

Особенности накопления тяжелых металлов мхом *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. в условиях Бузулукского бора

Characteristics of heavy metal deposition in the moss *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. in the Buzuluk Pine Forest

Богданова Я. А.¹, Леонов А. Г.², Прохорова Н. В.¹

Bogdanova Ya. A.¹, Leonov A. G.², Prokhorova N. V.¹

¹Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, г. Самара, Россия

E-mails: bogdanova.ya@yandex.ru; natali.prokhorova.55@mail.ru

¹Samara University, Samara, Russia

²Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный парк «Бузулукский бор», п. Колтубановский, Россия

²Federal State Budgetary Institution "Buzulukskiy Bor National Park", Koltubanovsky, Russia

Реферат. В период с 2015 по 2022 гг. были проведены эколого-биогеохимические исследования мохообразных на территории Национального парка «Бузулукский бор». Основным объектом исследования служил мох *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. Изучали особенности накопления тяжелых металлов в биомассе распространенных в Бузулукском бору мхов (6 видов) для метода отпечатка пальцев и расчета показателей «референтного вида» мхов. Основное внимание было уделено временной и пространственной динамике накопления тяжелых металлов в биомассе мха *P. schreberi* для оценки возможности его использования в качестве биоиндикатора полиметаллического загрязнения атмосферного воздуха. Коэффициенты, полученные как отношение содержания элемента в биомассе *P. schreberi* к его содержанию в «референтном виде» мха, показали, что в 2015 г. и в 2022 г. практически не проявились различия по содержанию Mn, Cr, Zn, Cd, Sr, содержание V, Co, Ni, Fe было более низким в 2015 г., а содержание Cu, наоборот, более высоким, но различия между периодами наблюдений не превышали интервала 0,3–1,2 единицы, что свидетельствует о фоновом характере района исследований и достоверности отражения фоновых условий мхом *P. schreberi*. Пространственная динамика накопления тяжелых металлов в биомассе *P. schreberi* на 6 пробных площадях хотя и проявилась, но не может считаться существенной для большинства анализируемых элементов. Полученные результаты позволяют подтвердить фоновый характер территории Бузулукского бора, а мох *Pleurozium schreberi* может быть использован в качестве биоиндикатора загрязнения воздушной среды тяжелыми металлами.

Ключевые слова. Биоиндикация, Бузулукский бор, мох, тяжелые металлы, *Pleurozium schreberi*.

Summary. From 2015 to 2022, ecological and biogeochemical studies of bryophytes were conducted in the Buzulukskiy Bor National Park. The main object of the study was the moss *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. The features of heavy metal deposition in the biomass of common moss species (six species) in the Buzuluk Pine Forest were examined for the fingerprinting method and for calculating the reference moss species indicators. The main focus was on the temporal and spatial dynamics of heavy metal deposition in the biomass of *P. schreberi* to assess its potential use as a bioindicator of poly-metallic atmospheric air pollution. The coefficients calculated as the ratio of the element content in *Pleurozium* biomass to its content in the reference moss species showed that in 2015 and 2022, there were virtually no differences in the content of Mn, Cr, Zn, Cd, and Sr. The content of V, Co, Ni, and Fe was lower in 2015, while the content of Cu, conversely, was higher. However, the differences between the observation periods did not exceed the range of 0.3–1.2 units, indicating the background nature of the study area and the reliability of *P. schreberi* in reflecting background conditions. Although spatial dynamics of heavy metal deposition in *Pleurozium* biomass were observed across six sample plots, they cannot be considered significant for most of the analyzed elements. The obtained results confirm the background status of the Buzuluk Pine Forest territory, and the moss *P. schreberi* can be used as a bioindicator of heavy metal air pollution.

Key words. Bioindication, Buzuluk Pine Forest, heavy metals, moss, *Pleurozium schreberi*.

