








DOI 10.23859/estr-220726

EDN GHVAZY

УДК 628.516:502.3:582.32 (477.60)

*Научная статья*

## ***Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid в оценке техногенного загрязнения (Ni, Zn, Mn, Al, Se, Cs, La, Sm) трансформированных экотопов Донбасса**

И.И. Зиньковская<sup>1\*</sup>, К.Н. Вергель<sup>1</sup>, А.И. Сафонов<sup>2\*\*</sup>,  
Н.С. Юшин<sup>1</sup>, А.В. Кравцова<sup>1</sup>, О. Чалигава<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Объединенный институт ядерных исследований, 141980, Россия, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6

<sup>2</sup> Донецкий государственный университет, 283000, г. Донецк, ул. Университетская, д. 24

\**inga@jinr.ru*

\*\**a.safonov@donnu.ru*

**Аннотация.** Проведен мониторинговый эксперимент установления экотопической разницы по накоплению Ni, Zn, Mn, Al, Se, Cs, La и Sm мохообразным *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid в условиях антропогенно нарушенной среды Донбасса. Концентрации элементов в гаметофитах растения определены методом нейтронного активационного анализа. Экспозиция образцов проводилась с ноября 2018 г. по май 2019 г. на 24 учетных площадках Центрального Донбасса с разной степенью техногенной трансформации геосистем. Показана разница по накоплению Ni в 6.9, Zn – 10.2, Mn – 6.3, Al – 5.3, Se – 9.6, Cs – 3.9, La – 5.9 и Sm – 5.4 раза при оценке экологически напряженных территорий в сравнении с малонарушенными или восстановленными экотопами. Установлены структурно-функциональные модификации в листовом аппарате бриофита, пригодные для которые рекомендованы для фитомониторинговых исследований в экспресс-диагностике. По результатам факторного анализа были выделены две группы загрязняющих элементов, различающихся по источнику происхождения: в одну из них вошли Al, Ni, Mn, Zn, в другую – Cs, Se, La, Sm. Реализованный опыт рассматривается как элемент первичного скрининга биогеохимических характеристик в Донбассе периода 2018–2019 гг.

**Ключевые слова:** нейтронный активационный анализ, фитоиндикация, экологический фитомониторинг, металлургия, факторный анализ, корреляционный анализ

**ORCID:**

И.И. Зиньковская, <https://orcid.org/0000-0003-0820-887X>

К.Н. Вергель, <https://orcid.org/0000-0001-8158-5589>

А.И. Сафонов, <https://orcid.org/0000-0002-9701-8711>

Н.С. Юшин, <https://orcid.org/0000-0001-5650-4337>

О. Чалигава, <https://orcid.org/0000-0002-7231-9534>

**Для цитирования:** Зиньковская, И.И. и др., 2023. *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid в оценке техногенного загрязнения (Ni, Zn, Mn, Al, Se, Cs, La, Sm) трансформированных экотопов Донбасса. *Трансформация экосистем* 6 (3), 22–38. <https://doi.org/10.23859/estr-220726>

Поступила в редакцию: 26.07.2022

Принята к печати: 23.08.2022

Опубликована онлайн: 18.08.2023

---





DOI 10.23859/estr-220726

EDN GHVAZY

UDC 628.516:502.3:582.32 (477.60)

## Article

# Using moss *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid for assessing the technogenic pollution (Ni, Zn, Mn, Al, Se, Cs, La, and Sm) of transformed ecotopes of Donbass

Inga I. Zinicovscaia<sup>1\*</sup>, Konstantin N. Vergel<sup>1</sup>,  
Andrey I. Safonov<sup>2\*\*</sup>, Nikita S. Yushin<sup>1</sup>,  
Aleksandra V. Kravtsova<sup>1</sup>, Omari Chaligava<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Joint Institute for Nuclear Research, ul. Joliot-Curie 6, Dubna, Moscow Oblast, 141980 Russia

<sup>2</sup> Donetsk State University, ul. Universitetskaya 24, Donetsk, 283000

\*[inga@jinr.ru](mailto:inga@jinr.ru)

\*\*[a.safonov@donnu.ru](mailto:a.safonov@donnu.ru)

---

**Abstract.** The ecotopic difference in the accumulation of Ni, Zn, Mn, Al, Se, Cs, La and Sm in bryophyte *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid was studied during a long-term experiment in the anthropogenically disturbed environment of Donbass. The concentrations of elements in moss gametophytes were determined by neutron activation analysis. The moss samples were exposed from November 2018 through May 2019 at 24 test plots in the central Donbass with varying degrees of technogenic transformation of geosystems. When comparing ecologically stressed areas with intact or restored ecotopes, the difference in the accumulation of Ni was 6.9 times, Zn – 10.2, Mn – 6.3, Al – 5.3, Se – 9.6, Cs – 3.9, La – 5.9, and Sm – 5.4 times. There were structural and functional modifications in the leaf apparatus of bryophyte, suitable for using in further phytomonitoring studies for express diagnostics. According to the results of the factor analysis, two groups of pollutants were identified, differing in the source of origin: (1) Al, Ni, Mn, and Zn, (2) Cs, Se, La, and Sm. The obtained data are considered as part of the primary screening of biogeochemical characteristics in the Donbass in 2018–2019. Within the gradient of toxic load and local impact, the leading role of mining and metallurgical facilities in the pollution of natural ecosystems of Donbass was proved.

