

АККУМУЛЯЦИОННЫЕ СПОСОБНОСТИ МОХООБРАЗНЫХ  
НАРУШЕННЫХ ТОРФЯНИКОВ (НА ПРИМЕРЕ КАРБОНОВОГО  
ПОЛИГОНА В КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ)Р. А. Баймуратов<sup>1</sup> , М. Г. Напреенко<sup>1</sup> , Ю. В. Королева<sup>1</sup> <sup>1</sup>Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия\* Контакт: М. Г. Напреенко, [maxnpr@gmail.com](mailto:maxnpr@gmail.com)

В работе представлены результаты изучения аккумуляционных способностей мохообразных сильно нарушенного торфяника Виттгирренского, являющегося испытательной площадкой карбонового полигона «Росьянка» в Калининградской области. Проведено сравнение накопительных способностей 13 видов мохообразных, типичных для торфяно-болотных местообитаний и отобранных на 7 репрезентативных площадках (*Aulacomnium palustre*, *Campylopus introflexus*, *Polytrichum commune*, *P. strictum*, *Sphagnum capillifolium*, *S. centrale*, *S. cuspidatum*, *S. fuscum*, *S. magellanicum*, *S. riparium*, *S. squarrosum*, *S. teres*) с эталонным видом *Pleurozium schreberi*. Методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии идентифицировано содержание во мхах макро- и микроэлементов: Ca, Mn, Fe, Ni, Zn, Br, Rb и Sr. Показано, что средние концентрации данных элементов в экосистеме торфяника Виттгирренского ниже регионального фонового уровня. Сравнение полученных результатов с данными по менее антропогенно изменённым болотным экосистемам показало значимую разницу между накоплением Mn, Ni, Br, Rb и Sr. Выявлены сопоставимые концентрации во мхах Fe и Zn, но уровень Mn в несколько раз ниже, чем на неразработанных под торфодобычу болотах. Для оценки состояния и степени загрязнения болотных экосистем предлагается использовать *Aulacomnium palustre* и *Polytrichum commune* как наиболее схожие по аккумуляционной способности с эталонным видом-индикатором загрязнения атмосферного воздуха *Pleurozium schreberi*.

**Ключевые слова:** аккумуляционные способности, мохообразные, нарушенные торфяники, рентгенофлуоресцентная спектроскопия, биомониторинг, сфагновые мхи, Калининградская область

**Цитирование:** 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. — ES4002. — DOI: <https://doi.org/10.2205/2023es000873>

Мохообразные являются криптогамными организмами, встречающимися практически во всех наземных экосистемах [Adamo и др., 2003]. Мхи способны активно накапливать различные элементы, что тесно связано с их анатомо-морфологическим строением [Ашихмина и др., 2008]. Особенности строения тела мохообразных можно назвать отсутствием корня, к субстрату растение прикрепляется с помощью ризоидов. Вследствие высокого значения отношения площади поверхности к объёму, относительно простого строения, отсутствия кутикульного слоя, а также водного и минерального питания из атмосферных осадений, относительно медленного отмирания фитомассы мхи накапливают различные элементы из атмосферного воздуха, концентрируя их в теле гаметофита [Мэннинг и Феддер, 1975; Hartens и др., 2015; Vuković и др., 2015]. Мхи можно использовать в процессе мониторинга радиоактивности приземного слоя воздуха [Бураева и др., 2013; Шиманская и др., 2013]. При определении способности к аккумуляции атмосферных выпадений немаловажным показателем является высокая толерантность мохообразных к изменениям окружающей среды [Hartens и др., 2010],

Получено: 12 июля 2023 г.

Принято: 18 сентября 2023 г.

Опубликовано: 5 октября 2023 г.



© 2023. Коллектив авторов.

при этом мхи являются чувствительными организмами к нарушениям газового состава атмосферы [Бардунов, 1984; Бураева и др., 2013].

Высокая аккумуляционная способность мохообразных показана в ряде научных трудов уже в 70-х гг. [Pakarinen и Tolonen, 1976; Rasmussen и Johnsen, 1976; Rühling и Skaerby, 1979; Rühling и др., 1970]. Были описаны и представлены преимущества использования мохообразных как индикаторных видов при оценке состояния окружающей среды (в т. ч. атмосферного воздуха). Эти преимущества объясняются простотой пробоотбора и пробоподготовки к аналитическим исследованиям, а также дешевизной из-за отсутствия необходимости использования дорогостоящего оборудования. Дальнейшие исследования, проводившиеся в период с 1990 по 2009 годы [Ашихмина и др., 2008; Berg и др., 1996; 1995; Fernández и Carballeira, 2001; Fernández и др., 1999; Frontasyeva и др., 2004; Galsomiès и др., 1999; Galuszka, 2006; Grodzińska и Szarek-Lukaszewska, 2001; Markert и др., 1994; Markert и Weckert, 1993; Onianwa, 2001; Steinnes и др., 1994; Zechmeister, 1998], помогли выделить наиболее подходящие виды мхов для оценки состояния атмосферного воздуха. Это такие виды, как: *Pleurozium schreberi*, *Hylocomium splendens*, *Pseudoscleropodium purum*, *Hypnum cupressiforme*. Исследования показали возможность использования данных видов в качестве биоиндикаторов, поскольку они обладают высокой аккумулярующей способностью загрязняющих веществ из атмосферного воздуха. В отечественной литературе первые сведения о накопительной способности мхов приводятся в работах Л. В. Бардунова [Бардунов, 1984].

Метод использования мхов как биоиндикаторов был утверждён в качестве инструмента в международной программе по исследованию воздействия загрязнения атмосферного воздуха на сельскохозяйственные культуры и естественную растительность ICP-Vegetation [European surveys of heavy metal accumulation in mosses, 2017]. Суть бриомониторинга сводится к оценке степени загрязнения атмосферного воздуха и почв различными поллютантами по их концентрации в моховом покрове [Fernández и Carballeira, 2002]. Важно, что при анализе мхов собирается и используется верхний прирост, что препятствует гибели мха как растения [Ковалевский, 1991; Нифонтова, 1997; Ávila-Pérez и др., 2018; González и Pokrovsky, 2014; Manninen и др., 2013; Viana и др., 2014]. Таким образом, роль биоиндикации с помощью мохообразных в современных исследованиях загрязнения окружающей среды заметно возрастает. Как особое направление бриомониторинга выделено исследование накопительной способности сфагновых мхов на торфяно-болотных местообитаниях [Astolfi и др., 2023; Kempter и др., 2017], которые могли бы использоваться для оценки аккумуляции элементов из атмосферных выпадений в торфах.

Аккумуляционные способности мхов на территории Калининградской области исследуются с 1995 года [Ананян и др., 2020; Королева, 2006; 2010; Frontasyeva и др., 2020; Rühling и др., 1998]. Большая часть мониторинговых работ проводилась на лесных территориях, тогда как накопление сфагновыми мхами атмосферных выпадений в экосистемах верховых болот региона изучено ещё недостаточно. На территории региона верховые болота являются малонарушенными, природными образованиями, выполняющими ряд функций, среди которых можно выделить регулирование водного баланса и геохимического режима атмосферы, сохранение видового разнообразия, аккумуляцию органического вещества в виде торфа [Напреенко и др., 2021]. При этом особенностью болот региона является высокий показатель разнообразия видов Bryophyta [Напреенко, 2015].

Цель данного исследования – изучение аккумулярующей способности мохообразных торфяно-болотных экосистем Калининградской области к некоторым химическим элементам, включая тяжёлые металлы (Ca, Mn, Fe, Ni, Zn, Br, Rb и Sr). Рассматривались количественные характеристики макро- и микроэлементов растений (Ca, Mn, Fe, Zn), а также тех, которые могут их замещать (Rb, Sr). Поскольку в регионе очень сильно влияние морского аэрозоля [Королева и др., 2019], Br выступал как индикатор влияния моря.

В качестве ключевого биотопа был выбран торфяник Виттгирренский (рис. 1), являющийся площадкой комплексных экологических исследований (карбоновым полигоном) [Карбоновый полигон «Росьянка». Научно-образовательный проект по изучению климатически активных парниковых газов, 2021].

## 1. Материал и методы

### 1.1. Территория исследования

Торфяник Виттгирренский расположен в Славском районе, на площади 122 га (рис. 1). Первичная болотная растительность торфяника практически полностью уничтожена в процессе интенсивной фрезерной торфодобычи, проводившейся в 1970–1980-х гг. С 90-х годов XX века и до сегодняшнего времени торфяник является заброшенным. В 2021 г. торфяник Виттгирренский включён в программу развития карбоновых полигонов России: на его территории открыт карбоновый полигон «Росьянка» [Карбоновый полигон «Росьянка». Научно-образовательный проект по изучению климатически активных парниковых газов, 2021], одной из главных целей которого является изучение потоков климатически активных газов и испытание технологий контроля углеродного баланса [Напреенко и др., 2022a].

С точки зрения изучения аккумулирующей способности мхов, данная территория интересна тем, что сфагновые мхи являются важным компонентом восстанавливающейся растительности торфяников и могут влиять на потоки парниковых газов на этих местообитаниях [Barry и др., 2023; Tetmink и др., 2023]. Таким образом, появляется необходимость определения фоновых значений некоторых элементов, что позволит реализовать внедрение территории в мониторинговую сеть.