Введение. Одним из наиболее опасных видов техногенной трансформации биосферы является загрязнение природных сред тяжелыми металлами. В современных условиях полностью избежать их

поступления в атмосферу, гидросферу, почвенный покров невозможно. Рост потребления практически всех известных металлов, в том числе относящихся к группе тяжелых, определяет увеличение их количества в техногенных потоках загрязнения (Мотузова, Карпова, 2013).

Для количественного выявления полиметаллического загрязнения природных сред традиционно используются инструментальные методы анализа, но для оценки уровней накопления тяжелых металлов в живых организмах и среде их обитания применяют методы биоиндикации, которые обычно чувствительнее приборов (Рогова и др., 2011; Бухарина, Торопов, 2019).

В качестве биоиндикаторов используются низшие и высшие растения, микроорганизмы, животные. Среди востребованных биоиндикаторов, позволяющих выявить степень загрязнения тяжелыми металлами атмосферного воздуха, особое место занимают мохообразные. Отсутствие корневой системы и развитой кутикулы обуславливает поступление элементов минерального питания и загрязняющих веществ непосредственно из атмосферы всей поверхностью гаметофита (Tyler, 1990). Высокая катионообменная способность клеточных стенок и значительная удельная поверхность обеспечивают эффективное накопление широкого спектра элементов. При этом уровень накопления минеральных веществ, включая и тяжелые металлы, в биомассе мохообразных зависит от комплекса факторов: качественных и количественных особенностей загрязнения природной среды, сорбционной емкости тела конкретного вида, времени взаимодействия с загрязненной атмосферой, скорости роста и др. (Черненко, 2002; Баргальи, 2005; Рогова и др., 2011). Для целей биоиндикации в разных странах предлагаются разные виды, но в европейских исследованиях чаще всего используется мох *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. (Гапеева и др., 2015; Frontasyeva et al., 2020).

Мхи и печеночники, как компоненты основных наземных экосистем, принимают участие в природном круговороте тяжелых металлов, но их эколого-биогеохимические особенности для степной зоны Европейской части России до последнего времени оставались практически не изученными. Первые сведения о биоаккумуляционных возможностях мохообразных на данной территории в отношении тяжелых металлов были опубликованы в 1998 г. (Прохорова и др., 1998), но эти материалы относились к городской черте города Самары и двух техногенно-трансформированных участков на Самарской Луке, поэтому фоновыми их считать нельзя.

Национальный парк «Бузулукский бор» – уникальный островной лесной массив в степной зоне, расположенный на территориях Самарской и Оренбургской областей. Благодаря относительной удаленности от крупных промышленных центров, данная территория традиционно рассматривается как фоновая или условно-фоновая для оценки регионального загрязнения, особенно в сравнении с промышленными центрами. Однако на территории национального парка и в его охранный зоне ведется добыча углеводородов, что создает предпосылки для локального загрязнения. Ряд авторов фиксирует повышенные концентрации подвижных форм металлов в почвах вблизи нефтепромыслов (Zhichkina et al., 2020). Вместе с тем, работ по оценке атмосферного переноса для данной территории недостаточно (Богданова и др., 2022).

Целью нашего исследования являлось изучение пространственной и временной динамики накопления тяжелых металлов в биомассе мха *Pleurozium schreberi* на территории национального парка «Бузулукский бор».

Материалы и методы. Для исследования был проведен отбор проб мха *Pleurozium schreberi* на территории национального парка «Бузулукский бор» в 6 лесных сообществах, определено валовое содержание ряда тяжелых металлов методом спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и выполнен сравнительный анализ полученных данных с результатами предшествующих исследований для выявления временной динамики.