**Keywords:** neutron activation analysis, phytoindication, ecological phytomonitoring, metallurgy, factor analysis, correlation analysis

**ORCID:**I.I. Zinicovscaia, <https://orcid.org/0000-0003-0820-887X>K.N. Vergel, <https://orcid.org/0000-0001-8158-5589>A.I. Safonov, <https://orcid.org/0000-0002-9701-8711>N.S. Yushin, <https://orcid.org/0000-0001-5650-4337>O. Chaligava, <https://orcid.org/0000-0002-7231-9534>

**To cite this article:** Zinicovscaia, I.I. et al., 2023. Using moss *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid for assessing the technogenic pollution (Ni, Zn, Mn, Al, Se, Cs, La, and Sm) of transformed ecotopes of Donbass. *Ecosystem Transformation* 6 (3), 22–38. <https://doi.org/10.23859/estr-220726>

Received 26.07.2022

Accepted: 23.08.2022

Published online: 18.08.2023

---

**Введение**

Проведение экспертных мониторинговых исследований в регионах интенсивной хозяйственной деятельности человека является неотъемлемой частью работы экологических служб и научно-исследовательских лабораторий (Трубина и др., 2014; Bayouli et al., 2021; Hancock et al., 2020; Pashentsev et al., 2019; Xu et al., 2021). Комплексная оценка антропогенных трансформаций и понимание механизмов устойчивости экосистем требуют участия специалистов различных областей знаний: геохимии и ландшафтоведения (Глазовская, 2007; Уфимцева, 2015; Wang et al., 2020; Yu et al., 2021), почвоведения (Kabata-Pendias, 2001), гидроэкологии (Neamtu et al., 2021; Zaghloul et al., 2020), биоиндикации (Опекунова, 2016; Yuan et al., 2020), структурной ботаники (Bell, 1991), токсикологии (Меена, 2020), урбаноэкологии (Peng et al., 2018; Yezprintsev et al., 2019), климатологии (Zhao et al., 2020). Актуальными являются квантификационные исследования для территорий активной горнодобывающей промышленности (Bian et al., 2020; Massante, 2015; Wu et al., 2021; Zhang et al., 2020; Zhang et al., 2021).

Территория современного Донбасса в биогеохимическом контексте изучена мало. Техногенные процессы в совокупности с фактором военных действий (Государственный комитет, 2022) обуславливают здесь формирование геохимического контраста – среды с резкими перепадами содержания отдельных элементов в индикационных субстратах (Сафонов и др., 2023).

Мохообразные по своему элементному составу (Алемасова и др., 2018; Khiem et al., 2020; Quyet et al., 2021; Świsłowski et al., 2022; Vergel et al., 2020; Zinicovscaia et al., 2021) и функциональным характеристикам (Kozlova et al., 2022) являются надежными индикаторами для проведения мониторинга в условиях загрязнения природных сред (Frontasyeva et al., 2020; Hristozova, 2020). На сегодняшний день территория Донбасса в аспекте накопления элементов мохообразными изучена фрагментарно (Алемасова и др., 2019; Sergeeva et al., 2021a, b).

Цель работы – на основании данных о накоплении Ni, Zn, Mn, Al, Se, Cs, La и Sm в гаметофитах *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid провести оценку техногенного загрязнения функционально различных экотопов в геохимически контрастном регионе.

**Материалы и методы**

Образцы мха *C. purpureus* были отобраны из буферной зоны Республиканского ландшафтного парка «Донецкий Кряж». Выбор данного вида обусловлен его широкой экологической амплитудой и наиболее высокой выживаемостью по сравнению с другими доминирующими в регионе видами мхов, продемонстрированной в ходе предыдущих исследований (Сафонов и Морозова, 2021; Сафонов и др., 2023; Safonov, 2013, 2022). В ноябре 2018 г. образцы были трансплантированы в места мониторинговых учетных площадок (Рис. 1); все учетные площадки находились в одинаковом открытом доступе к воздействию осадочных выпадений. Трансплантация образцов мха проводилась в соответствии с требованиями и отработанными методиками (Frontasyeva et al., 2020; Hristozova, 2020; Sergeeva et al., 2021a; Vergel et al., 2020; Zinicovscaia et al., 2021). В мае 2019 г. был собран полугодовой прирост гаметофитов. Процесс сбора сопровождался описанием жизненного состояния растения по анатомо-морфологическим визуальным показателям (с указа-