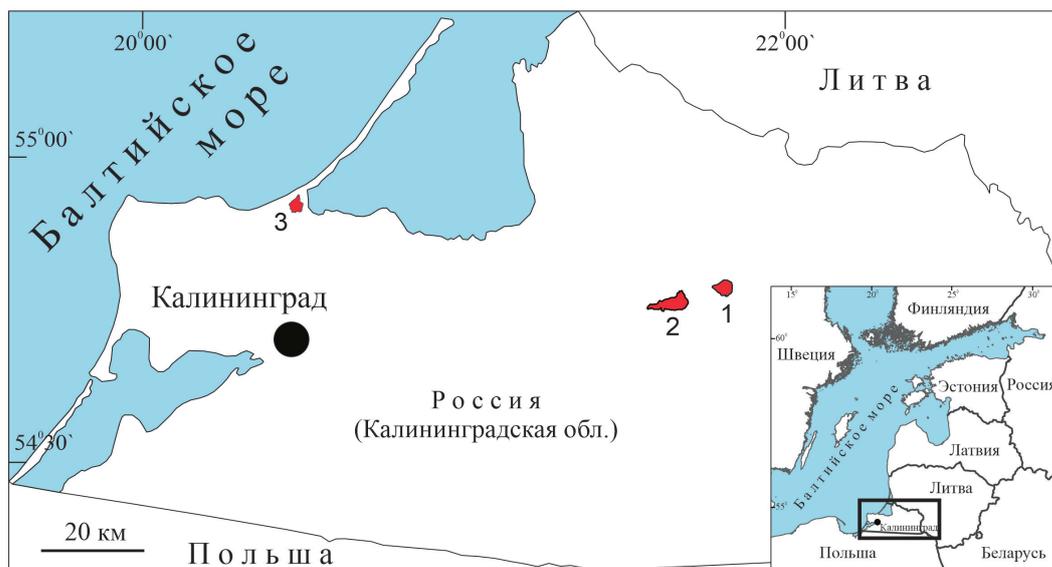


Рис. 1. Расположение изучаемого объекта – торфяника Виттгирренского (1) и торфяных болот, упоминаемых в тексте: болота Большого (2) и болота Свиного (3).

### 1.2. Сбор образцов мохообразных

Отбор проб осуществляли на основе рекомендаций по отбору проб в рамках международной программы по воздействию загрязнения воздуха на естественную растительность и сельскохозяйственные культуры ICP-Vegetation [European surveys of heavy metal accumulation in mosses, 2017]. С площадок размером  $10 \times 10 \text{ м}^2$ , выбранных в связи с высокой встречаемостью на них мохообразных [Напреенко и др., 2022b], было отобрано 24 усреднённых пробы. Пробы отбирали с разных мест: непосредственно с почвенного покрова, с разлагающейся древесины, из канав на различной глубине (стенка канавы, дно канавы) (табл. 1). Количество исследованных видов мохообразных – 13: *Aulacomnium palustre*, *Campylopus introflexus*, *Pleurozium schreberi*, *Polytrichum*

*commune*, *P. strictum*, *Sphagnum capillifolium*, *S. centrale*, *S. cuspidatum*, *S. fuscum*, *S. magellanicum*, *S. riparium*, *S. squarrosum*, *S. teres* (рис. 2).

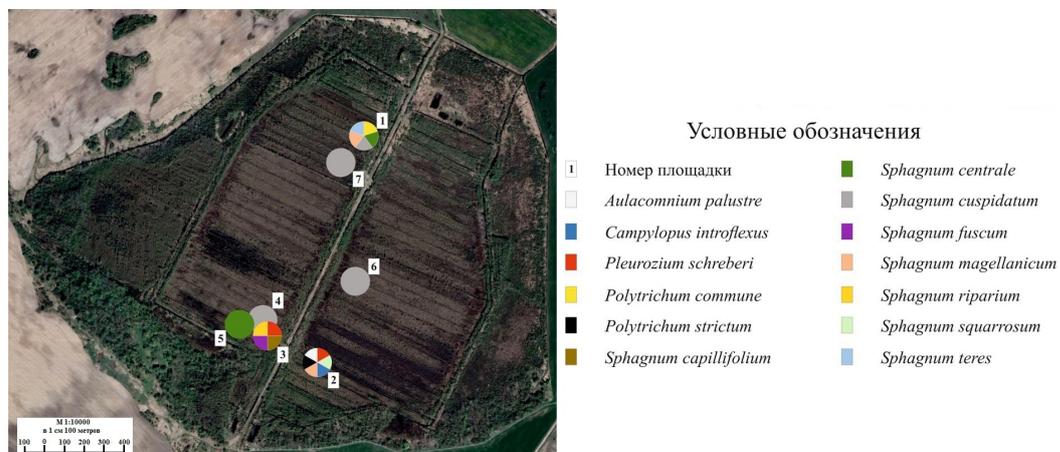


Рис. 2. Площадки отбора проб на торфянике Виттиргренском (топографическая основа: Google Earth, 2022 г.).

Таблица 1. Описание площадок отбора проб на торфянике Виттиргренском

№	Растительный покров	Особенности микрорельефа	Виды мохообразных
1	Топяной участок с <i>Juncus effusus</i> и <i>Salix cinerea</i>	Повышение на краю топяного участка Основание кавальера вдоль осушительной канавы (повышение)	<i>Polytrichum commune</i> , <i>Sphagnum cuspidatum</i> , <i>Sphagnum teres</i> <i>Polytrichum commune</i> , <i>Sphagnum centrale</i> , <i>Sphagnum magellanicum</i>
2	Березняк сухой с <i>Phragmites australis</i> и <i>Calluna vulgaris</i>	Карта торфоразработки (повышение) Глубокая канава с <i>Juncus effusus</i> и <i>Salix cinerea</i>	<i>Aulacomnium palustre</i> , <i>Campylopus introflexus</i> , <i>Pleurozium schreberi</i> <i>Polytrichum strictum</i> , <i>Sphagnum magellanicum</i> , <i>Sphagnum squarrosum</i>
3	Берёзовая поросль разреженная низкорослая со сфагнами, <i>Eriophorum vaginatum</i> , <i>Calluna vulgaris</i> и <i>Carex rostrata</i>	Карта торфоразработки (повышение) Осушительная канава	<i>Pleurozium schreberi</i> , <i>Sphagnum capillifolium</i> , <i>Sphagnum fuscum</i> , <i>Sphagnum riparium</i> <i>Pleurozium schreberi</i>
4	Обводнённое понижение с <i>Juncus effusus</i>	Понижение на карте торфоразработки	<i>Sphagnum cuspidatum</i>
5	Участок с кочками <i>Eriophorum vaginatum</i>	Межкочечное понижение	<i>Sphagnum centrale</i>
6	Осушительная канава с <i>Eriophorum vaginatum</i> и фрагментами сфагнового покрова	Дно канавы	<i>Sphagnum cuspidatum</i>
7	Осушительная канава с <i>Eriophorum vaginatum</i> и сплошным сфагновым покровом	Нижняя часть канавы	<i>Sphagnum cuspidatum</i>

Образцы мхов предварительно изучали в полевых условиях визуально с помощью лупы геологической 20×. Для определения мхов в лабораторных условиях подготавливались микропрепараты частей растений с использованием стереомикроскопа Альтами СМ0745-Т. Просмотр осуществляли под микроскопом «Микромед-3» и «Olympus CX-33» при увеличении 100×, 400× и 600×. Для видового определения использовали ряд определителей [Носкова, 2016; Daniels u Eddy, 1985; Dierßen, 1996]. Латинские названия видов даны в соответствии со списком видов Восточной Европы и Северной Азии [Ignatov u др., 2006].

### 1.3. Лабораторная подготовка проб и химический анализ

Отобранные виды мохообразных упаковывали в полиэтиленовые пакеты и после доставки в лабораторию пробы подвергли механической очистке и сушке в бумажных пакетах до постоянного веса при 40 °С [Koroleva u др., 2019]. Анализ проб проводили на рентгенофлуоресцентном спектрометре Спектроскан Мах G (Санкт-Петербург, Россия, НПО Спектрон). Образцы мхов измельчали в порошкообразное состояние, 0,25 г которых прессовали в таблетки, основанием которых служит борная кислота. 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 берёзы, SSS 8923-2007.

### 1.4. Статистическая обработка данных

Для выявления особенностей и закономерностей содержания микроэлементов в изученных видах мхов были использованы методы описательной математической статистики, корреляционный анализ. Взаимосвязь между элементами, аккумулярованными мхами, определяли с использованием коэффициента корреляции Спирмена.

Для статистических расчетов использовалось программное обеспечение Microsoft Excel и IBM SPSS Statistics 23, картографический материал выполнен в программах QGIS Desktop 3.16.0, CorelDRAW 2019 (64-Bit).

## 2. Результаты и их обсуждение

В ходе проведённого исследования в образцах мохообразных установлены концентрации Ca, Mn, Fe, Ni, Zn, Br, Rb и Sr (табл. 2).

Содержание элементов во мхах торфяника варьирует в широких пределах, что особенно заметно для накопления мхами рубидия, брома, стронция (соответственно 131, 94, 80%), а также марганца и никеля (62 и 68%). Наибольшее сродство к рубидию установлено для *Polytrichum commune*, стронцию, марганцу, никелю, железу – *Aulacomnium palustre*, бромю – *Sphagnum capillifolium*. В отношении цинка и кальция присутствует относительная однородность. *Pleurozium schreberi*, *Polytrichum commune* и *Aulacomnium palustre*, которые произрастают в примерно схожих условиях, в нашем случае на повышениях микрорельефа, накапливают бром, стронций, рубидий и никель несколько сильнее, чем другие виды. Это обстоятельство может послужить основанием для применения видов наряду с эталонным в мониторинге.

Характер зависимости между содержанием элементов во мхах определили с помощью непараметрического метода, используя коэффициент корреляции Спирмена (табл. 3). В соответствии со шкалой Чеддока теснота связи оценивается как слабая, если коэффициент корреляции менее 0,3; умеренная от 0,3 до 0,5; заметная от 0,5 до 0,7; высокая от 0,7 до 0,9; весьма высокая – более 0,9.