Для получения фоновых показателей накопления тяжелых металлов мхом с 2015 г. было осуществлено несколько исследований, в которых объектом и биоиндикатором служил вид *P. schreberi*. Кроме того, для сравнительного анализа по методу «отпечатка пальцев» были привлечены количественные данные 2017 г. по 6 видам мхов достаточно распространенных в Бузулукском бору (*Hylocomium splendens* (Hedw.) Bruch et al., *Brachythecium salebrosum* (Hoffm. ex F. Weber et D. Mohr) Schimp., *Hylocomiadelphus triquetrus* (Hedw.) Ochyra et Stebel, *Ptilium crista-castrensis* (Hedw.) De Not., *Climacium dendroides* (Hedw.) F. Weber et D. Mohr, *Dicranum polysetum* Sw.). На основе этих данных рассчитывали показатели «референтного вида» для мхов этой территории. «Референтный вид» позволяет оценивать металлаккумуляционные способности конкретного вида (Markert, 1992), в данном случае мха

P. schreberi, который к этому времени уже зарекомендовал себя в качестве биоиндикатора загрязнения атмосферного воздуха тяжелыми металлами в разных странах Европы, в том числе и в России.

Сбор образцов *P. schreberi* проводился в вегетационный период 2015 и 2022 гг. в искусственных сосновых сообществах в Бузулукском бору. Сосняки выбирались случайным образом, но в соответствии с рядом рекомендованных критериев (Frontasyeva et. al., 2020), различались по возрасту, положению в рельефе и степени развития мохового покрова. В вегетационный период 2017 г. в различных типах растительных сообществ (сосновые, березовые и луговые сообщества) были отобраны образцы мхов *Hylocomium splendens*, *Brachythecium salebrosum*, *Hylocomiadelphus triquetrus*, *Ptilium crista-castrensis*, *Climacium dendroides*, *Dicranum polysetum*. Пробы отбирали в соответствии с рекомендуемыми принципами (Frontasyeva et. al., 2020). Пробные площади находились в неурбанизированных районах на расстоянии не менее 300 м от крупных дорог, населённых пунктов и предприятий. Площадь каждой из них составляла 50 × 50 м. Отбор производился на открытых участках, на расстоянии не менее 3 м от крон ближайших деревьев. Для каждой пробной площади формировался один общий образец фитомассы *P. schreberi*, состоящий из 5–10 подобразцов. При отборе образцов фитомассы мха использовались одноразовые полиэтиленовые перчатки, не содержащие тальк. Для транспортировки и временного хранения образцы помещали в маркированные пластиковые пакеты, которые тщательно запечатывались для предотвращения загрязнения во время транспортировки. Для каждой точки пробоотбора с помощью GPS были определены географические координаты. Далее в условиях лаборатории фитомасса мха высушивалась и очищалась от отмерших частей мха и других растительных остатков.

В 2015 г. биомасса *P. schreberi* анализировалась с помощью инструментального эпитеплового нейтронного активационного анализа (ЭНАА) в радиоаналитическом комплексе реактора ИБР-2 Лаборатории нейтронной физики (ЛНФ) Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ) в г. Дубна. В 2017 г. анализировали биомассу 6 видов мхов, широко распространенных в Бузулукском бору, используя метод спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в лаборатории Самарского университета. В 2022 г. были осуществлены исследования содержания тяжелых металлов (Mn, Cr, V, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Fe, Sr) в образцах фитомассы *P. schreberi* также методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Математическую обработку данных осуществляли с помощью пакета прикладных программ Excel.

Результаты и их обсуждение. За весь период исследований изучаемые мхи показали более высокий уровень накопления анализируемых элементов по сравнению с цветковыми растениями. Концентрация Pb в фитомассе всех изучаемых мхов была сравнима с фоновыми показателями для почв (2,5–11,0 мг/кг воздушно-сухой массы). Изучаемые мхи проявили определенную видовую специфичность металлоаккумуляции и ее зависимость от условий местообитания.

Полученные нами результаты по мху *Pleurozium schreberi* позволяет оценить в первом приближении временную динамику накопления тяжелых металлов в его биомассе и особенности биоаккумуляции металлов по методу отпечатка пальцев. На рис. 1 представлены показатели, полученные на основе сравнения данных по *P. schreberi* за 2015 и 2022 гг. Общая картина диаграммы показывает, что уровни накопления тяжелых металлов биомассой *P. schreberi* в оба года исследований, хотя и демонстрируют определенные различия, но они находятся в пределах близких величин.