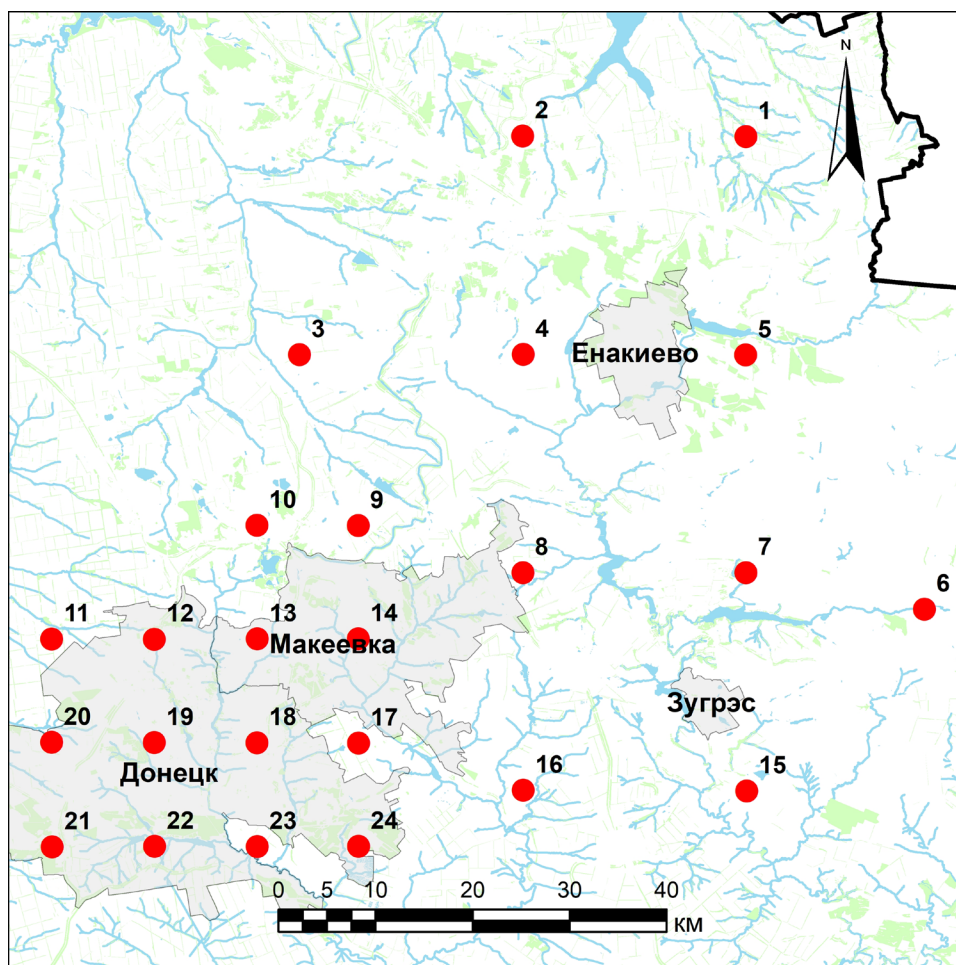


Рис. 1. Карта точек экспонирования образцов *S. purpureus* в центральном Донбассе.

нием тератологических новообразований, некротических проявлений и структурно-функциональных отклонений от нормы по пигментации).

Для реализации бриоэкологических наблюдений использовались апробированные ранее пробные площадки (станции) в рамках существующей наблюдательной сети в донецком экономическом регионе (Сафонов, 2019; Сафонов и Гермонова, 2019; Сафонов и Глухов, 2021; Safonov, 2016; Safonov and Glukhov, 2021). Учетные площадки были дифференцированы по функциональному принципу эксплуатационного назначения экотопов:

1) Техногенные (промышленные площадки предприятий, объекты ландшафтной трансформации угледобычи и переработки, стационарные источники выбросов системы теплоснабжения): 1 – Дебальцевский завод металлургического машиностроения, Углегорская теплоэлектростанция; 4 – пгт Корсунь, территория импакта Енакиевского металлургического комбината; 5 – г. Енакиєво, селитебно-промышленный конгломерат, 13 – Ворошиловский район г. Донецка, импакт Донецкого металлургического завода; 15 – г. Зугрєс, импакт Зуевской теплоэлектроцентрали и энергомеханического завода в селитебной зоне; 17 – г. Донецк, район шахты Запаревальная; 19 – Ленинский район г. Донецка (предприятия горно-металлургической промышленности); 20 – Кировский район г. Донецка (предприятия горнодобывающей и перерабатывающей промышленности).

2) селитебные (районы плотной жилой застройки, бытовых коммуникаций): 11 – п. Пески Ясиноватской агломерации; 12 – п. Спартак Ясиноватской агломерации; 14 – г. Макеевка (Центрального городского район); 16 – г. Иловайск, включая железнодорожную развязку; 22 – г. Моспино в южной части агломерации г. Донецка; 24 – Пролетарский район г. Донецка.

3) малонарушенные и(или) восстановленные экотопы (рекреационные зоны в черте городов, буферные территории промышленных узлов на значительном удалении от них): 2 – система прудов

дов г. Горловки; 3 – пгт Пантелеймоновка Горловско-Енакиевской агломерации; 6 – г. Шахтерск Трезской агломерации; 7 – пгт Зуевка (Зуевский ландшафтный парк); 8 – г. Харцызск (западная граница города); 9 – пгт Ясиновка Макеевской агломерации (южные микрорайоны населенного пункта); 10 – парковые территории г. Ясиноватая; 18 – Куйбышевский район г. Донецка (микрорайон Красный Пахарь), 21 – Петровский район г. Донецка (зона рекреации); 23 – п. Авдотьино (участок естественной степи) Донецкой агломерации.

Содержание Ni, Zn, Mn, Al, Se, Cs, La и Sm в образцах мха определяли методом нейтронного активационного анализа (НАА) на установке РЕГАТА импульсного быстрого реактора ИБР-2 в лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований (Дубна, Россия).

Концентрации короткоживущих изотопов (Mn, Al) определяли при облучении образцов тепловыми нейтронами с мощностью потока  $1.2 \times 10^{12} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  в течение 3 мин. После времени охлаждения наведенную активность образцов измеряли в течение 15 мин.

Для определения долгоживущих изотопов (Ni, Zn, Se, Cs, La и Sm) образцы облучали в кадмиевом канале потоком резонансных нейтронов  $1.1 \times 10^{11} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  в течение 3 дней. Затем образцы измеряли дважды, после времени охлаждения 4 и 20 дней. Время измерения варьировалось от 30 мин до 1.5 часа.

Контроль качества аналитических измерений осуществляли с помощью стандартных образцов. Обработка спектров наведенной  $\gamma$ -активности проводилась с помощью системы Genie 2000, а расчет концентраций элементов выполнялся с помощью пакета программ, разработанных в ЛНФ ОИЯИ (Pavlov et al., 2016). Статистический анализ результатов проводился с помощью пакета программы Statistica 12.

Для оценки техногенной нагрузки были рассчитаны значения коэффициента техногенной концентрации  $K_c$ :

$$K_c = \frac{K_{\text{экс}}}{K_{\text{фон}}},$$

где  $K_{\text{экс}}$  – концентрация элемента во мхе после экспонирования;  $K_{\text{фон}}$  – концентрация элемента во мхе фоновой территории.