**Таблица 2.** Среднее содержание элементов в различных видах мхов на торфянике Виттгиренском

Виды мохообразных	Mn	Fe	Ni	Zn	Br	Rb	Sr	Ca
	мкг/г							%
<i>Aulacomnium palustre</i>	107	486	2,0	33	3,0	4,0	7,0	0,38
<i>Campylopus introflexus</i>	18	358	1,0	18	2,0	3,0	2,0	0,27
<i>Pleurozium schreberi</i>	57	302	1,0	27	6,0	4,0	3,0	0,28
<i>Polytrichum commune</i>	45	156	1,5	33	6,0	6,0	6,0	0,35
<i>Polytrichum strictum</i>	14	120	0,9	35	1,0	0,33	0,96	0,09
<i>Sphagnum capillifolium</i>	60	292	1,0	22	12	0,34	3,0	0,20
<i>Sphagnum centrale</i>	87	235	0,9	21	2,5	0,35	3,5	0,21
<i>Sphagnum cuspidatum</i>	21	137	0,53	17	2,8	2,9	3,5	0,23
<i>Sphagnum fuscum</i>	77	368	0,60	24	2,0	0,38	0,95	0,32
<i>Sphagnum magellanicum</i>	50	320	0,69	20	4,7	1,6	2,3	0,33
<i>Sphagnum riparium</i>	63	125	0,4	21	1,0	0,44	5,0	0,13
<i>Sphagnum squarrosum</i>	15	271	1,0	28	2,0	4	1,0	0,44
<i>Sphagnum teres</i>	44	367	0,08	21	2,0	0,34	2,0	0,23
Коэффициент вариации, %	62	51	68	31	94	131	80	37

**Таблица 3.** Коэффициент корреляции Спирмена (\* корреляция значима на уровне 0,05; \*\* корреляция значима на уровне 0,01) для торфяника Виттгиренского

Элементы	Mn	Zn	Fe	Ni	Br	Sr	Rb
Zn	0,48*						
Fe	0,55**	0,34					
Ni	0,17	0,45*	0,27				
Br	0,15	0,05	-0,06	0,47*			
Sr	0,19	0,03	-0,15	0,45*	0,64**		
Rb	-0,07	-0,02	-0,13	0,43*	0,53**	0,65**	
Ca	0,24	0,40	0,49*	0,46*	0,05	-0,02	0,09

Рассчитанные коэффициенты на торфянике Виттгиренском показывают умеренную корреляцию между элементами. Отчётливо наблюдается связь между накоплением железа и марганца, а также между щелочными и щёлочноземельными элементами.

Оценить аккумуляционные способности изученных видов можно, используя индекс, характеризующий концентрирование химических элементов относительно некоторого фонового значения. В нашем случае необходимо сравнить уровни накопления элементов болотными мхами с эталонным видом *Pleurozium schreberi*, который не относится к распространённым на болотах видам, но встречается на осушенных участках, а также на периферии болот. На торфянике Виттгиренском этот вид мха отобран с трёх площадок, схожих по уровню осушенности, но отличающихся типом микрорельефа и растительности. Несмотря на то, что территория торфяника мала и, с точки зрения атмосферного загрязнения, представляет собой единую площадку, концентрации изучаемых элементов в одном и том же виде могут варьировать. Это связано ещё и с геохимическим составом растительного покрова и особенностями выщелачивания растительного опада. Для оценки накопительных особенностей мхов использовали коэффициент обогащения:

$$K_c = \sum I_k - (n - 1),$$

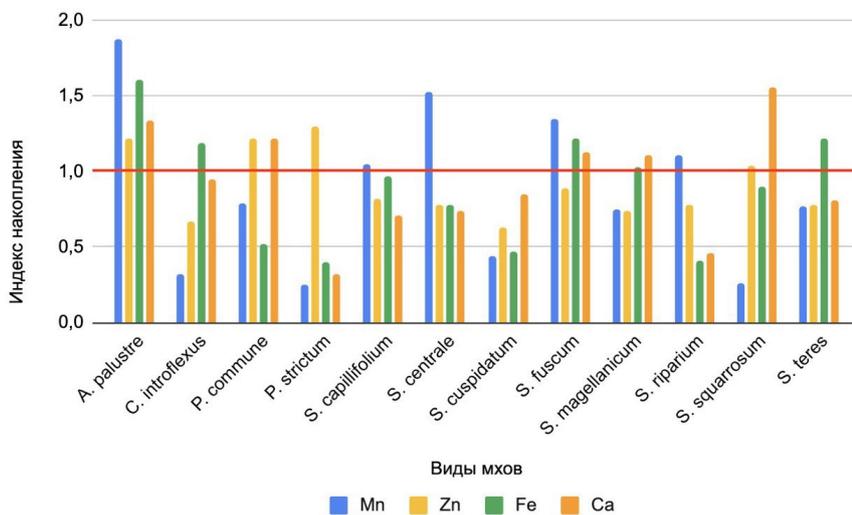
где  $I_k$  – индекс, показывающий отношение содержания элемента в образце к содержанию этого же элемента в *Pleurozium schreberi* (фон),  $n$  – количество микроэлементов.

Аккумуляционная способность мхов оценивалась при помощи индексов, представляющих собой отношение содержания  $i$ -го элемента в различных видах мохообразных

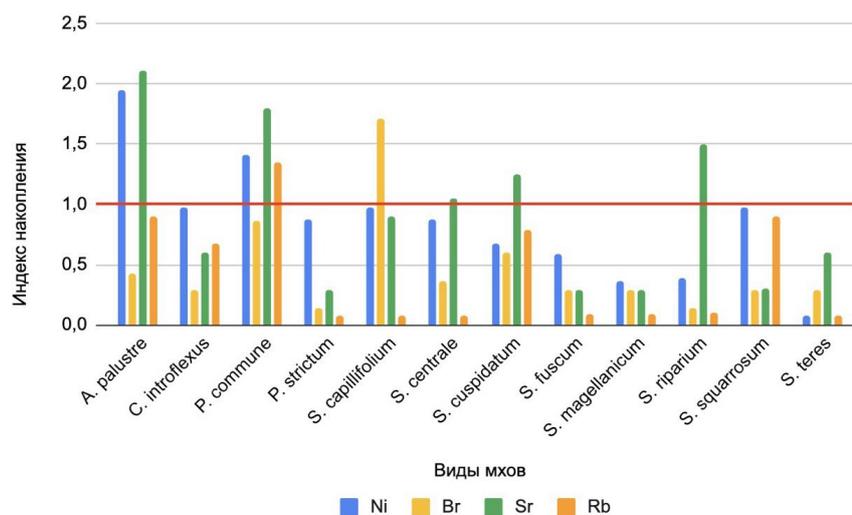
к концентрации их же в *Pleurozium schreberi*, высушенных до постоянного веса при 40 °С:

$$I_k = C_{i(\text{мох})} / C_{i(P. \text{schreberi})}$$

Полагается, что аккумулирующая способность мхов близка к эталонному виду в случае, если значения индексов близки к 1. Содержание микроэлементов в различных видах мхов, а также в образцах одного и того же вида, собранных с разных площадок, может варьировать в широких пределах. Это регулируется множеством факторов: как строением листовых пластинок, от которых зависит способность к поглощению микроэлементов, так и местообитанием, отношением к воде, почве, окружающей растительности. Поэтому при сравнении содержания микроэлементов относительно вида *Pleurozium schreberi*, по возможности (если количество образцов одного вида было 2 или больше) концентрации микроэлементов усреднялись. Распределительная диаграмма, иллюстрирующая количественно отношение содержания микроэлементов в изучаемых видах мхов по отношению к эталонному виду, представлена на рис. 3. Красная линия



(a)



(б)

**Рис. 3.** Сравнение индексов накопления элементов на торфянике Виттирренском различными видами мохообразных по отношению к *Pleurozium schreberi*.

на диаграмме – это базовая линия, относительно которой можно оценить, насколько эффективно тот или иной вид мха накапливает изучаемые элементы.

Диаграмма даёт визуальное представление о распределении, но выделить конкретные виды, обладающие сходными свойствами с эталонным видом, сложно, тем не менее, можно определить, какие элементы предпочитает тот или иной вид. В нашем случае с некоторой долей уверенности можно выделить *Aulacomnium palustre*, как вид, обладающий аналогичной аккумулярующей способностью как у *Pleurozium schreberi*.

Как показывают результаты сравнительных исследований разных территорий [Богданова и др., 2022], уровни содержания микроэлементов, в том числе жизненно важных, могут определяться и степенью антропогенного изменения исследуемых ландшафтов.

В нашем случае для понимания, насколько различия в количественных характеристиках территорий с разной степенью антропогенной трансформации значимы, мы сравнили концентрации этих элементов в разных экосистемах (табл. 4). Для этого выбрали экосистемы болот Большого и Свиного (рис. 1).

Большое болото слабо затронуто антропогенной деятельностью и сохранило в ненарушенном виде основные местообитания верхового болота. Оно расположено на площади 600 га в том же ландшафте, что и торфяник Виттгирренский, в 10 км к югу от него. Болото Свиное сильно осушено в ходе мелиорации, но не затронуто торфоразработкой, находится в 3 км на северо-восток от г. Зеленоградска, в 100 км к западу от торфяника Виттгирренского (площадь 150 га). Обе экосистемы имеют средообразующее значение [Напреенко, 2015].

Замещение некоторых жизненно важных ионов (например, на Br, Rb, Sr) может быть связано с токсичным действием избытка элементов. В более ранних исследованиях [Aulio, 1985; Wehr, 1983] показано, что поглощение металлов гидрофильными мхами, в том числе сфагнами, определяется, в первую очередь, концентрацией металлов в среде. Таким образом, несмотря на свою значимость, избыток микроэлементов может быть вызван непосредственно аккумуляцией их из загрязнённого пространства. Повышенное содержание некоторых элементов может быть признаком и антропогенного загрязнения.

Микроэлементы, в том числе и некоторые «тяжёлые» металлы (Mn, Fe, Zn), необходимы для нормального метаболического функционирования организмов, и их биохимическая утилизация в растительном организме может влиять на темпы накопления этих элементов [Kempter и др., 2017]. В то же время при недостатке или избытке они могут привести к физиологическому стрессу и иметь пагубные последствия [Nagajyoti и др., 2010]. Изменение содержания некоторых из них может быть связано с реакцией на стресс в результате загрязнения (Mn, Fe, Ni, Zn). Критические изменения могут быть установлены по соотношению антагонистических элементов, например Fe/Mn, Fe/Zn. В то же время поглощение мхами некоторых металлов активируется присутствием в среде некоторых других элементов, например Ca [Wehr, 1983].

**Таблица 4.** Среднее содержание макро- и микроэлементов в бриофитах болот Большого и Свиного, торфяника Виттгирренского, в лесных экосистемах Калининградской области

Статистические результаты	Mn	Fe	Ni	Zn	Br	Rb	Sr	Ca	Fe/Mn
	мкг/г							%	
торфяник Виттгирренский, n = 24	46	244	0,84	23	3,92	2,54	3,28	0,27	5,3
Большое болото, n = 16	180	250	1,14	29	10,9	4,07	2,79	0,18	1,4
Свиное болото, n = 5 [Koroleva и др., 2019],	105	229	2,38	24	4,76	13,4	3,33	0,24	2,2
Фоновое содержание по Калининградской области (по эталонным видам мхов) [Ананян и др., 2020]	245	861	2,33	52	5,46	16,9	14,4	0,44	3,5

Содержание марганца в мохообразных торфяника Виттгирренского более чем в 3 раза меньше, по сравнению с аналогичными образцами с болот Большого и Свиного, при этом содержание цинка и железа находится на том же уровне. В определённом смысле содержание марганца во мхах торфяника соответствует нормальному, достаточному уровню (20–300 мкг/г), но при соответствующих значениях железа, цинка и кальция (отсутствует отрицательная корреляция, табл. 3), можно предположить, что понижение накопления марганца связано с аккумуляцией других микроэлементов – антагонистов марганца. Оптимальное соотношение Fe/Mn для растений – 2:1, в нашем случае оно выше и в некоторых случаях значительно (в 3–9 раз), особенно для видов *Campylopus introflexus*, *Polytrichum strictum*, *Sphagnum cuspidatum*, *S. magellanicum*, *S. squarrosum*, *S. teres*. При дальнейшем изучении накопительной способности микроэлементов можно выявить сродство этих видов к определённым металлам. По литературным данным сфагнумы как яркие представители болотных экосистем, несмотря на проявление сорбционной активности к веществам катионной природы, не обладают выраженными индикаторными свойствами, но отражают геохимические особенности местности, на которой они произрастают [Межбор и Большунова, 2014; Шевченко и др., 2011; Gorelova и др., 2016]. Свиное болото, хоть и считается пересушенным, однако по антропогенному воздействию отличается от торфяника. Торфяник – антропогенно нарушенный объект, расположенный в относительно чистом (в понимании наличия источников загрязнения) месте Калининградской области. Свиное болото, расположенное в основании Куршской косы, находится в зоне влияния как линейных источников загрязнения (крайне интенсивное автомобильное движение), так и морского аэрозоля [Koroleva и др., 2019], поэтому бриофлора Свиного болота отличается более высоким содержанием никеля. В целом содержание жизненно важных элементов на торфянике ниже регионального фона.

Несмотря на то, что в исследовании изучается содержание ряда жизненно важных элементов (Ca, Mn, Fe, Zn), очевидно, что их содержание, даже в эталонных видах на торфянике, в целом ниже фоновых концентраций в регионе. Возможно, что мохообразные торфяника испытывают дисбаланс жизненно важных элементов вследствие антропогенного воздействия на них [Kabata-Пендиас и Пендиас, 1989; Bowen, 1979; Clark, 1977; Itoh и Yumura, 1979; McBride, 1978; Pais и др., 1977; Vyas и Mistry, 1981].

Тем не менее, для изучения накопительной способности, аналогичной эталонным видам, рассчитанный коэффициент обогащения на основе количественных характеристик жизненно важных элементов может быть использован эффективнее сравнительных диаграмм, потому что дает интегральную оценку. Если исходить из положения, что коэффициент для эталонного вида равен единице, то превышение его в несколько раз для иных видов может служить информацией для размышления о вероятной способности этих видов к пассивной или активной аккумуляции. Из представленных на торфянике видах мхов (за исключением *Pleurozium schreberi*), высокий коэффициент обогащения определён только для *Aulacomnium palustre* ( $Z_c = 5,1$ ) и *Polytrichum commune* ( $Z_c = 2,6$ ). Это не значит, что их можно использовать наравне с эталонными видами как биоиндикаторы атмосферного загрязнения, однако можно учитывать их сродство к определённым химическим элементам. По литературным данным повышенные содержания микроэлементов у эндогидратного вида *Polytrichum commune* могут быть связаны с поглощением их из почвы, в отличии от экзогидратного *Pleurozium schreberi* [Zawadzki и др., 2016]. *Aulacomnium palustre* по некоторым источникам также обладает высокими, особенно по сравнению со сфагновыми мхами, аккумуляционными способностями [Ryzhakova и др., 2014].

Относительно сфагновых мхов наши исследования сходны с данными, полученными для Центральной России [Gorelova и др., 2016]. Аккумулирующая способность разных видов сфагнов в среднем ниже показателей для *Aulacomnium palustre* и эталонного вида *Pleurozium schreberi*, поэтому они пока не могут быть рекомендованы для пассивного биомониторинга накопления микроэлементов. Тем не менее, по некоторым элементам (например, Mn, Sr) отдельные виды сфагнов показывают высокую накопи-

тельную способность. Кроме того, различия в накопительной способности разных видов сфагновых мхов могут быть использованы для сравнения геоэкологических особенностей разных местообитаний торфяников, а также различных по степени антропогенного пресса торфяно-болотных местообитаний.

Довольно низкие значения накопительной способности видов *Polytrichum* могут быть связаны с изучением нами лишь зелёной части растения (гаметофита), хотя, как показывают недавние исследования [Šoltés u Gregušková, 2013], представители этого рода (в частности, *Polytrichum commune*) показывают очень сильно дифференцированную накопительную способность в разных частях растения, например, в стеблях растения преимущественно накапливается цинк. Другие элементы (Ca, Mn, Sr) показывают максимум накопления в спорофите, при этом последние два элемента – в основном в спороносной коробочке.

Исследования видов *Sphagnum* и *Polytrichum*, как важных составляющих торфяно-болотных местообитаний, должны быть продолжены с учётом указанных аспектов.

### 3. Выводы

1. Содержание Mn, Fe, Ni, Zn, Br, Rb и Sr в мхах торфяника Виттгирренского значительно ниже регионального фонового уровня. Наибольшие концентрации этих элементов установлены в мхах видов *Aulacomnium palustre* и *Polytrichum commune*.

2. Содержание марганца в мхах экосистем торфяника Виттгирренского, болот Большого и Свиного значимо различается. На трансформированном торфянике концентрация марганца в мхах в 2 и более раз ниже, чем на территории сохранивших растительность верховых болот. Отмечена также разница в накоплении рубидия, стронция и брома, но эта разница невелика, хотя и значима.

3. Вследствие важности определённых элементов для нормальной жизнедеятельности растений и низких показателей их средних концентраций на торфянике Виттгирренском относительно болот Большого и Свиного, растительность торфяника может испытывать дефицит элементов. Отношение Fe/Mn превышает нормальный уровень в 3–9 раз в зависимости от вида мха. При этом утверждать, что речь идёт о «железной» токсичности нельзя, концентрация железа в мхах торфяника Виттгирренского в несколько раз ниже фоновых значений по области.

4. Аккумулирующая способность мхов *Aulacomnium palustre* и *Polytrichum commune*, собранных на территории торфяника Виттгирренского, в отношении изученных элементов сопоставима с эталонным видом *Pleurozium schreberi*, данные виды при дальнейшем изучении их накопительных свойств и отношения к основным поллютантам могут быть рекомендованы как индикаторы состояния верховых болот.

5. Уровень аккумуляции элементов у *Polytrichum strictum* и в видах рода *Sphagnum* ниже эталонного, но дальнейшие исследования могут выявить ряд видов, перспективных для биомониторинга отдельных микроэлементов и сравнительного мониторинга различных типов торфяно-болотных систем в условиях различного антропогенного воздействия.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования РФ по теме № FZWM-2023-0002. Авторы благодарят рецензентов за ценные замечания и предложения на стадии подготовки статьи.

### Список литературы

- Ананян А. С., Королева Ю. В., Алексеёнок Ю. В. и др. Биомониторинг тяжёлых металлов на территории Калининградской области // Международный научно-исследовательский журнал. — 2020. — Т. 12, № 102. — С. 25–31. — DOI: [10.23670/IRJ.2020.102.12.038](https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.102.12.038).
- Ашихмина Т. Я., Тимонок В. М., Большакова Е. В. и др. Мох *Pleurozium schreberi* как биоиндикатор загрязнения атмосферы в районе влияния объекта по уничтожению химического оружия // Естествознание и гуманизм: Сборник научных трудов. — Томск : Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2008. — С. 112–113.

- Бардунов Л. В. Древнейшие на суше / под ред. Ф. Э. Реймерс. — Новосибирск : Наука, 1984. — С. 157.
- Богданова Я. А., Прохорова Н. В., Вергель К. Н. и др. Особенности накопления тяжёлых металлов и металлоидов в фитомассе бокоплодного мха *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. в условиях Красносамарского лесного массива (Самарская область) и национального парка «Бузулукский бор» (Оренбургская область) // Самарский научный вестник. — 2022. — Т. 11, № 1. — С. 24–30. — DOI: [10.55355/snv2022111101](https://doi.org/10.55355/snv2022111101).
- Бураева Е. А., Стасов В. В., Малышевский В. С. и др. Сезонное поведение <sup>7</sup>Ве в приземном слое воздуха г. Ростова-на-Дону // Фундаментальные исследования. — 2013. — Т. 1. — С. 177–180.
- Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. — Москва : МИР, 1989. — С. 439.
- Карбоновый полигон «Росьянка». Научно-образовательный проект по изучению климатически активных парниковых газов. — 2021. — URL: <http://rosyanka.kantiana.ru/> (дата обр. 17.07.2023).
- Ковалевский А. Л. Биогеохимия растений. — Наука, 1991. — С. 290.
- Королева Ю. В. Биоиндикация атмосферных выпадений тяжёлых металлов на территории Калининградской области // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. — 2006. — Т. 7. — С. 39–44.
- Королева Ю. В. Использование мхов *Hylocomium splendens* и *Pleurozium schreberi* для оценки абсолютных значений атмосферных выпадений тяжёлых металлов в Калининградской области // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. — 2010. — Т. 7. — С. 29–34.
- Межибор А. М., Большунова Т. С. Биогеохимическая характеристика сфагновых мхов и эпифитных лишайников в районах нефтегазодобывающего комплекса Томской области // Известия Томского политехнического университета. — 2014. — Т. 325, № 1. — С. 205–213.
- Мэннинг У. Д., Феддер У. А. Биомониторинг загрязнения атмосферы с помощью растений. — Ленинград : Гидрометеиздат, 1975. — С. 141.
- Напреенко М. Г. Болотные экосистемы // Природа Калининградской области. Водные объекты. — Калининград : Исток, 2015. — С. 56–76. — (справочное пособие).
- Напреенко М. Г., Анциферова О. А., Напреенко-Дорохова Т. В. и др. Реконструкция изменений климата и углеродного баланса как задача карбоновых полигонов (на примере карбонового полигона «Росьянка» в Калининградской области) // Сборник материалов международной научно-исследовательской конференции «Эмиссия парниковых газов сегодня и в геологическом прошлом: источники, влияние на климат и окружающую среду». — Казань : Казанский федеральный университет, 2022а. — С. 32.
- Напреенко М. Г., Напреенко-Дорохова Т. В., Карелина В. И. и др. Мониторинг видового состава и эколого-ценотических характеристик сфагновых мхов на карбоновом полигоне «Росьянка» (Калининградская область) // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. — 2022б. — Т. 1. — С. 73–87.
- Напреенко М. Г., Самерханова А. К., Анциферова О. А. и др. Экологическая реабилитация водно-болотных экосистем в рамках функционирования карбонового полигона в Калининградской области // Изучение водных и наземных экосистем: история и современность. Международная научная конференция, посвящённая 150-летию Севастопольской биологической станции — Института биологии южных морей имени А. О. Ковалевского и 45-летию НИС «Профессор Водяницкий», 13–18 сентября 2021 г. — Севастополь : Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН, 2021. — С. 641–642.
- Нифонтова М. Г. Динамика содержания долгоживущих радионуклидов в мохово-лишайниковой растительности // Экология. — 1997. — Т. 4. — С. 273–277.
- Носкова М. Г. Полевой атлас-определитель сфагновых мхов таёжной зоны Европейской России. — Тула : Аквариус, 2016. — С. 112.
- Шевченко В. П., Филиппов Д. А., Гордеев В. В. и др. Содержание тяжёлых металлов в сфагновых мхах Вологодской области // Современные проблемы науки и образования. — 2011. — Т. 4.
- Шиманская Е. И., Вардуни Т. В., Вьюхина А. А. и др. Разработка метода биотестирования недифференцированных факторов среды для территорий, приуроченных к зонам активных тектонических разломов, на основе анализа распределения морфологических изменений у ценозообразующих видов деревьев // Фундаментальные исследования. — 2013. — Т. 6. — С. 1778–1813.
- Adamo P., Giordano S., Vingiani S., et al. Trace element accumulation by moss and lichen exposed in bags in the city of Naples (Italy) // Environmental Pollution. — 2003. — Vol. 122, no. 1. — P. 91–103. — DOI: [10.1016/s0269-7491\(02\)00277-4](https://doi.org/10.1016/s0269-7491(02)00277-4).
- Astolfi M. L., Massimi L., Rapa M., et al. A multi-analytical approach to studying the chemical composition of typical carbon sink samples // Scientific Reports. — 2023. — Vol. 13, no. 1. — P. 1–12. — DOI: [10.1038/s41598-023-35180-x](https://doi.org/10.1038/s41598-023-35180-x).

- Aulio K. Metal accumulation capacity of five species of Sphagnum moss // *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. — 1985. — Vol. 35, no. 1. — P. 439–442. — DOI: [10.1007/bf01636535](https://doi.org/10.1007/bf01636535).
- Ávila-Pérez P., Longoria-Gándara L. C., García-Rosales G., *et al.* Monitoring of elements in mosses by instrumental neutron activation analysis and total X-ray fluorescence spectrometry // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. — 2018. — Vol. 317, no. 1. — P. 367–380. — DOI: [10.1007/s10967-018-5896-z](https://doi.org/10.1007/s10967-018-5896-z).
- Barry A., Ooi S. K., Helton A. M., *et al.* Carbon Dynamics Vary Among Tidal Marsh Plant Species in a Sea-level Rise Experiment // *Wetlands*. — 2023. — Vol. 43, no. 7. — DOI: [10.1007/s13157-023-01717-z](https://doi.org/10.1007/s13157-023-01717-z).
- Berg T., Pedersen U., Steinnes E. Environmental indicators for long-range atmospheric transported heavy metals based on national moss surveys // *Environmental Monitoring and Assessment*. — 1996. — Vol. 43, no. 1. — P. 11–17. — DOI: [10.1007/BF00399567](https://doi.org/10.1007/BF00399567).
- Berg T., Røyset O., Steinnes E., *et al.* Atmospheric trace element deposition: Principal component analysis of ICP-MS data from moss samples // *Environmental Pollution*. — 1995. — Vol. 88, no. 1. — P. 67–77. — DOI: [10.1016/0269-7491\(95\)91049-Q](https://doi.org/10.1016/0269-7491(95)91049-Q).
- Bowen H. *Environmental Chemistry of the Elements*. — Academic Press, 1979. — P. 333.
- Clark R. B. Effect of aluminum on growth and mineral elements of Al-tolerant and Al-intolerant corn // *Plant and Soil*. — 1977. — Vol. 47, no. 3. — P. 653–662. — DOI: [10.1007/BF00011034](https://doi.org/10.1007/BF00011034).
- Daniels R. E., Eddy A. *Handbook of European Sphagna*. — Institute of Terrestrial Ecology, 1985. — P. 263.
- Dierßen K. *Bestimmungsschlüssel der Torfmoose in Norddeutschland*. Vol. 50. — Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Geobotanik in Schleswig-Holstein und Hamburg, 1996.
- European surveys of heavy metal accumulation in mosses. — 2017. — URL: <https://icpvegetation.ceh.ac.uk/our-science/heavy-metals> (visited on 07/17/2023).
- Fernández J. A., Carballeira A. A comparison of indigenous mosses and topsoils for use in monitoring atmospheric heavy metal deposition in Galicia (northwest Spain) // *Environmental Pollution*. — 2001. — Vol. 114, no. 3. — P. 431–441. — DOI: [10.1016/s0269-7491\(00\)00229-3](https://doi.org/10.1016/s0269-7491(00)00229-3).
- Fernández J. A., Carballeira A. Biomonitoring metal deposition in Galicia (NW Spain) with mosses: factors affecting bioconcentration // *Chemosphere*. — 2002. — Vol. 46, no. 4. — P. 535–542. — DOI: [10.1016/s0045-6535\(01\)00060-1](https://doi.org/10.1016/s0045-6535(01)00060-1).
- Fernández J. A., Puche F., Gimeno C., *et al.* Primeros datos sobre el biocontrol de la deposición atmosférica de metales pesados en las provincias de Valencia, Castellón y Teruel mediante musgos terrestres // *Ecología*. — 1999. — Vol. 13. — P. 83–91.
- Frontasyeva M., Vergel K., Urošević M. A., *et al.* Mosses as biomonitors of air pollution: 2015/2016 survey on heavy metals, nitrogen and POPs in Europe and beyond : tech. rep. / Report of the ICP Vegetation Moss Survey Coordination Centre. — Dubna, Russian Federation, 2020. — DOI: [10.13140/RG.2.2.30159.71848](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30159.71848).
- Frontasyeva M. V., Galinskaya T. Y., 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, no. 1. — P. 141–144. — DOI: [10.1023/b:jrnrc.0000015819.67830.60](https://doi.org/10.1023/b:jrnrc.0000015819.67830.60).
- Galsomiès L., Letrouit M. A., Deschamps C., *et al.* Atmospheric metal deposition in France: initial results on moss calibration from the 1996 biomonitoring // *Science of The Total Environment*. — 1999. — Vol. 232, no. 1/2. — P. 39–47. — DOI: [10.1016/s0048-9697\(99\)00108-4](https://doi.org/10.1016/s0048-9697(99)00108-4).
- Galuszka A. Geochemical background of selected trace elements in mosses *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. and *Hylocomium splendens* (Hedw.). B.S.G. from Wigierski National Park // *Polish Journal of Environmental Study*. — 2006. — Vol. 15, 2a. — P. 72–77.
- González A. G., Pokrovsky O. S. Metal adsorption on mosses: Toward a universal adsorption model // *Journal of Colloid and Interface Science*. — 2014. — Vol. 415. — P. 169–178. — DOI: [10.1016/j.jcis.2013.10.028](https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.10.028).
- 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.
- Grodzińska K., Szarek-Lukaszewska G. Response of mosses to the heavy metal deposition in Poland – an overview // *Environmental Pollution*. — 2001. — Vol. 114, no. 3. — P. 443–451. — DOI: [10.1016/s0269-7491\(00\)00227-x](https://doi.org/10.1016/s0269-7491(00)00227-x).
- Harmens H., Norris D. A., Sharps K., *et al.* Heavy metal and nitrogen concentrations in mosses are declining across Europe whilst some “hotspots” remain in 2010 // *Environmental Pollution*. — 2015. — Vol. 200. — P. 93–104. — DOI: [10.1016/j.envpol.2015.01.036](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.01.036).

- Harmens H., Norris D. A., Steinnes E., *et al.* Mosses as biomonitors of atmospheric heavy metal deposition: Spatial patterns and temporal trends in Europe // *Environmental Pollution*. — 2010. — Vol. 158, no. 10. — P. 3144–3156. — DOI: [10.1016/j.envpol.2010.06.039](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.06.039).
- Ignatov M. S., Afonina O. M., Ignatova E. A., *et al.* Checklist of mosses of East Europe and North Asia // *Arctoa*. — 2006. — Vol. 15, no. 1. — P. 1–130. — DOI: [10.15298/arctoa.15.01](https://doi.org/10.15298/arctoa.15.01).
- Itoh S., Yumura V. Studies on the contamination of vegetable crops by excessive absorption of heavy metals // *Bulletin of the Vegetable and Ornamental Crops Research Station*. — 1979. — Vol. 6a, no. 123.
- Kempton H., Krachler M., Shotyk W., *et al.* 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](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.037).
- Koroleva Y., Napreenko M., Baymuratov R., *et al.* 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, no. 1. — P. 152–162. — DOI: [10.1080/00207233.2019.1594301](https://doi.org/10.1080/00207233.2019.1594301).
- Manninen S., Sassi M.-K., Lovén K. Effects of nitrogen oxides on ground vegetation, *Pleurozium schreberi* and the soil beneath it in urban forests // *Ecological Indicators*. — 2013. — Vol. 24. — P. 485–493. — DOI: [10.1016/j.ecolind.2012.08.008](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.08.008).
- Markert B., Reus U., Herpin U. The application of TXRF in instrumental multielement analysis of plants, demonstrated with species of moss // *Science of The Total Environment*. — 1994. — Vol. 152, no. 3. — P. 213–220. — DOI: [10.1016/0048-9697\(94\)90312-3](https://doi.org/10.1016/0048-9697(94)90312-3).
- Markert B., Weckert V. Time-and-site integrated long-term biomonitoring of chemical elements by means of mosses // *Toxicological & Environmental Chemistry*. — 1993. — Vol. 40, no. 1–4. — P. 43–56. — DOI: [10.1080/0277249309357930](https://doi.org/10.1080/0277249309357930).
- McBride M. B. Retention of Cu<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, and Mn<sup>2+</sup> by Amorphous Alumina // *Soil Science Society of America Journal*. — 1978. — Vol. 42, no. 1. — P. 27–31. — DOI: [10.2136/sssaj1978.03615995004200010007x](https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200010007x).
- 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, no. 3. — P. 199–216. — DOI: [10.1007/s10311-010-0297-8](https://doi.org/10.1007/s10311-010-0297-8).
- Onianwa P. C. Monitoring atmospheric metal pollution: a review of the use of mosses as indicators // *Environmental Monitoring and Assessment*. — 2001. — Vol. 71, no. 1. — P. 13–50. — DOI: [10.1023/A:1011660727479](https://doi.org/10.1023/A:1011660727479).
- Pais I., Fehér M., Farkas E., *et al.* Titanium as a new trace element // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. — 1977. — Vol. 8, no. 5. — P. 407–410. — DOI: [10.1080/00103627709366732](https://doi.org/10.1080/00103627709366732).
- Pakarinen P., Tolonen K. Regional survey of heavy metals in peat mosses (*Sphagnum*) // *AMBIO A Journal of the Human Environment*. — 1976. — Vol. 5, no. 1. — P. 38–40.
- Rasmussen L., Johnsen I. Uptake of Minerals, Particularly Metals, by Epiphytic Hypnum Cupressiforme // *Oikos*. — 1976. — Vol. 27, no. 3. — P. 483. — DOI: [10.2307/3543466](https://doi.org/10.2307/3543466).
- Rühling Å., Larsen M. M., Department of Terrestrial Ecology. Atmospheric Heavy Metal Deposition in Europe 1995–1996 / ed. by E. Steinnes. — Nordic Council of Ministers, 1998. — P. 67.
- Rühling Å., Skaerby L. National survey of regional heavy metal lead (Pb), cadmium (Cd), copper (Cu), nickel (Ni), vanadium (V), zinc (Zn) concentrations in moss *Hylocomium splendens*, *Hypnum cupressiforme*, *Pleurozium schreberi*, Sweden // *Statens Naturvaardsverk*. — 1979. — P. 28.
- Rühling Å., Tyler G., Rühling A. Sorption and Retention of Heavy Metals in the Woodland Moss *Hylocomium splendens* (Hedw.) Br. et Sch. // *Oikos*. — 1970. — Vol. 21, no. 1. — P. 92. — DOI: [10.2307/3543844](https://doi.org/10.2307/3543844).
- 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, no. 3. — P. 84–91. — DOI: [10.5755/j01.arem.69.3.5566](https://doi.org/10.5755/j01.arem.69.3.5566).
- Šoltés R., Gregušková E. Accumulation Characteristics of Some Elements in the Moss *Polytrichum commune* (Bryophytes) Based on XRF Spectrometry // *Journal of Environmental Protection*. — 2013. — Vol. 04, no. 06. — P. 522–528. — DOI: [10.4236/jep.2013.46061](https://doi.org/10.4236/jep.2013.46061).
- Steinnes E., Hanssen J. E., Rambæk J. P., *et al.* Atmospheric deposition of trace elements in Norway: Temporal and spatial trends studied by moss analysis // *Water, Air, and Soil Pollution*. — 1994. — Vol. 74, no. 1/2. — P. 121–140. — DOI: [10.1007/bf01257151](https://doi.org/10.1007/bf01257151).
- Temminck R. J. M., Robroek B. J. M., Dijk G. van, *et al.* Wetscapes: Restoring and maintaining peatland landscapes for sustainable futures // *Ambio*. — 2023. — Vol. 52, no. 9. — P. 1519–1528. — DOI: [10.1007/s13280-023-01875-8](https://doi.org/10.1007/s13280-023-01875-8).
- Viana M., Hammingh P., Colette A., *et al.* Impact of maritime transport emissions on coastal air quality in Europe // *Atmospheric Environment*. — 2014. — Vol. 90. — P. 96–105. — DOI: [10.1016/j.atmosenv.2014.03.046](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.03.046).

- Vuković G., Urošević M. A., Goryainova Z., *et al.* Active moss biomonitoring for extensive screening of urban air pollution: Magnetic and chemical analyses // *Science of The Total Environment*. — 2015. — Vol. 521/522. — P. 200–210. — DOI: [10.1016/j.scitotenv.2015.03.085](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.085).
- Vyas B. N., Mistry K. B. Influence of clay mineral type and organic matter content on the uptake of  $^{239}\text{Pu}$  and  $^{241}\text{Am}$  by plants // *Plant and Soil*. — 1981. — Vol. 59, no. 1. — P. 75–82. — DOI: [10.1007/BF02183593](https://doi.org/10.1007/BF02183593).
- Wehr J. D. Accumulation of heavy metals by aquatic bryophytes in streams and rivers in northern England : Durham theses / Wehr J. D. — Durham University, 1983. — P. 435.
- Zawadzki K., Samecka-Cymerman A., Kolon K., *et al.* Metals in *Pleurozium schreberi* and *Polytrichum commune* from areas with various levels of pollution // *Environmental Science and Pollution Research*. — 2016. — Vol. 23, no. 11. — P. 11100–11108. — DOI: [10.1007/s11356-016-6278-0](https://doi.org/10.1007/s11356-016-6278-0).
- Zechmeister H. G. Annual growth of four pleurocarpous moss species and their applicability for biomonitoring heavy metals // *Environmental Monitoring and Assessment*. — 1998. — Vol. 52, no. 3. — P. 441–451. — DOI: [10.1023/A:1005843032625](https://doi.org/10.1023/A:1005843032625).

ACCUMULATION CHARACTERISTICS OF BRYOPHYTES IN ABANDONED  
DISTURBED PEATLANDS: A CASE STUDY FROM THE KALININGRAD  
REGION, RUSSIAR. A. Baymuratov<sup>1</sup>, M. G. Napreenko<sup>1</sup>, Y. V. Koroleva<sup>1</sup><sup>1</sup>Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

\*\*Correspondence to: Maxim Napreenko, maxnpr@gmail.com

The paper provides original data on accumulation capabilities of bryophytes typical of peatland ecosystems with different degree of anthropogenic transformation occurring in the Kaliningrad Region of Russia. A key study area was the Vittgirrensky Peatland, abandoned after milled peat extraction in 1990s and designated as the Rossyanka Carbon Measurement Supersite in 2021. The accumulation of micro- и macroelements: Ca, Mn, Fe, Ni, Zn, Br, Rb, and Sr – was identified by means of X-ray fluorescence spectroscopy in 13 bryophyte species (*Aulacomnium palustre*, *Campylopus introflexus*, *Polytrichum commune*, *P. strictum*, *Sphagnum capillifolium*, *S. centrale*, *S. cuspidatum*, *S. fuscum*, *S. magellanicum*, *S. riparium*, *S. squarrosum*, *S. teres*) focusing on comparison with the reference species *Pleurozium schreberi*. The records of average element concentrations from the Vittgirrensky Peatland are shown to be distinctly lower than the regional background level. The accumulation of Mn, Ni, Br, Rb, and Sr varies significantly among disturbed and natural sites: the concentrations are comparable for Fe and Zn, while cut-over peatlands showed the level of Mn several times less than in undisturbed peat bogs. *Aulacomnium palustre* can be recommended for passive biomonitoring purposes on bog ecosystems as having most similar accumulation capability to the reference species *Pleurozium schreberi* that is widely recognised as indicator of atmospheric air pollution.

**Keywords:** element accumulation, bryophyte, drained peatlands, X-ray fluorescence analysis, biomonitoring, Sphagnum, Kaliningrad region

Received: 12 July 2023

Accepted: 18 September 2023

Published: 5 October 2023



© 2023. The Authors.

**Citation:** Baymuratov, R. A., M. G. Napreenko, and Y. V. Koroleva (2023), Accumulation Characteristics of Bryophytes in Abandoned Disturbed Peatlands: A Case Study From the Kaliningrad Region, Russia, *Russ. J. Earth. Sci.*, 23, ES4002, <https://doi.org/10.2205/2023ES000873>

## References

- Adamo P., Giordano S., Vingiani S., *et al.* Trace element accumulation by moss and lichen exposed in bags in the city of Naples (Italy) // *Environmental Pollution*. — 2003. — Vol. 122, no. 1. — P. 91–103. — DOI: [10.1016/s0269-7491\(02\)00277-4](https://doi.org/10.1016/s0269-7491(02)00277-4).
- Ananyan A. S., Koroleva Y. V., Alekseyenok Y. V., *et al.* Biomonitoring of heavy metals in Kaliningrad oblast // *International Research Journal*. — 2020. — Vol. 12, no. 102. — P. 25–31. — DOI: [10.23670/IRJ.2020.102.12.038](https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.102.12.038).
- Ashikhmina T. Y., Timonyuk V. M., Bolshakova E. V., *et al.* Moss *Pleurozium schreberi* as a bioindicator of air pollution in the area of influence of a chemical weapons destruction facility // *Natural sciences & humanism*. — Tomsk : National Research Tomsk State University, 2008. — P. 112–113.
- Astolfi M. L., Massimi L., Rapa M., *et al.* A multi-analytical approach to studying the chemical composition of typical carbon sink samples // *Scientific Reports*. — 2023. — Vol. 13, no. 1. — P. 1–12. — DOI: [10.1038/s41598-023-35180-x](https://doi.org/10.1038/s41598-023-35180-x).

- Aulio K. Metal accumulation capacity of five species of Sphagnum moss // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. — 1985. — Vol. 35, no. 1. — P. 439–442. — DOI: [10.1007/bf01636535](https://doi.org/10.1007/bf01636535).
- Ávila-Pérez P., Longoria-Gándara L. C., García-Rosales G., *et al.* Monitoring of elements in mosses by instrumental neutron activation analysis and total X-ray fluorescence spectrometry // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. — 2018. — Vol. 317, no. 1. — P. 367–380. — DOI: [10.1007/s10967-018-5896-z](https://doi.org/10.1007/s10967-018-5896-z).
- Bardunov L. V. The Ancients on Land / ed. by F. E. Reimers. — Novosibirsk : Nauka, 1984. — P. 157.
- Barry A., Ooi S. K., Helton A. M., *et al.* Carbon Dynamics Vary Among Tidal Marsh Plant Species in a Sea-level Rise Experiment // Wetlands. — 2023. — Vol. 43, no. 7. — DOI: [10.1007/s13157-023-01717-z](https://doi.org/10.1007/s13157-023-01717-z).
- Berg T., Pedersen U., Steinnes E. Environmental indicators for long-range atmospheric transported heavy metals based on national moss surveys // Environmental Monitoring and Assessment. — 1996. — Vol. 43, no. 1. — P. 11–17. — DOI: [10.1007/BF00399567](https://doi.org/10.1007/BF00399567).
- Berg T., Røyset O., Steinnes E., *et al.* Atmospheric trace element deposition: Principal component analysis of ICP-MS data from moss samples // Environmental Pollution. — 1995. — Vol. 88, no. 1. — P. 67–77. — DOI: [10.1016/0269-7491\(95\)91049-Q](https://doi.org/10.1016/0269-7491(95)91049-Q).
- Bogdanova Y. A., Prokhorova N. V., Vergel K. N., *et al.* The features of heavy metals and metalloids accumulation in the phytomass of the amphipodous moss *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. in the conditions of the Krasnosamarsky Forest area (Samara Region) and the National Park «Buzuluksky Bor» (Orenburg Region) // Samara Journal of Science. — 2022. — Vol. 11, no. 1. — P. 24–30. — DOI: [10.55355/snv2022111101](https://doi.org/10.55355/snv2022111101).
- Bowen H. Environmental Chemistry of the Elements. — Academic Press, 1979.
- Buraeva E. A., Stasov V. V., Malyshevsky V. S., *et al.* Seasonal behavior of <sup>7</sup>Be in the surface air in Rostov-on-Don // Fundamental Research. — 2013. — Vol. 1. — P. 177–180.
- Carbon training ground «Rosyanka». Scientific and educational project on the study of climate-active greenhouse gases. — 2021. — (date of access: 2023-07-17). <http://rosyanka.kantiana.ru/>.
- Clark R. B. Effect of aluminum on growth and mineral elements of Al-tolerant and Al-intolerant corn // Plant and Soil. — 1977. — Vol. 47, no. 3. — P. 653–662. — DOI: [10.1007/BF00011034](https://doi.org/10.1007/BF00011034).
- Daniels R. E., Eddy A. Handbook of European Sphagna. — Institute of Terrestrial Ecology, 1985. — P. 263.
- Dierßen K. Bestimmungsschlüssel der Torfmoose in Norddeutschland. Vol. 50. — Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Geobotanik in Schleswig-Holstein und Hamburg, 1996.
- European surveys of heavy metal accumulation in mosses. — 2017. — (date of access: 2023-07-17). <https://icpvegetation.ceh.ac.uk/our-science/heavy-metals>.
- Fernández J. A., Carballeira A. A comparison of indigenous mosses and topsoils for use in monitoring atmospheric heavy metal deposition in Galicia (northwest Spain) // Environmental Pollution. — 2001. — Vol. 114, no. 3. — P. 431–441. — DOI: [10.1016/s0269-7491\(00\)00229-3](https://doi.org/10.1016/s0269-7491(00)00229-3).
- Fernández J. A., Carballeira A. Biomonitoring metal deposition in Galicia (NW Spain) with mosses: factors affecting bioconcentration // Chemosphere. — 2002. — Vol. 46, no. 4. — P. 535–542. — DOI: [10.1016/s0045-6535\(01\)00060-1](https://doi.org/10.1016/s0045-6535(01)00060-1).
- Fernández J. A., Puche F., Gimeno C., *et al.* Primeros datos sobre el biocontrol de la deposición atmosférica de metales pesados en las provincias de Valencia, Castellón y Teruel mediante musgos terrestres // Ecología. — 1999. — Vol. 13. — P. 83–91.
- Frontasyeva M., Vergel K., Urošević M. A., *et al.* Mosses as biomonitors of air pollution: 2015/2016 survey on heavy metals, nitrogen and POPs in Europe and beyond : tech. rep. / Report of the ICP Vegetation Moss Survey Coordination Centre. — Dubna, Russian Federation, 2020. — DOI: [10.13140/RG.2.2.30159.71848](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30159.71848).
- Frontasyeva M. V., Galinskaya T. Y., 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, no. 1. — P. 141–144. — DOI: [10.1023/b:jrnrc.0000015819.67830.60](https://doi.org/10.1023/b:jrnrc.0000015819.67830.60).
- Galsomiès L., Letrouit M. A., Deschamps C., *et al.* Atmospheric metal deposition in France: initial results on moss calibration from the 1996 biomonitoring // Science of The Total Environment. — 1999. — Vol. 232, no. 1/2. — P. 39–47. — DOI: [10.1016/s0048-9697\(99\)00108-4](https://doi.org/10.1016/s0048-9697(99)00108-4).
- Galuszka A. Geochemical background of selected trace elements in mosses *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. and *Hylocomium splendens* (Hedw.). B.S.G. from Wigierski National Park // Polish Journal of Environmental Study. — 2006. — Vol. 15, 2a. — P. 72–77.
- González A. G., Pokrovsky O. S. Metal adsorption on mosses: Toward a universal adsorption model // Journal of Colloid and Interface Science. — 2014. — Vol. 415. — P. 169–178. — DOI: [10.1016/j.jcis.2013.10.028](https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.10.028).

- 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.
- Grodzińska K., Szarek-Łukaszewska G. Response of mosses to the heavy metal deposition in Poland - an overview // *Environmental Pollution*. — 2001. — Vol. 114, no. 3. — P. 443–451. — DOI: [10.1016/s0269-7491\(00\)00227-x](https://doi.org/10.1016/s0269-7491(00)00227-x).
- Harmens H., Norris D. A., Sharps K., *et al.* Heavy metal and nitrogen concentrations in mosses are declining across Europe whilst some “hotspots” remain in 2010 // *Environmental Pollution*. — 2015. — Vol. 200. — P. 93–104. — DOI: [10.1016/j.envpol.2015.01.036](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.01.036).
- Harmens H., Norris D. A., Steinnes E., *et al.* Mosses as biomonitors of atmospheric heavy metal deposition: Spatial patterns and temporal trends in Europe // *Environmental Pollution*. — 2010. — Vol. 158, no. 10. — P. 3144–3156. — DOI: [10.1016/j.envpol.2010.06.039](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.06.039).
- Ignatov M. S., Afonina O. M., Ignatova E. A., *et al.* Checklist of mosses of East Europe and North Asia // *Arctoa*. — 2006. — Vol. 15, no. 1. — P. 1–130. — DOI: [10.15298/arctoa.15.01](https://doi.org/10.15298/arctoa.15.01).
- Itoh S., Yumura V. Studies on the contamination of vegetable crops by excessive absorption of heavy metals // *Bulletin of the Vegetable and Ornamental Crops Research Station*. — 1979. — Vol. 6a, no. 123.
- Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants. — Moscow : MIR, 1989. — P. 439.
- Kempter H., Krachler M., Shotyk W., *et al.* 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](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.037).
- Kome G. K., Enang R. K., Tabi F. O., *et al.* Influence of Clay Minerals on Some Soil Fertility Attributes: A Review // *Open Journal of Soil Science*. — 2019. — Vol. 09, no. 09. — P. 155–188. — DOI: [10.4236/ojss.2019.99010](https://doi.org/10.4236/ojss.2019.99010).
- Koroleva Y., Napreenko M., Baymuratov R., *et al.* 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, no. 1. — P. 152–162. — DOI: [10.1080/00207233.2019.1594301](https://doi.org/10.1080/00207233.2019.1594301).
- Koroleva Y. V. The bioindication of heavy metal precipitation in the Kaliningrad region // *IKBFU's Vestnik*. — 2006. — Vol. 7. — P. 39–44.
- Koroleva Y. V. Use of mosses *Hylocomium splendens* and *Pleurozium schreberi* for an estimation of absolute values of atmospheric losses of heavy metals in Kaliningrad areas // *IKBFU's Vestnik*. — 2010. — Vol. 7. — P. 29–34.
- Kovalevskii A. L. Biogeochemistry of plants. — Nauka, 1991. — P. 290.
- Lindsay W. L., Doxtader K. G. Environmental Chemistry of the Elements // *Journal of Environmental Quality*. — 1981. — Vol. 10, no. 2. — P. 249–249. — DOI: [10.2134/jeq1981.00472425001000020030x](https://doi.org/10.2134/jeq1981.00472425001000020030x).
- Manninen S., Sassi M.-K., Lovén K. Effects of nitrogen oxides on ground vegetation, *Pleurozium schreberi* and the soil beneath it in urban forests // *Ecological Indicators*. — 2013. — Vol. 24. — P. 485–493. — DOI: [10.1016/j.ecolind.2012.08.008](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.08.008).
- Markert B., Reus U., Herpin U. The application of TXRF in instrumental multielement analysis of plants, demonstrated with species of moss // *Science of The Total Environment*. — 1994. — Vol. 152, no. 3. — P. 213–220. — DOI: [10.1016/0048-9697\(94\)90312-3](https://doi.org/10.1016/0048-9697(94)90312-3).
- Markert B., Weckert V. Time-and-site integrated long-term biomonitoring of chemical elements by means of mosses // *Toxicological & Environmental Chemistry*. — 1993. — Vol. 40, no. 1–4. — P. 43–56. — DOI: [10.1080/02772249309357930](https://doi.org/10.1080/02772249309357930).
- McBride M. B. Retention of Cu<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, and Mn<sup>2+</sup> by Amorphous Alumina // *Soil Science Society of America Journal*. — 1978. — Vol. 42, no. 1. — P. 27–31. — DOI: [10.2136/sssaj1978.03615995004200010007x](https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200010007x).
- Menning W. J., Feder W. A. Biomonitoring air pollutants with plants. — Leningrad : Gidrometeoizdat, 1975. — P. 141.
- Mezhibor A. M., Bolshunova T. S. Biogeochemical characteristics of sphagnum mosses and epiphytic lichens in the areas of the oil and gas production complex of the Tomsk region // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. — 2014. — Vol. 325, no. 1. — P. 205–213.
- 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, no. 3. — P. 199–216. — DOI: [10.1007/s10311-010-0297-8](https://doi.org/10.1007/s10311-010-0297-8).
- Napreenko M. G. Wetland ecosystems // *Nature of the Kaliningrad region. Water objects*. — Kaliningrad : Istok, 2015. — P. 56–76. — (reference manual).
- Napreenko M. G., Antsiferova O. A., Napreenko-Dorokhova T. V., *et al.* Reconstruction of climate change and carbon balance as a problem for carbon polygons (using the example of the Rosyanka carbon polygon in the Kaliningrad region) // *Collection of materials of the international research conference “Greenhouse gas emissions today and in the geological past: sources, impact on climate and the environment”*. — Kazan : Kazan Federal University, 2022a. — P. 32.

- Napreenko M. G., Napreenko-Dorokhova T. V., Karelina V. I., *et al.* Species composition and habitat ecology of sphagna: inventory and monitoring programme on the Carbon polygon “Rossyanka” (Kaliningrad region, Russia) // IKBFU’s Vestnik. — 2022b. — Vol. 1. — P. 73–87.
- Napreenko M. G., Samerkhanova A. K., Antsiferova O. A., *et al.* Ecological rehabilitation of wetland ecosystems within the framework of the functioning of a carbon polygon in the Kaliningrad region // Study of Aquatic and Terrestrial Ecosystems: History and Contemporary State. International scientific conference dedicated to the 150th anniversary of the Sevastopol Biological Station - A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas and to the 45th anniversary of research vessel “Professor Vodyanitsky”, 13–18 September, 2021. — Sevastopol : A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, 2021. — P. 641–642.
- Nifontova M. G. Dynamics of the content of long-lived radionuclides in moss-lichen vegetation // Ecology. — 1997. — Vol. 4. — P. 273–277.
- Noskova M. G. Field atlas-identifier of sphagnum mosses of the taiga zone of European Russia. — Tula : Acvarius, 2016. — P. 112.
- Onianwa P. C. Monitoring atmospheric metal pollution: a review of the use of mosses as indicators // Environmental Monitoring and Assessment. — 2001. — Vol. 71, no. 1. — P. 13–50. — DOI: [10.1023/A:1011660727479](https://doi.org/10.1023/A:1011660727479).
- Pais I., Fehér M., Farkas E., *et al.* Titanium as a new trace element // Communications in Soil Science and Plant Analysis. — 1977. — Vol. 8, no. 5. — P. 407–410. — DOI: [10.1080/00103627709366732](https://doi.org/10.1080/00103627709366732).
- Pakarinen P., Tolonen K. Regional survey of heavy metals in peat mosses (Sphagnum) // AMBIO A Journal of the Human Environment. — 1976. — Vol. 5, no. 1. — P. 38–40.
- Rasmussen L., Johnsen I. Uptake of Minerals, Particularly Metals, by Epiphytic Hypnum Cupressiforme // Oikos. — 1976. — Vol. 27, no. 3. — P. 483. — DOI: [10.2307/3543466](https://doi.org/10.2307/3543466).
- Rühling Å., Larsen M. M., Department of Terrestrial Ecology. Atmospheric Heavy Metal Deposition in Europe 1995–1996 / ed. by E. Steinnes. — Nordic Council of Ministers, 1998. — P. 67.
- Rühling Å., Skaerby L. National survey of regional heavy metal lead (Pb), cadmium (Cd), copper (Cu), nickel (Ni), vanadium (V), zinc (Zn) concentrations in moss *Hylocomium splendens*, *Hypnum cupressiforme*, *Pleurozium schreberi*, Sweden // Statens Naturvaardsverk. — 1979. — P. 28.
- Rühling Å., Tyler G., Rühling A. Sorption and Retention of Heavy Metals in the Woodland Moss *Hylocomium splendens* (Hedw.) Br. et Sch. // Oikos. — 1970. — Vol. 21, no. 1. — P. 92. — DOI: [10.2307/3543844](https://doi.org/10.2307/3543844).
- 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, no. 3. — P. 84–91. — DOI: [10.5755/j01.arem.69.3.5566](https://doi.org/10.5755/j01.arem.69.3.5566).
- Shevchenko V. P., Filippov D. A., Gordeev V. V., *et al.* Contents of heavy metals in sphagnum mosses of Vologda region // Modern problems of science and education. — 2011. — Vol. 4.
- Shimanskaya E. I., Varduni T. V., Vyukhina A. A., *et al.* The development of biotesting method undifferentiated environmental factors for the territories confined to zones of active tectonic faults based on analysis of morphological changes in cenosis formative tree species // Fundamental Research. — 2013. — Vol. 6. — P. 1778–1813.
- Šoltés R., Gregušková E. Accumulation Characteristics of Some Elements in the Moss *Polytrichum commune* (Bryophytes) Based on XRF Spectrometry // Journal of Environmental Protection. — 2013. — Vol. 04, no. 06. — P. 522–528. — DOI: [10.4236/jep.2013.46061](https://doi.org/10.4236/jep.2013.46061).
- Steinnes E., Hanssen J. E., Rambæk J. P., *et al.* Atmospheric deposition of trace elements in Norway: Temporal and spatial trends studied by moss analysis // Water, Air, and Soil Pollution. — 1994. — Vol. 74, no. 1/2. — P. 121–140. — DOI: [10.1007/bf01257151](https://doi.org/10.1007/bf01257151).
- Temmink R. J. M., Robroek B. J. M., Dijk G. van, *et al.* Wetscapes: Restoring and maintaining peatland landscapes for sustainable futures // Ambio. — 2023. — Vol. 52, no. 9. — P. 1519–1528. — DOI: [10.1007/s13280-023-01875-8](https://doi.org/10.1007/s13280-023-01875-8).
- Viana M., Hammingh P., Colette A., *et al.* Impact of maritime transport emissions on coastal air quality in Europe // Atmospheric Environment. — 2014. — Vol. 90. — P. 96–105. — DOI: [10.1016/j.atmosenv.2014.03.046](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.03.046).
- Vuković G., Urošević M. A., Goryainova Z., *et al.* Active moss biomonitoring for extensive screening of urban air pollution: Magnetic and chemical analyses // Science of The Total Environment. — 2015. — Vol. 521/522. — P. 200–210. — DOI: [10.1016/j.scitotenv.2015.03.085](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.085).
- Vyas B. N., Mistry K. B. Influence of clay mineral type and organic matter content on the uptake of <sup>239</sup>Pu and <sup>241</sup>Am by plants // Plant and Soil. — 1981. — Vol. 59, no. 1. — P. 75–82. — DOI: [10.1007/BF02183593](https://doi.org/10.1007/BF02183593).
- Wehr J. D. Accumulation of heavy metals by aquatic bryophytes in streams and rivers in northern England : Durham theses / Wehr J. D. — Durham University, 1983. — P. 435.

- Zawadzki K., Samecka-Cymerman A., Kolon K., *et al.* Metals in *Pleurozium schreberi* and *Polytrichum commune* from areas with various levels of pollution // *Environmental Science and Pollution Research*. — 2016. — Vol. 23, no. 11. — P. 11100–11108. — DOI: [10.1007/s11356-016-6278-0](https://doi.org/10.1007/s11356-016-6278-0).
- Zechmeister H. G. Annual growth of four pleurocarpous moss species and their applicability for biomonitoring heavy metals // *Environmental Monitoring and Assessment*. — 1998. — Vol. 52, no. 3. — P. 441–451. — DOI: [10.1023/A:1005843032625](https://doi.org/10.1023/A:1005843032625).