Мы можем отметить очень близкие концентрации в биомассе этого мха в 2015 и 2022 гг. у Mn, Cr, Zn, Cd, Sr. Содержание V, Co, Ni, Fe было более низким в 2015 г., а содержание Cu, наоборот, более высоким. При этом снижение и повышение показателей отличалось на 0,3–1,2 единицы. По сравнению с «референтным видом» мха показатели *P. schreberi* в 2015 и 2022 гг. были выше в 1,2–4,3 раза. Наибольшая разница с «референтным видом» (в 2 и более раз) наблюдалась в отношении Mn (2015 и 2022 гг.), Co (в 2022 г.), Cu (2015 и 2022 гг.), Fe (в 2022 г.), Sr (2015 и 2022 гг.). Сравнение абсолютных концентраций анализируемых элементов в биомассе *P. schreberi* подтверждает результаты, полученные методом отпечатка пальцев. Слабые отличия концентраций, в диапазоне от 0,05 до 1,0 мг/кг характерны для большинства элементов, образующих ряд по возрастанию различий между годами исследований: Cd < Mn < Zn < Cr = V < Ni < Cu < Co. Разница, слабо превышающая 1 мг/кг (1,19 мг/кг), была выявлена только для Fe.

Эти данные были получены по усредненным показателям и позволяют нам видеть различия в накоплении тяжелых металлов мхом *P. schreberi* в разные годы наблюдений (2015 и 2022 гг.).

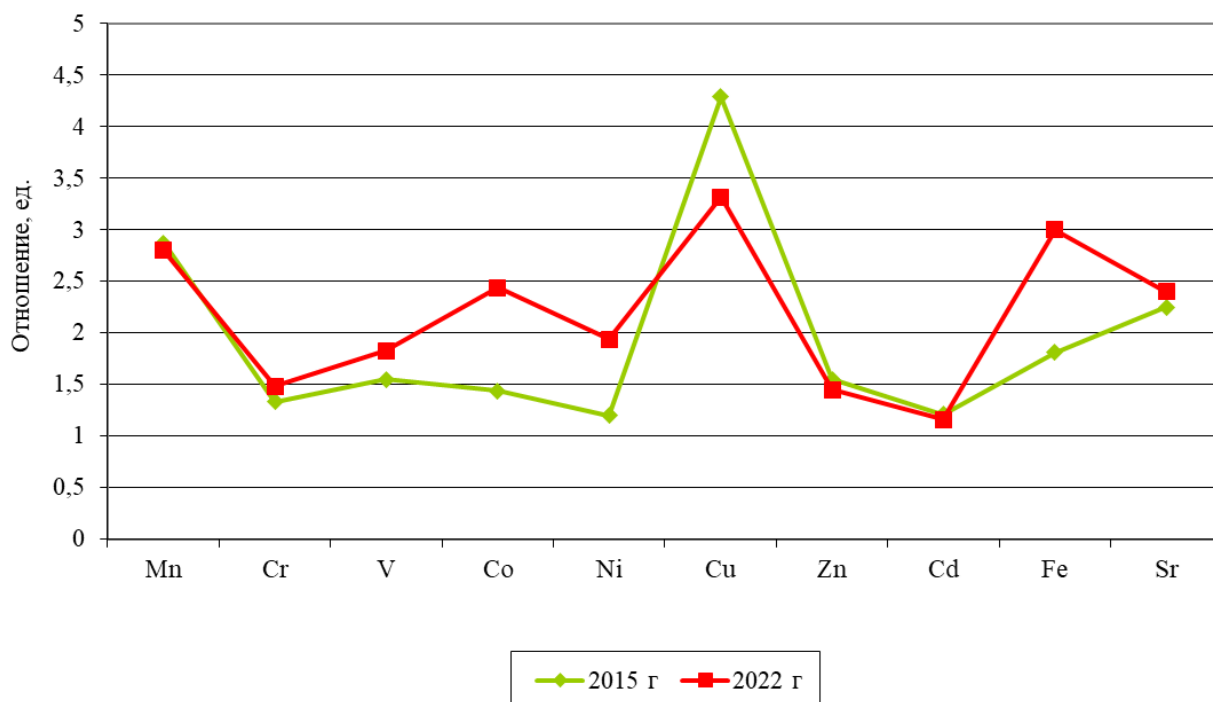


Рис. 1. Отношение содержания изучаемых элементов в биомассе *Pleurozium schreberi* к их содержанию в «референтном виде» мха в 2015 и 2022 гг. в Бузулукском бору.

Отбор проб мха *P. schreberi* на нескольких площадях позволяет оценить некоторую пространственную динамику накопления этим мхом тяжелых металлов на данной территории. Результаты представлены в таблице 1. Весьма сходные показатели практически по всем анализируемым элементам были получены на пробных площадях 1 и 2. По большинству элементов с ними была сходна пробная площадь 3. Из общего правила для этих трех пробных площадей выбивались показатели по Mn, Ni, Pb, они были ниже, чем на площадях 1 и 2, в 1,2–1,5 раза.

Таблица 1. Среднее содержание тяжелых металлов в биомассе мха *Pleurozium schreberi* на разных пробных площадях в Бузулукском бору в 2022 г, мг/ кг воздушно сухой массы

Элемент	Площадь 1	Площадь 2	Площадь 3	Площадь 4	Площадь 5	Площадь 6
Mn	365,600	398,600	269,800	383,400	269,900	333,200
Cr	7,005	6,892	6,781	4,951	5,360	4,715
V	6,480	6,167	5,933	4,499	4,823	4,193
Co	1,089	1,071	0,916	0,702	0,803	0,691
Ni	5,472	5,562	4,524	3,741	4,041	3,759
Cu	7,860	8,158	7,674	6,693	7,608	7,661
Zn	38,000	37,040	34,590	34,480	36,440	35,350
Pb	5,793	6,569	4,597	4,223	4,657	3,881
Cd	0,201	0,273	0,184	0,203	0,187	0,252
Fe	2278,000	2260,000	1939,000	1529,000	1661,000	1360,000
Sr	24,440	26,820	22,950	24,250	26,370	24,350

Изучаемый вид на остальных пробных площадях (4–6) показал сравнимые результаты с тремя первыми пробными площадями по накоплению Zn, Cd, Sr. На пробных площадях 4 и 6 в сходных концентрациях накапливался мхом Mn, а на пробных площадях 5 и 6 – Cu. По остальным элементам для этих трех пробных площадей (4–6) различия были более значимыми, но не критичными. Мы можем

заключить, что для пробных площадей 1, 2, 3 различия в концентрации всех изучаемых элементов были малозначимыми, по сравнению с ними на пробных площадях 3, 5 и 6 различия были более заметными, а концентрации элементов более низкими, чем на других трех пробных площадях. В целом для всех выявленных концентраций были характерны величины одного порядка. Это подтверждает фоновый характер территории Бузулукского бора и биоиндикационный потенциал мха *P. schreberi*.

Выводы

1. Проведенные исследования показали, что в одних и тех же условиях произрастания мох *Pleurozium schreberi* демонстрирует отсутствие временной динамики накопления Mn, Cr, Zn, Cd, Sr (2015 и 2022 гг.). Содержание V, Co, Ni, Fe было более низким в 2015 г., а содержание Cu, наоборот, более высоким, но различия между годами наблюдений не превышали интервала 0,3–1,2 единицы.

2. Пространственная динамика также оказалась достаточно слабой со сходными показателями накопления мхом *Pleurozium schreberi* всех изучаемых элементов для трех из 6 пробных площадей (1–3), для Zn, Cd, Sr концентрации были сходны на всех 6 пробных площадях, для Mn и Cu – на 5 пробных площадях. По остальным элементам (Pb, Fe) на пробных площадях 4–6 (Cr, V, Co, Fe) и на пробных площадях 3–6 (Ni и Pb) концентрации были сходны и уступали показателям с пробных площадей 1 и 2. Иными словами, пространственная динамика проявилась, но для всех пробных площадей были получены концентрации изучаемых элементов, укладывающиеся в параметры одного математического порядка.

3. Полученные результаты позволяют заключить, что Бузулукский бор правильно выбран в качестве фонового участка по загрязнению атмосферного воздуха тяжелыми металлами, а мох *Pleurozium schreberi* может быть использован в качестве биоиндикатора полиметаллического загрязнения воздушной среды для лесостепной и степной зон.

ЛИТЕРАТУРА

- Баргальи Р.** Биогеохимия наземных растений. Пер. с англ. И. Н. Михайловой. – М.: ГЕОС, 2005. – 457 с.
- Богданова Я. А., Прохорова Н. В., Вергель К. Н., Фронтасьева М. В.** Особенности накопления тяжелых 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. <https://doi.org/10.55355/snv2022111101>
- Бухаринова Е. С., Торопов Л. И.** Контроль атмосферных загрязнений биосферы тяжелыми металлами по моховым растениям // Экоаналитика – 2019: тезисы XI Всеросс. конф. по анализу объектов окружающей среды с междунар. участием. – Пермь, 2019. – С. 35–36.
- Ганиева М. В., Филиппов Д. А., Ложкина Р. А.** Тяжелые металлы, в том числе редкоземельные во мхах Северо-Западного и Центрального регионов России // Современные проблемы науки и образования, 2015. – № 5. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=21608> (дата обращения: 16.03.2026).
- Мотузова Г. В., Карпова Е. А.** Химическое загрязнение биосферы и его экологические последствия. – М.: Изд-во Московского университета, 2013. – 304 с.
- Прохорова Н. В., Матвеев Н. М., Павловский В. А.** Аккумуляция тяжелых металлов дикорастущими и культурными растениями в лесостепном и степном Поволжье. – Самара: Изд-во «Самарский университет», 1998. – 131 с.
- Рогова Н. С., Рыжакова Н. К., Борисенко А. Л., Меркулов В. Г.** Изучение аккумуляционных свойств мхов, используемых при мониторинге загрязнения атмосферы // Оптика атмосферы и океана, 2011. – Т. 24. – №. 1. – С. 79–83.
- Соскина Д. В., Богданова Я. А., Прохорова Н. В.** К изучению особенностей накопления тяжелых металлов во мхах Самарской области // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии: Материалы конференции. – 2023. – № 22–2. – С. 349–353. – <https://doi.org/10.14258/pbssm.2023154>
- Черненко Т. В.** Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. – М.: Наука, 2002. – 191 с.
- Frontasyeva M., Harmens H., Uzhinskiy A., Chaligava O. et al.** Mosses as biomonitors of air pollution: 2015/2016 survey on heavy metals, nitrogen and POPs in Europe and beyond. / Report of the ICP Vegetation Moss Survey Coordination Centre. – Dubna: Joint Institute for Nuclear Research, 2020. – 136 p. URL: <https://icpvegetation.ceh.ac.uk/mosses-biomonitoring-air-pollution-20152016-survey-heavy-metals-nitrogen-and-pops-europe-and-beyond> (Accessed 05 March 2026).
- Markert B.** Establishing of 'Reference Plant' for inorganic characterization of different plant species by chemical fingerprinting // Water Air Soil Pollut, 1992. – Vol. 64, № 3–4. – P. 533–538. <https://doi.org/10.1007/BF00483363>
- Tyler G.** Bryophytes and heavy metals: a literature review // Botanical Journal of the Linnean Society, 1990. – Vol. 104, № 1–3. – P. 231–253. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.1990.tb02220.x>
- Zhichkina L., Zudilin S., Zhichkin K., Ariskina O.** Decommissioned oil production sites impact on the forest ecosystems soil cover state (on the example of the National Park “Buzuluk Bor”) // Journal of Physics: Conference Series, 2020. – Vol. 1679, Iss. 5. – Article 052072. In: IOPscience. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/5/052072>