Так как в каждой точке было определено загрязнение воздуха несколькими элементами, также были рассчитаны значения индекса нагрузки загрязнения (PLI):

$$PLI = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n K_c},$$

где  $K_c$  – коэффициенты техногенной концентрации;  $n$  – число элементов.

Согласно значениям  $PLI^1$  (Водяницкий, 2013; Шайхутдинова, 2015) уровень загрязнения можно классифицировать как умеренный до незагрязненного (при  $PLI < 2$ ), умеренно загрязненный (при  $2 \leq PLI < 4$ ); сильно загрязненный (при  $4 \leq PLI < 6$ ); очень сильно загрязненный (при  $PLI > 6$ ).

## Результаты и обсуждение

По окончании полугодичного экспонирования для образцов *S. purpureus* были характерны преимущественно неспецифические реакции общего угнетения растительных объектов в неблагоприятных условиях среды (Табл. 1). Поскольку *S. purpureus* является стресс-устойчивым видом с широким диапазоном толерантности к климатическим факторам экологических режимов, например, освещенность, влажность и пр. (Сафонов и Морозова, 2021), то появления тератных отклонений на уровне отдельных вегетативных органов и конформационных тканей мы предположительно связываем с конкретными геохимическими аномалиями в условиях техногенного региона.

Согласно проверке с помощью  $t$ -критерия Стьюдента для одной выборки, содержания большинства элементов в экспонируемых образцах мха были выше по сравнению с контролем

<sup>1</sup> МУ 2.1.7.730-99. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест.

( $p < 0.05$ ); исключение составили в некоторых случаях концентрации элементов в точках 21 и 23, хотя при таких величинах речь идет уже об индивидуальной физиологической норме (Kabata-Pendias and Pendias, 2001; Neamtu et al., 2021) в условиях геохимического фона. Самое высокое содержание алюминия было определено во мхах, экспонированных в Ворошиловском районе г. Донецка, а самое низкое – в п. Авдотьино Донецкой агломерации (Табл. 2). Для п. Авдотьино были определены и минимальные содержания марганца, никеля, цинка и селена. Максимальное содержание марганца было определено в Ленинском районе г. Донецка (предприятия горно-металлургической промышленности), а никеля – в Ворошиловском районе г. Донецка. В Кировском районе были зафиксированы самые высокие содержания селена, лантана и самария, в то время как их минимальные значения были в образцах, экспонированных в Петровском районе г. Донецка. Максимальное количество цинка накопилось во мхах, экспонированных в г. Зугрэс, а цезия – в районе Дебальцевского завода металлургического машиностроения. Таким образом, при оценке экологически напряженных территорий в сравнении с малонарушенными или восстановленными экотопами разница по накоплению для элементов в среднем составила: Ni в 6.9, Zn – 10.2, Mn – 6.3, Al – 5.3, Se – 9.6, Cs – 3.9, La – 5.9 и Sm – 5.4 раза.

Значения Кс в точках 1–10, 13, 16, 19 и 20 для всех элементов превышали 1.0 (Табл. 3); в точках 11, 12, 14, 15, 17 и 24 они были выше 1.0 для всех элементов, кроме Se. В точках 21 и 23 значения Кс для Al, Ni, Cs, La не превышали единицы.

Согласно значениям PLI, во всех точках экспонирования образцов мха воздух определяется как очень сильно загрязненный определенными элементами. Максимальный уровень загрязнения наблюдался вблизи Дебальцевского завода металлургического машиностроения, а также предприятий горнодобывающей и перерабатывающей промышленности.

Табл. 1. Фенотипические реакции *Ceratodon purpureus* на смену условий произрастания в мониторинговом эксперименте.

Пробная площадь	Структурно-функциональные изменения гаметофита
1	Хлороз (более 40% площади), некротические образования (более 20% площади); краевой некроз верхушки, часто – гипогенезия листа
4, 5	Фасциации осей гаметофита, единичные случаи гипогенезии, прозенхимизация клеток вдоль центральной жилки листа, трансформация скульптуры адоксиальной поверхности листа
11, 12,	Хлороз (более 20% площади), некротические образования (более 30% площади), скручивание верхушки
13, 19, 20	Дистопия элементов гаметофита в общей архитектонике прироста, хлороз до 50% всей поверхности, некротические образования (более 20% площади), трансформация скульптуры адоксиальной поверхности листа, единичные изгибы центральной жилки листа
15	Олигомеризация листочков при деструкции по жилкованию, хлорозы до 20%, некрозы – не более 20% поверхности листа
14, 16	Бесхлорофилльные листья, нетипичная гетерогенность паренхимных клеток по соотношению размеров, хлороз (20–25% площади)
17, 22, 24	Нетипичная пролификация спорофита, более 30% листового аппарата гипогенезировано, прозенхимные клетки вдоль центральной жилки
6, 9, 10, 18	Локальные хлорозы у основания листа, скручивание боковых частей листа
2, 3, 7, 8, 21, 23	Отклонений от нормы и структурных изменений не установлено

Табл. 2. Содержание химических элементов (С, мкг/кг) и погрешность измерения (%) в контроле и экспонированных пробах мха *Selaginella selaginoides* в экотопах Донбасса.

Пробная площадь	Элемент															
	Al		Mn		Ni		Zn		Se		Cs		La		Sm	
	С	%	С	%	С	%	С	%	С	%	С	%	С	%	С	%
контроль	9560	6	202	9	19	10	98	6	0.77	11	1.29	4	7	4	1	10
1	32100	7	1040	7	46	9	564	5	2	15	4.31	5	29.1	9	4.5	10
2	26100	7	390	7	37	9	255	5	1.78	12	3.76	5	17.9	9	3.1	10
3	18700	7	430	7	34	9	170	5	0.84	14	2.27	5	13.6	9	2.4	10
4	29100	7	1030	7	41	9	553	5	1.3	14	3.05	5	14.8	9	2.48	10
5	27200	7	1350	7	36	9	499	5	1.31	17	2.72	5	14.2	9	2.29	10
6	21400	7	660	7	32.5	9	469	5	1.25	12	1.98	5	14.9	9	2.79	10
7	22000	7	1000	7	43	9	159	6	0.78	18	2.15	5	12.8	9	2.62	9
8	23800	7	910	7	39	10	547	5	1.24	16	2.51	5	14.1	9	2.74	10
9	18900	7	540	7	29.8	9	455	5	1.02	14	2.59	5	12.4	9	2.18	10
10	16500	7	450	7	27.4	9	380	8	0.93	10	1.98	5	10	9	1.94	10
11	36700	7	1030	7	40	10	450	8	0.68	17	3	5	24.9	9	4.2	9
12	32000	7	740	7	57	9	253	8	0.73	13	3.82	5	22.4	9	4	10
13	38400	7	1290	7	90	9	670	8	2.26	9	3.54	5	19.5	9	3.6	10
14	24400	7	600	7	27.8	9	126	8	0.68	12	2.55	5	14	9	2.61	9
15	19400	7	840	7	27	11	1030	8	0.68	13	2.3	5	13.3	9	2.46	9
16	27800	7	620	7	38	10	530	8	0.82	12	2.92	5	16.4	9	3.04	9
17	18900	7	740	7	48	9	640	8	0.79	12	2.26	5	13.6	9	2.49	9
18	17200	7	580	7	16.8	9	215	6	0.64	17	1.51	5	9.4	9	1.66	10
19	30800	7	1460	7	43	8	392	6	1.05	17	2.53	5	22.2	9	3.6	10
20	34000	7	820	7	43	9	397	6	5	11	3.65	5	30.4	9	5.1	10
21	7900	7	314	7	15.7	9	363	6	1.17	12	1.1	5	5.1	9	0.95	10
22	22800	7	490	7	45	8	277	6	1.95	12	2.36	5	14.4	9	2.6	10
23	7300	7	204	7	13.8	13	101	6	0.56	16	1.17	5	6.3	9	1.29	10
24	14300	7	440	7	26.2	9	870	6	0.52	19	1.55	5	9.4	9	1.76	10

Табл. 3. Значения коэффициентов техногенной концентрации и индекса нагрузки загрязнения для анализируемых проб.

Пробная площадь	Кс								PLI
	Al	Mn	Ni	Zn	Se	Cs	La	Sm	
1	3.4	5.1	2.4	5.8	2.6	3.3	4.2	4.5	23.3
2	2.7	1.9	1.9	2.6	2.3	2.9	2.6	3.1	12.1
3	2.0	2.1	1.8	1.7	1.1	1.8	1.9	2.4	6.8
4	3.0	5.1	2.2	5.6	1.7	2.4	2.1	2.5	16.6
5	2.8	6.7	1.9	5.1	1.7	2.1	2.0	2.3	16.6
6	2.2	3.3	1.7	4.8	1.6	1.5	2.1	2.8	12.1
7	2.3	5.0	2.3	1.6	1.0	1.7	1.8	2.6	10.3
8	2.5	4.5	2.1	5.6	1.6	1.9	2.0	2.7	14.9
9	2.0	2.7	1.6	4.6	1.3	2.0	1.8	2.2	10.1
10	1.7	2.2	1.4	3.9	1.2	1.5	1.4	1.9	7.4
11	3.8	5.1	2.1	4.6	0.9	2.3	3.6	4.2	20.6
12	3.3	3.7	3.0	2.6	0.9	3.0	3.2	4.0	15.7
13	4.0	6.4	4.7	6.8	2.9	2.7	2.8	3.6	26.0
14	2.6	3.0	1.5	1.3	0.9	2.0	2.0	2.6	9.7
15	2.0	4.2	1.4	10.5	0.9	1.8	1.9	2.5	19.1
16	2.9	3.1	2.0	5.4	1.1	2.3	2.3	3.0	14.1
17	2.0	3.7	2.5	6.5	1.0	1.8	1.9	2.5	13.9
18	1.8	2.9	0.9	2.2	0.8	1.2	1.3	1.7	7.8
19	3.2	7.2	2.3	4.0	1.4	2.0	3.2	3.6	18.8
20	3.6	4.1	2.3	4.1	6.5	2.8	4.3	5.1	24.7
21	0.8	1.6	0.8	3.7	1.5	0.9	0.7	1.0	9.0
22	2.4	2.4	2.4	2.8	2.5	1.8	2.1	2.6	11.0
23	0.8	1.0	0.7	1.0	0.7	0.9	0.9	1.3	7.4
24	1.5	2.2	1.4	8.9	0.7	1.2	1.3	1.8	10.9

Табл. 4. Парная корреляция между загрязнителями. \* –  $p = 0.05$ , \*\* –  $p = 0.01$ 

	Al	Mn	Ni	Zn	Se	Cs	La	Sm
Al	1							
Mn	0.73**	1						
Ni	0.77**	0.6**	1					
Zn	0.13	0.32	0.2	1				
Se	0.45*	0.19	0.37	0.02	1			
Cs	0.86**	0.48*	0.68**	0.1	0.51*	1		
La	0.87**	0.55**	0.58**	0.09	0.6**	0.86**	1	
Sm	0.89**	0.54**	0.64**	0.08	0.59**	0.86**	0.99**	1



Результаты корреляционного анализа (Табл. 4) показали высокие коэффициенты корреляции ( $r > 0,70$ ), что, вероятно, свидетельствует о едином источнике их попадания в атмосферу.

Так, высокие значения коэффициентов корреляции между парами элементов Mn–Al и Ni–Al позволяют предположить, что источником атмосферных выпадений этих элементов является металлургическое производство.

Высокая корреляция между парами Cs–Al, La–Al, Sm–Al, La–Cs, Sm–Cs и La–Sm, вероятно, указывает на то, что источниками этих элементов могут быть процесс выветривания поверхностного слоя земной коры, а также и добыча и переработка угля.

Для выявления возможных источников загрязнения окружающей среды определенными элементами применяли метод главных компонент, который в отличие от корреляционного анализа, устанавливающего парные корреляции, позволяет выявлять зависимости между группами элементов, характеризующие тот или иной источник загрязнения. По результатам анализа (Рис. 2) были выделены две ассоциации элементов. В первую из них вошли Al, Ni, Mn, Zn, источниками которых можно считать металлургические предприятия. Вторая группа включила Cs, Se, La, Sm; источниками этих элементов можно считать добычу угля (Lemly, 2008; Гамов и др., 2016), а также дорожную пыль.

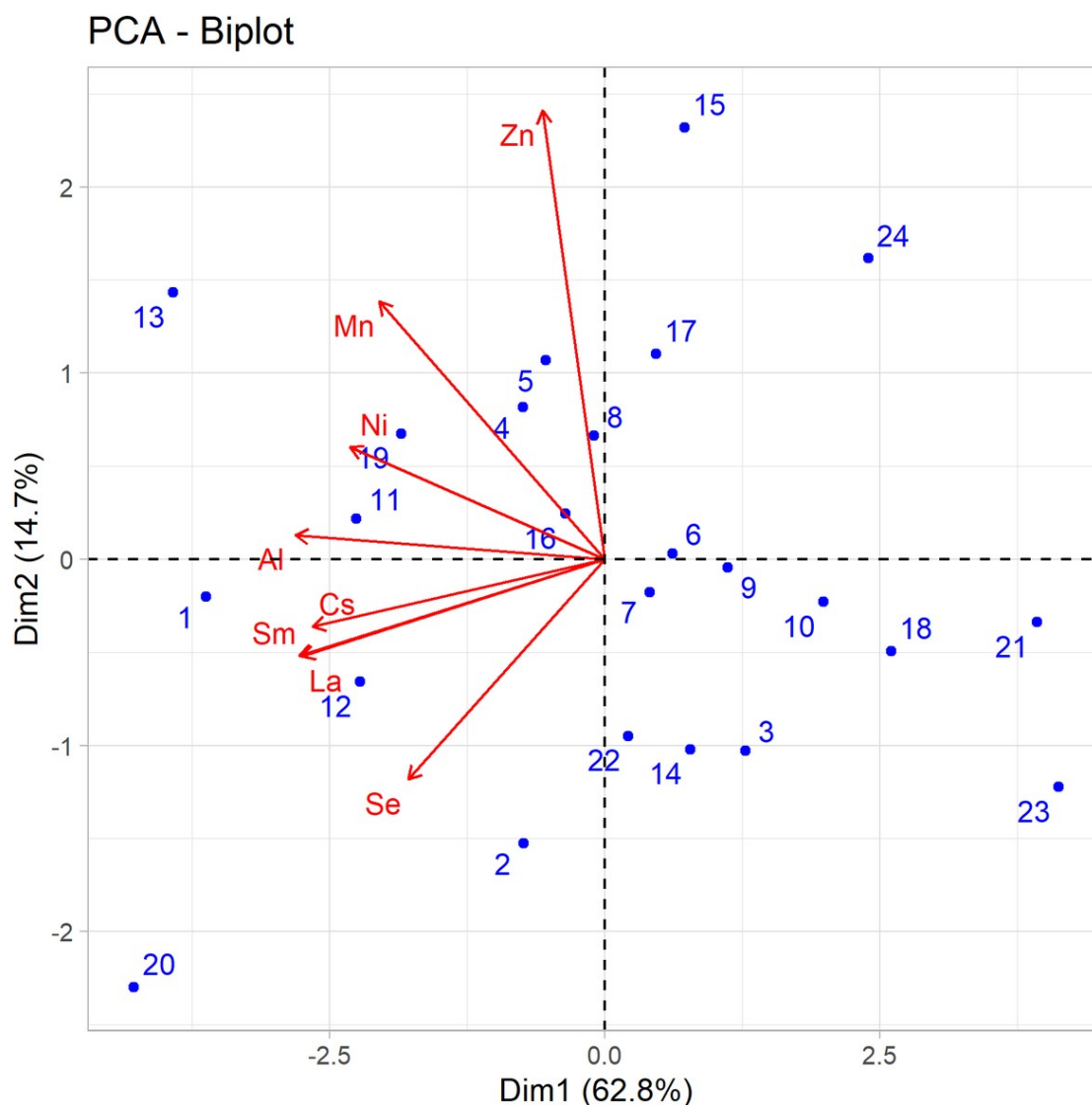


Рис. 2. Ординация элементов, определенных в пробах мха *Ceratodon purpureus*, на плоскости двух первых главных компонент.

Учитывая, что на территории Донбасса в 2018–2019 гг. не проводились полномасштабные исследования по загрязненности воздуха в рамках существующей фитомониторинговой сети (Государственный комитет, 2022), реализованный эксперимент является единственным источником скрининговой информации о состоянии локальных экосистем в этой степной части Восточной Европы.

## Выводы

По результатам достоверного различия в накоплении Ni, Zn, Mn, Al, Se, Cs, La и Sm мхом *Ceratodon purpureus* в мониторинговых точках промышленно развитого Донбасса за 6 месяцев (с ноября 2018 по май 2019 гг.) установлена специфика в концентрировании мхами отдельных элементов в разных учетных площадках. Такая закономерность обусловлена в первую очередь полномасштабной хозяйственной трансформацией территории Донбасса.

Установлено, что при увеличении техногенного загрязнения нарушаются структурно-функциональные параметры растительного организма *Ceratodon purpureus*, которые проявляются во многочисленных хлорозах и некрозах листовой пластинки, а также в патологических трансформациях строения тканей до специфического тератообразования на анатомическом уровне развития. Выявленные аномалии могут служить фитоиндикационной характеристикой при проведении экспресс-анализа уровня загрязнения в полевой диагностике.

Согласно значениям индекса нагрузки, загрязнение исследуемыми элементами можно квалифицировать как очень сильное.

## Список литературы

- Алемасова, А.С., Пенькова, Ю.И., Пивоварова, А.С., Остапенко, Р.В., 2018. Влияние военных действий на содержание некоторых металлов в почве Саур-Могилы, Донбасс. *Теоретическая и прикладная экология* 3, 33–39. <http://www.doi.org/10.25750/1995-4301-2018-3-033-039>
- Алемасова, А.С., Сафонов, А.И., Сергеева, А.С., 2019. Накопление тяжелых металлов мохообразными в различных экотопах Донбасса. *Материалы Международной научной конференции «Трансформация экосистем под воздействием природных и антропогенных факторов»*. Киров, Россия, 60–65.
- Водяницкий, Ю.Н., 2013. Загрязнение почв тяжелыми металлами и металлоидами и их экологическая опасность (аналитический обзор). *Почвоведение* 7, 872–881.
- Гамов, М.И., Левченко, С.В., Рылов, В.Г., Рыбин, И.В., Труфанов, А.В., 2016. Закономерности формирования и перспективы комплексного использования металлоносных углей Восточного Донбасса. *Геология и геофизика* 57 (8), 1477–1487.
- Глазовская, М.А., 2007. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. МГУ, Москва, Россия, 350 с.
- Государственный комитет по экологической политике и природным ресурсам при Главе Донецкой Народной Республики, 2022. Электронный ресурс. URL: <https://gkesopoldnr.ru/> (дата обращения: 22.07.2022).
- Опекунова, М.Г., 2016. Биоиндикация загрязнений. Учебное пособие. Санкт-Петербургский университет, Санкт-Петербург, Россия, 300 с.
- Сафонов, А.И., 2019. Тератогенез растений-индикаторов промышленного Донбасса. *Разнообразие растительного мира* 1 (1), 4–16. <http://www.doi.org/10.22281/2686-9713-2019-1-4-16>
- Сафонов, А.И., Алемасова, А.С., Зиньковская, И.И., Вергель, К.Н., Юшин, Н.С., Кравцова, А.В., Чалигава, О., 2023. Морфогенетические аномалии бриобионтов в условиях геохимически контрастной среды Донбасса. *Геохимия* 68 (10). <https://doi.org/10.31857/S0016752523100114>

- Сафонов, А.И., Гермонова, Е.А., 2019. Экологические сети фитомониторингового назначения в Донбассе. *Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона* **3–4**, 37–42.
- Сафонов, А.И., Глухов, А.З., 2021. Фитомониторинг в техногенно трансформированной среде: методология и практика. *Экосистемы* **28**, 16–28.
- Сафонов, А.И., Морозова, Е.И., 2021. Видовое разнообразие бриобионтов мониторинговой сети Центрального Донбасса. *Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона* **1–2**, 39–43.
- Трубина, М.Р., Мухачева, С.В., Безель, В.С., Воробейчик, Е.Л., 2014. Содержание тяжелых металлов в плодах дикорастущих растений в зоне аэротехногенного воздействия Среднеуральского медеплавильного завода (Свердловская область). *Растительные ресурсы* **50** (1), 67–83.
- Уфимцева, М.Д., 2015. Закономерности накопления химических элементов высшими растениями и их реакции в аномальных биогеохимических провинциях. *Геохимия* **5**, 450–465.
- Шайхутдинова, А.Н., 2015. Оценка степени загрязнения агрогенных почв Кузбасса подвижными формами тяжелых металлов *Сборник материалов V Международной научной конференции «Отражение био-, гео-, антропогенных взаимодействий в почвах и почвенном покрове»*. Томск, Россия, 286–289.
- Bayouli, I.T., Bayouli, H.T., Dell'Oca, A., Meers, E., Sun, J., 2021. Ecological indicators and bioindicator plant species for biomonitoring industrial pollution: Eco-based environmental assessment. *Ecological Indicators* **125**, 107508. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107508>
- Bell, A.D., 1991. *Plant form: An illustrated guide to flowering plant morphology*. Oxford University Press, New York, USA, 341 p.
- Bian, Z., Yu, H., Hou, J., Mu, S., 2020. Influencing factors and evaluation of land degradation of 12 coal mine areas in Western China. *Journal of China Coal Society* **45**, 338–350.
- Frontasyeva, M., Harmens, H., Uzhinskiy, A., Chaligava, O. et al., 2020. 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. Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia, 136 p.
- Hancock, G.R., Duque, J.F.M., Willgoose, G.R., 2020. Mining rehabilitation – Using geomorphology to engineer ecologically sustainable landscapes for highly disturbed lands. *Ecological Engineering* **155**, 105836. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105836>
- Hristozova, G., Marinova, S., Motyka, O., Svozilík, V., Zinicovskaia, I., 2020. Multivariate assessment of atmospheric deposition studies in Bulgaria based on moss biomonitors: trends between the 2005/2006 and 2015/2016 surveys. *Environmental Science and Pollution Research* **27** (31), 39330–39342. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10005-w>
- Kabata-Pendias, A., Pendias, H., 2001. *Trace elements in soil and plants*. CRC Press LLC, USA, Boca Raton, USA, 413 p.
- Khiem, L.H., Sera, K., Hosokawa, T., Nam, L.D., Quyet, N.H. et al., 2020. Active moss biomonitoring technique for atmospheric elemental contamination in Hanoi using proton induced X-ray emission. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **325** (2), 515–525. <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07253-y>

- Kozlova, E.A., Orlova, E.E., Zubik, I.N., 2022. Growth and development analysis of silver Brium (*Bryum argentium* Hedw.) depending on illumination level influence. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* **6**, 042012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/981/4/042012>
- Lemly, A.D. 2008. Aquatic hazard of selenium pollution from coal mining. In: Fosdyke, Gerald B. ed. *Coal Mining: Research, Technology and Safety*. Chapter 6. Nova Science Publishers, Inc. 167–183.
- Massante, J.C., 2015. Mining disaster: restore habitats now. *Nature* **528**, 39. <https://doi.org/10.1038/528039c>
- Meena, M.K., Singh, A.K., Prasad, L.K., Islam, A., Meena, M.D. et al., 2020. Impact of arsenic-polluted groundwater on soil and produce quality: a food chain study. *Environmental Monitoring and Assessment* **192** (12), 785. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08770-9>
- Neamtu, R., Sluser, B., Plavan, O., Teodosiu, C., 2021. Environmental monitoring and impact assessment of Prut River cross-border pollution. *Environmental Monitoring and Assessment* **193** (340), 09110. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09110-1>
- Pashentsev, D.A., Abramova, A.I., Eriashvili, N.D., Grimalskaya, S.A., Gafurova, A.Ya. et al., 2019. Digital software of industrial enterprise environmental monitoring. *Ekoloji* **28** (107), 243–251.
- Pavlov, S.S., Dmitriev, A.Y., Frontasyeva, M.V., 2016. Automation system for neutron activation analysis at the reactor IBR-2, Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **309**, 27–38. <https://doi.org/10.1007/s10967-016-4864-8>
- Peng, J., Pan, Y., Liu, Y., Zhao, H., Wang, Y., 2018. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape. *Habitat International* **71**, 110–124. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2017.11.010>
- Quyut, N.H., Khiem, L.H., My, T.T.T., My, N.T.B., Frontasieva, M. et al., 2021. Biomonitoring of chemical element air pollution in hanoi using barbula indica moss. *Environmental Engineering and Management Journal* **20** (5), 791–800.
- Safonov, A.I., 2013. Phyto-qualimetry of toxic pressure and the degree of ecotopes transformation in Donetsk region. *Problems of ecology and nature protection of technogenic region* **13** (1), 52–59.
- Safonov, A.I., 2016. Phytoindicational monitoring in Donetsk. *World Ecology Journal* **6** (4), 59–71.
- Safonov, A., 2022. Ecological scales of indicator plants in an industrial region. *BIO Web of Conferences* **43**, 03002. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20224303002>
- Safonov, A., Glukhov, A., 2021. Ecological phytomonitoring in Donbass using geoinformational analysis *BIO Web Conf.* **31**, 00020 <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213100020>
- Sergeeva, A., Zinicovscaia, I., Grozdov, D., Yushin, N., 2021a. Assessment of selected rare earth elements, HF, Th, and U in the Donetsk region using moss bags technique. *Atmospheric Pollution Research* **12** (9), 101165. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101165>
- Sergeeva, A., Zinicovscaia, I., Vergel, K., Yushin, N., 2021b. The effect of heavy industry on air pollution studied by active moss biomonitoring in Donetsk region. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* **80** (3), 546–557. <https://doi.org/10.1007/s00244-021-00834-2>
- Świsłowski, P., Vergel, K., Zinicovscaia, I., 2022. Mosses as a biomonitor to identify elements released into the air as a result of car workshop activities. *Ecological Indicators* **138**, 108849. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108849>

- Vergel, K., Zinicovscaia, I., Yushin, N., Gundorina, S., 2020. Assessment of atmospheric deposition in Central Russia using moss biomonitors, neutron activation analysis and GIS technologies. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **325** (3), 807–816. <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07234-1>
- Wang, S., Huang, J., Yu, H., Ji, C., 2020. Recognition of landscape key areas in a coal mine area of a semi-arid steppe in China: a case study of Yimin open-pit coal mine. *Sustainability* **12**, 2239.
- Wu, Z., Lei, S., Yan, Q., Bian, Z., Lu, O., 2021. Landscape ecological network construction controlling surface coal mining effect on landscape ecology: A case study of a mining city in semi-arid steppe. *Ecological Indicators* **133**, 108403.
- Xu, W., Wang, J., Zhang, M., Li, S., 2021. Construction of landscape ecological network based on landscape ecological risk assessment in a large-scale opencast coal mine area. *Journal of Cleaner Production* **286**, 125523.
- Yeprintsev, S.A., Shekoyan, S.V., Lepeshkina, L.A., Voronin, A.A., Klevtsova, M.A., 2019. Technologies for creating geographic information resources for monitoring the socio-ecological conditions of cities. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **582** (1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/582/1/012012>
- Yu, H., Huang, J., Ji, C., Li, Z., 2021. Construction of a landscape ecological network for a large-scale energy and chemical industrial base: a case study of Ningdong, China. *Land* **10** (4), 344.
- Yuan, J., Bian, Z., Yan, