББ преобладают фитоценозы кочковато-мочажинного и сосново-кустарничкового окраинного комплексов, встречаются топяные участки [14]. Эдификаторами сообществ выступают различные виды сфагновых мхов. Данная экосистема слабо затронута антропогенным воздействием и на большей части сохранила типичные местообитания верхового болота (за исключением краевой части, где проводилась осушительная мелиорация) [15]. Отбор проб осуществлялся как в центральной части болота, сохранившейся в естественном состоянии, так и на его периферии — в полосе, подвергшейся осушению.

Торфяник Виттирренский (далее — ТВ) расположен в Славском районе, в 4 км к северу от ББ (54°28'46.2" с. ш., 21°23'46.0" в. д.), занимает около 120 га и представляет собой остаточную, сильно трансформированную торфяную залежь [16], сохранившуюся после промышленной фрезерной добычи торфа в 1970—1980-х гг. Доминирующей растительностью торфяника является молодая (15—30 лет) низкорослая березовая поросль с кочками из пушицы и вереска. В отдельных местах встречаются участки открытого торфа. Вдоль крупных канав и на сильно дренированных участках развит довольно высокий березовый древостой.

Отбор проб и методы анализа

Сбор растительного материала осуществлялся на основе рекомендаций по отбору проб в рамках международной программы по воздействию загрязнения воздуха на естественную растительность и сельскохозяйственные культуры *ICP-Vegetation* [17]. С площадок 10×10 м², выбранных в связи с высокой встречаемостью на них мохообразных [18], было отобрано 16 проб на ББ (9 площадок) и 18 проб на ТВ (7 площадок). Отбор проб осуществлялся с разных мест произрастания: напочвенный покров, кочки, влажные понижения, канавы различной глубины, сфагновые ковры (табл. 1).

Таблица 1

Описание площадок отбора

Площадка	Местообитание	Виды мхов
<i>Болото Большое</i>		
1	Краевой склон болота, сосново-кустарничково-сфагновый комплекс. Крупная кочка	<i>Sphagnum fuscum</i>
2	Кочковато-мочажинный комплекс с мелкими слабообводненными мочажинами в центре болота. Низкая кочка	<i>Sphagnum magellanicum</i>
3	Сосняк вересковый в центре болота. Межкочие	<i>Aulacomnium palustre</i>
4	Кочковато-мочажинный комплекс с низкими кочками на плато болота. Обводненный сфагновый ковер	<i>Sphagnum cuspidatum</i> , <i>Sphagnum magellanicum</i>



Площадка	Местообитание	Виды мхов
5	Мочажинный комплекс на краевом склоне болота. Крупная мочажина и сфагновый ковер в основании кочки	<i>Sphagnum cuspidatum</i> , <i>Sphagnum magellanicum</i>
6	Сосняк вересковый в центре болота. Высокая кочка	<i>Polytrichum strictum</i>
7	Сосняк багульниковый высокоствольный на периферии болота. Почва	<i>Pleurozium schreberi</i> , <i>Sphagnum centrale</i>
8	Смешанный лес на осушенной торфяной почве на окраине болота. Почва	<i>Pleurozium schreberi</i>
9	Березняк с ивой на окраине болота на границе торфяной залежи. Канавы	<i>Sphagnum squarrosum</i>
<i>Торфляник Виттгенренский</i>		
1	Травяно-сфагновая топь на заброшенной карте торфоразработки. Сфагновый ковер (из нескольких видов)	<i>Sphagnum centrale</i> , <i>Sphagnum cuspidatum</i> , <i>Sphagnum magellanicum</i>
2	Канавы с ситником и ивой серой между картами торфоразработок. В центре и на бровке канавы	<i>Aulacomnium palustre</i> , <i>Pleurozium schreberi</i> , <i>Polytrichum strictum</i> , <i>Sphagnum magellanicum</i> , <i>Sphagnum squarrosum</i>
3	Березовая поросль с пушицей и сфагнами на заброшенной карте торфоразработки. Основание кочки	<i>Pleurozium schreberi</i> , <i>Sphagnum fuscum</i>
4	Обводненное понижение с ситником	<i>Sphagnum cuspidatum</i>
5–6	Канавы межкартовая с крупными кочками пушицы и фрагментами сфагновых ковров	<i>Sphagnum centrale</i> , <i>Sphagnum cuspidatum</i>
7	Канавы межкартовая со сплошным сфагновым ковром и рассеянными кочками пушицы	<i>Sphagnum cuspidatum</i>

Для определения мохообразных применялись общепринятые методы, описанные в литературе. При идентификации мхов использовались определители [19–21]. Комплекс близкородственных видов *Sphagnum magellanicum* мы рассматриваем в прежнем объеме [21] – в качестве одного вида *Sphagnum magellanicum* s. l, поскольку для целей исследования нет необходимости разделения его на отдельные таксоны, которые очень близки экологически и могут произрастать в одной дерновинке [22], тем более, что процесс разделения этого комплекса на отдельные виды в узком понимании пока еще не закончен [23].

Процедура отбора проб включала ручной сбор и упаковку каждого образца в герметичные полиэтиленовые ZIP-пакеты. Дальнейшая пробоподготовка состояла в очистке проб от примесей в лабораторных условиях, высушивания в бумажных пакетах при комнатной температуре и влажности до постоянного веса при 40 °С [24]. Для определения элементного состава образцов использовали метод рентгенофлуоресцентной спектроскопии на спектрометре Max G (Санкт-Петербург, Россия,



НПО Спектрон). Высушенные мохообразные измельчали в порошок, 0,25 г которого прессовали в таблетки с основанием из борной кислоты. Интенсивность флуоресценции измеряли по методике, разработанной производителем оборудования для элементного анализа растений: анод — Ag, кристалл-анализатор — LiF (200), напряжение — 40 кВ, ток — 0,1, время экспозиции — 100 с при определении Ca, Mn, Ni, Zn, Br, Rb и Sr (50 с для Fe). Результаты анализа контролировали с использованием стандартных образцов с известным составом, разработанных в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН: травосмеси, SSS 8922-2007; элодеи канадской, SSS 8921-2007; листа березы, SSS 8923-2007 [25].

Для выявления статистически значимых различий между концентрациями элементов в исследуемых экосистемах был проведен однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA). Концентрации элементов схожи между собой при значимости $p > 0,05$.

Анализ корреляционных связей между элементами в пробах мохообразных, проведенный при помощи коэффициента корреляции Пирсона, выявил линейную зависимость, которая значима при $p \leq 0,01^{**}$ (99 % надежности) и при $p \leq 0,05^{*}$ (95 % надежности) [6; 7]. Для интерпретации тесноты связи между переменными использовалась шкала Чеддока, где степень корреляции определяется как слабая при $r < 0,3$, умеренная при $0,3 \leq r < 0,5$, заметная при $0,5 \leq r < 0,7$, высокая при $0,7 \leq r < 0,9$, весьма высокая при $r \geq 0,9$.

Статистическая обработка данных

Особенности содержания элементов в изученных видах мохообразных определялись при помощи описательной математической статистики. Для статистических расчетов использовалось программное обеспечение Microsoft Excel и IBM SPSS Statistics 23.

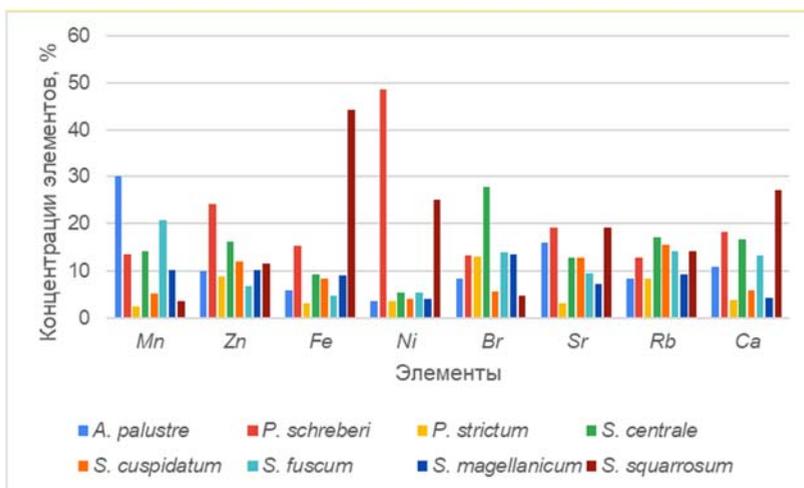
Результаты и обсуждение

На ББ в качестве широко распространенных видов было выделено и отобрано 11: *Aulacomnium palustre*, *Pleurozium schreberi*, *Polytrichum strictum*, *Sphagnum angustifolium*, *S. centrale*, *S. cuspidatum*, *S. fimbriatum*, *S. fuscum*, *S. magellanicum*, *S. rubellum* и *S. squarrosum*.

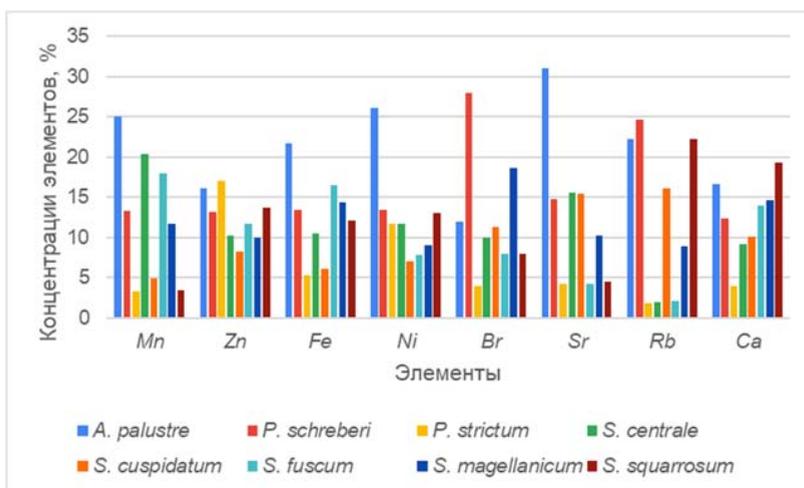
Доминирующими мохообразными на ТВ являются 12 видов: *Aulacomnium palustre*, *Pleurozium schreberi*, *Polytrichum commune*, *P. strictum*, *Sphagnum capillifolium*, *S. centrale*, *S. cuspidatum*, *S. fuscum*, *S. magellanicum*, *S. riparium*, *S. squarrosum* и *S. teres*.

Поскольку видовой состав мохообразных на каждом из торфяников не совпадает полностью, для исследования были отобраны и проанализированы только виды, обнаруженные на обеих территориях: *Aulacomnium palustre*, *Pleurozium schreberi*, *Polytrichum strictum*, *Sphagnum centrale*, *S. cuspidatum*, *S. fuscum*, *S. magellanicum* и *S. squarrosum*.

В ходе работы в образцах проб мохообразных определены концентрации восьми макро- и микроэлементов: Mn, Zn, Ni, Fe, Br, Rb, Sr и Ca. На рисунке 2 показаны результаты накопления элементов разными видами мхов на торфяниках с разной степенью нарушенности.



а



б

Рис. 2. Концентрации элементов: а – на ББ; б – ТВ

Различия в аккумуляции элементов на торфяниках разной степени нарушенности

Концентрации определенных элементов на всех территориях исследования не выходят за пределы нормального диапазона их содержания в растениях [26]. Включая группу тяжелых металлов, все элементы в необходимых концентрациях нужны для нормального роста и развития растений [27], тогда как их недостаток или избыток может привести к физиологическому стрессу и иметь неблагоприятные последствия [28].



Исследование показало, что концентрации *Mn*, *Zn*, *Ni*, *Br* и *Rb* во мхах на торфяниках разной степени нарушенности статистически значимо отличаются ($p < 0,05$). Различия между концентрациями данных элементов в образцах, возможно, обусловлены следствием стресс-реакции мохообразных на сильные колебания УБВ [16]. Значения *Fe*, *Sr* и *Ca* на обеих экосистемах схожи. Максимальные концентрации отмечены в понижениях микрорельефа, что, предположительно, связано с аккумуляцией во мхах в процессе водной миграции элементов.

Расчитанный коэффициент корреляции Пирсона позволил отметить высокую взаимозависимость между железом и кальцием; заметную — в парах марганец — бром, цинк — никель, цинк — бром, цинк — рубидий, железо — никель, никель — кальций, бром — рубидий (табл. 2). Высокая и заметная корреляция может быть связана с общими источниками поступления элементов.

Таблица 2

Коэффициент корреляции Пирсона

	<i>Mn</i>	<i>Zn</i>	<i>Fe</i>	<i>Ni</i>	<i>Br</i>	<i>Sr</i>	<i>Rb</i>
<i>Zn</i>	0,346						
<i>Fe</i>	-0,077	0,283					
<i>Ni</i>	0,094	0,683**	0,616**				
<i>Br</i>	0,599**	0,560**	-0,038	0,103			
<i>Sr</i>	0,284	0,446*	0,427*	0,488*	0,128		
<i>Rb</i>	0,406*	0,539**	0,185	0,198	0,590**	0,436*	
<i>Ca</i>	0,168	0,460*	0,730**	0,565**	0,205	0,493*	0,449*

* Корреляция значима на уровне 0,05.

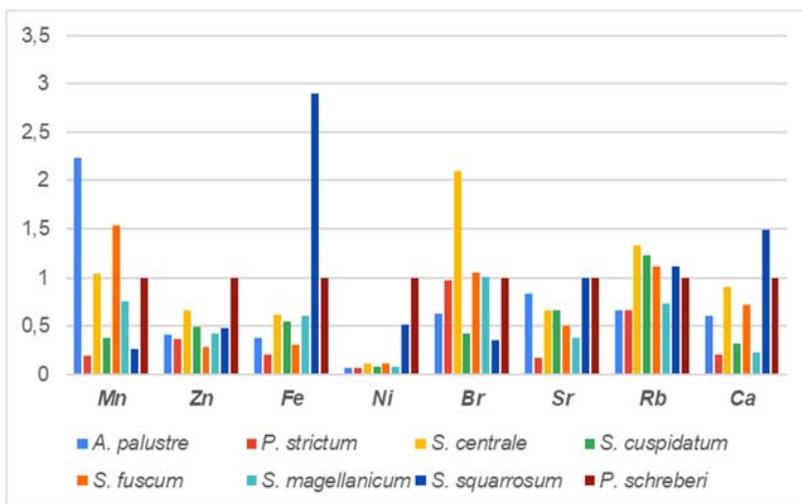
** Корреляция значима на уровне 0,01.

Для интерпретации результатов проведен факторный анализ, показавший, что на накопление во мхах изученных элементов влияет два фактора. Первый предположительно связан с водной миграцией элементов и отвечает за привнос *Zn*, *Ni*, *Fe*, *Sr* и *Ca*, поскольку максимальные значения для них были отмечены у образцов, приуроченных к обводненным понижениям микрорельефа. Вторым фактором может быть влияние морского аэрозоля, который служит источником накопления *Mn*, *Br* и *Rb* [24].

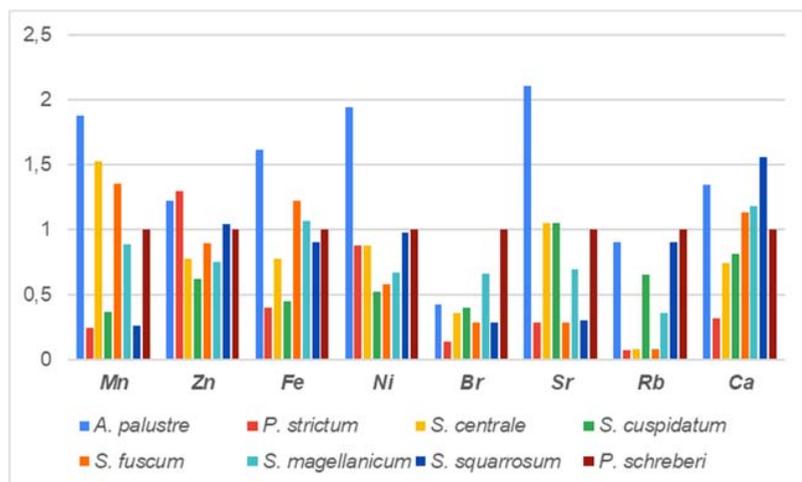
Аккумуляционная способность мохообразных определялась с помощью индексов, которые представляют собой отношения содержания *i*-го элемента в болотных мхах к концентрации их же в эталонном виде *Pleurozium schreberi* по формуле 1:

$$I_k = C_{i(\text{mox})} : C_{i(\text{P. schreberi})} \quad (1)$$

О близости аккумулярующих способностей мхов можно говорить в случае, если значение рассчитанного индекса близко к 1. На рисунке 3 представлена диаграмма распределения, которая демонстрирует количественное соотношение содержания микроэлементов в исследуемых видах мхов по сравнению с эталонным видом.



a



б

Рис. 3. Аккумуляционные способности мохообразных: а – на ББ; б – ТВ по отношению к эталонному виду *Pleurozium schreberi*

Выделить конкретные виды мохообразных, похожие на эталонный, сложно, однако из рисунка 3 можно сделать выводы о том, что практически аналогичной накопительной способностью на ББ обладают виды *Aulacomnium palustre*, *Sphagnum centrale* и *S. magellanicum* (рис. 3, а), тогда как на ТВ сходными с *Pleurozium schreberi* по аккумуляционным способностям могут считаться *Aulacomnium palustre* и *Sphagnum centrale* (рис. 3, б).

Стоит отметить виды, аккумуляционные способности которых выделяются на двух территориях исследования: это *Aulacomnium palustre* и *Sphagnum centrale*.



Аккумуляционная способность вида *Aulacomnium palustre* доказана рядом исследований [29; 30], в том числе в работе авторов [15]. Результаты нынешнего анализа коррелируют с данными предыдущего [15], дополняя их информацией о новых потенциально индикаторных видах мохообразных.

Полученные результаты коррелируют с данными ранних исследований [15; 29; 30], подтверждая высокую аккумулятивную способность *Aulacomnium palustre*. Рассматриваемый вид, имея обильный ризоидный войлок по всему побегу [29], способен активно накапливать в себе различные элементы. Вероятно, произрастание в мало нарушенной экосистеме ББ с относительно стабильным высоким уровнем обводнения не требует от растения концентрирования значительного количества элементов. Однако при попадании в «стрессовую» среду ТВ, где отмечены значительные колебания уровня болотных вод [16], *A. palustre* демонстрирует повышенную способность к накоплению элементов (полученные концентрации практически всех элементов, за исключением *Mn* для данного вида выше на ТВ).

У сфагновых мхов в целом нами отмечена более низкая способность к накоплению элементов, чем у *Pleurozium schreberi*, что согласуется и с данными по Центральной России [8]. Тем не менее следует отметить способность *Sphagnum centrale* к аккумуляции некоторых элементов, таких как марганец, цинк, бром, рубидий и кальций.

Таким образом, виды *Aulacomnium palustre* и *Sphagnum centrale* при дальнейшем изучении их аккумулярующих способностей могут быть рекомендованы в качестве индикаторов состояния атмосферного воздуха. Данные виды накапливают изученные элементы подобно эталонному *Pleurozium schreberi*.

Выводы

1. Средние содержания марганца, цинка, железа, никеля, брома, стронция, рубидия и кальция на торфяниках разной степени антропогенной нарушенности соответствуют нормальному уровню. Наиболее трансформированный ВТ характеризуется сниженным уровнем содержания элементов в мхах по сравнению с наименее затронутой антропогенным воздействием экосистемой ББ. Особенно это заметно для марганца, никеля, брома и рубидия.

2. На торфяниках разной степени антропогенной нагрузки отмечены значимые различия в накоплении *Mn*, *Zn*, *Ni*, *Br* и *Rb*, в то время как *Fe*, *Sr* и *Ca* концентрируются примерно одинаково.

3. Аккумуляционные способности видов *Aulacomnium palustre* и *Sphagnum centrale* в отношении изученных элементов подобна эталонному виду *Pleurozium schreberi*, что говорит о возможности их использования в качестве индикаторов загрязнения атмосферного воздуха.

Работа выполнена в рамках государственного задания БФУ им. И. Канта по теме НИР «Климатический мониторинг природных и антропогенных систем Калининградской области в условиях глобальных изменений окружающей среды» в части реализации проекта Министерства науки и высшего образования РФ по созданию карбоновых полигонов. Авторы благодарят рецензентов за ценные замечания и предложения на стадии подготовки статьи.



Список литературы

1. Bozau E., Lojen S., Zupančič N. The peat bog at Zinnwald-Georgenfeld revisited after 25 years: Geochemical investigation of water, Sphagnum moss and peat cores // *Geochemistry*. 2022. Vol. 82, №1. P. 125823. doi: 10.1016/j.chemer.2021.125823.
2. Aceto M., Abollino O., Conca R. et al. The use of mosses as environmental metal pollution indicators // *Chemosphere*. 2003. Vol. 50. P. 333–342. doi: 10.1016/S0045-6535(02)00533-7.
3. García-Seoane R., Antelo J., Fiol S. et al. Unravelling the metal uptake process in mosses: Comparison of aquatic and terrestrial species as air pollution biomonitors // *Environmental Pollution*. 2023. Vol. 333. P. 122069. doi: 10.1016/j.envpol.2023.122069.
4. Frontasyeva M., Galinskaya T. Ye, Krmar M. et al. Atmospheric deposition of heavy metals in northern Serbia and Bosnia-Herzegovina studied by the moss biomonitoring, neutron activation analysis and GIS technology // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2004. Vol. 259, №1. P. 141–144. doi: 10.1023/b:jrnrc.0000015819.67830.60.
5. Dyderski M. K., Czapiewska N., Zajdler M. et al. Functional diversity, succession, and human-mediated disturbances in raised bog vegetation // *Science of The Total Environment*. 2016. Vol. 562. P. 648–657. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.04.102.
6. Harmens H., Norris A. D., Steinnes E. et al. Mosses as biomonitors of atmospheric heavy metal deposition: spatial patterns and temporal trends in Europe // *Environmental Pollution*. 2010. Vol. 158. P. 3144–3156. doi: 10.1016/j.envpol.2010.06.039.
7. Harmens H., Norris D., Mills G. Heavy metals and nitrogen in mosses: spatial patterns in 2010/2011 and long-term temporal trends in Europe // *NERC/Centre for Ecology & Hydrology*. 2013. doi: icpvegetation.ceh.ac.uk.
8. Gorelova S. V., Frontasyeva M. V., Volkova E. V. et al. Trace element accumulating ability of different moss species used to study atmospheric deposition of heavy metals in Central Russia: Tula region case study // *International Journal of Biology and Biomedical Engineering*. 2016. Vol. 10. P. 271–285.
9. Rühling Å. Atmospheric heavy metal deposition in Europe 1995–1996. Nordic Council of Ministers, 1998.
10. Королева Ю. В. Биоиндикация атмосферных выпадений тяжелых металлов на территории Калининградской области // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки*. 2010. №7. С. 39–44. EDN: MSYOOH.
11. Королева Ю. В. Использование мхов *Hylocomium splendens* и *Pleurozium schreberi* для оценки абсолютных значений атмосферных выпадений тяжелых металлов в Калининградской области // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки*. 2006. №7. С. 29–34. EDN: HVSBFR.
12. Frontasyeva M., Harmens H., Uzhinskiy A. et al. Mosses as biomonitors of air pollution: 2015/2016 survey on heavy metals, nitrogen and POPs in Europe and beyond. Dubna, 2020. doi: 10.13140/RG.2.2.30159.71848.
13. Ананян А. С., Королева Ю. В., Алексеенок Ю. В. Биомониторинг тяжелых металлов на территории Калининградской области // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2020. Т. 12, №102. С. 25–31. doi: 10.23670/IRJ.2020.102.12.038.
14. Напреенко М. Г. Флора и растительность верховых болот Калининградской области : дис. ... канд. биол. наук. Калининград, 2002.



15. Баймуратов Р. А., Напреенко М. Г., Королева Ю. В. Аккумуляционные способности мохообразных нарушенных торфяников (на примере карбонового полигона в Калининградской области) // Russian Journal of Earth Sciences. 2023. Т. 23, №4. С. ES4002. doi: 10.2205/2023es000873.
16. Antsiferova O., Napreenko M., Napreenko-Dorokhova T. Transformation of soils and mire community reestablishment potential in disturbed abandoned peatland: A case study from the Kaliningrad Region, Russia // Land 2023. Vol. 12. P. 1880. doi: 10.3390/land12101880.
17. European surveys of heavy metal accumulation in mosses. 2017. doi: <https://isrvegetation.ceh.ac.uk/ourscience/heavy-metals> (дата обращения: 04.09.2024).
18. Напреенко М. Г., Напреенко-Дорохова Т. В., Карелина В. И., Пеленс Е. Д. Мониторинг видового состава и эколого-ценотических характеристик сфагновых мхов на карбоновом полигоне «Росьянка» (Калининградская область) // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2022. №1. С. 73–87. EDN: MHDSQQ.
19. Савич-Любичуца Л. И., Смирнова З. Н. Определитель сфагновых мхов СССР. Л, 1968.
20. Dierssen K. Bestimmungsschlüssel der Torfmoose in Norddeutschland. Mitt. d. Arbeitsgemeinschaft Geobotanik in Schleswig-Holstein und Hamburg. 1996. Bd. 50. S. 86.
21. Игнатов М. С., Игнатова Е. А. Флора мхов средней части европейской России // Арктоа. 2003. Vol. 11.
22. Hassel K., Kyrkjeeide M. O., Yousefi N. et al. Sphagnum divinum (sp. nov.) and S. medium Limpr. and their relationship to S. magellanicum Brid // Journal of Bryology. 2018. doi: 10.1080/03736687.2018.1474424.
23. Shaw A. J., Piatkowski B., Duffy A. M. et al. Phylogenomic structure and speciation in an emerging model: the *Sphagnum magellanicum* complex (Bryophyta) // New Phytologist. 2022. Vol. 236. P. 1497–1511. doi: 10.1111/nph.18429.
24. Koroleva Y., Napreenko M., Baymuratov R., Schefer R. Bryophytes as a bioindicator for atmospheric deposition in different coastal habitats (a case study in the Russian sector of the Curonian Spit, South-Eastern Baltic) // International Journal of Environmental Studies. 2019. Vol. 77, №1. P. 152–162. doi: 10.1080/00207233.2019.1594301.
25. Stafilov T., Šajin R., Barandovski L. et al. Moss biomonitoring of atmospheric deposition study of minor and trace elements in Macedonia // Air Quality, Atmosphere and Health. 2018. Vol. 11. P. 137–152. doi: 10.1007/s11869-017-0529-1.
26. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях / под ред. Ю. Е. Саета : пер. с англ. Д. В. Гричук, Е. П. Янина. М., 1989.
27. Kempter H., Krachler M., Shotyky W., Zaccone C. Validating modelled data on major and trace element deposition in southern Germany using Sphagnum moss // Atmospheric Environment. 2017. Vol. 167. P. 656–664. doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.08.037.
28. Nagajyoti P. C., Lee K. D., Sreekanth T. V. M. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review // Environmental Chemistry Letters. 2010. Vol. 8, №3. P. 199–216. doi: 10.1007/s10311-010-0297-8.
29. Ryzhakova N. K., Rogova N. S., Borisenko A. L. Research of mosses accumulation properties used for assessment of regional and local atmospheric pollution // Environmental Research, Engineering and Management. 2014. Vol. 69, №3. P. 84–91. doi: 10.5755/j01.ere.m.69.3.5566.



30. Рогова Н. С., Рыжкова Н. К., Борисенко А. Л., Меркулов В. Г. Изучение аккумуляционных свойств мхов, используемых при мониторинге загрязнения атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24, № 1. С. 79.

Об авторах

Рашид Александрович Баймуратов – асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: baimuratov_rashid@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8439-809X

SPIN-код: 2174-6464

Максим Геннадьевич Напреенко – канд. биол. наук, ведущ. науч. сотр. Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: maxnapr@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0889-7276

SPIN-код: 7955-3719

Арина Алексеевна Шангина – студ., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: shanginaarina@yandex.ru

R. A. Baymuratov, M. G. Napreenko, A. A. Shangina

ELEMENT ACCUMULATION IN BRYOPHYTES IN PEATLAND ECOSYSTEMS OF THE KALININGRAD REGION, RUSSIA

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

Received 24 November 2024

Accepted 25 January 2025

doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-4

To cite this article: Baymuratov R. A., Napreenko M. G., Shangina A. A., 2025, Element accumulation in bryophytes in peatland ecosystems of the Kaliningrad region, Russia, *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural and Medical Sciences*, № 1. P. 58 – 70. doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-4.

The results of studying the accumulation capabilities of mosses in two peatland ecosystems with different levels of disturbance in the Kaliningrad region – on the Bolshoye bog and the Wittgiren peatland – are presented. The study focused on widely distributed species of mosses: Aulacomnium palustre, Polytrichum strictum, Sphagnum centrale, S. cuspidatum, S. fuscum, S. magellanicum, and S. squarrosum, as well as the reference species Pleurozium schreberi. Using X-ray fluorescence spectroscopy, the content of eight macro- and microelements (Mn, Zn, Ni, Fe, Br, Rb, Sr, and Ca) was determined. Statistically significant differences were found in the concentrations of Mn, Zn, Ni, Br, and Rb in the mosses. A high correlation was observed



between iron and calcium, which may indicate a common source of these elements entering the plants. The moss species *Aulacomnium palustre* and *Sphagnum centrale* were identified as having accumulation capabilities similar to the reference species *Pleurozium schreberi*.

Keywords: element accumulation, bryophyte, disturbed peatlands, biomonitoring, X-ray fluorescence spectroscopy, Sphagnum, Kaliningrad region

The authors

Rashid A. Baimuratov, PhD student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: baimuratov_rashid@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8439-809X

SPIN-code: 2174-6464

Dr Maksim G. Napreenko, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: maxnapr@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0889-7276

SPIN-code: 7955-3719

Arina A. Shangina, student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: shanginaarina@yandex.ru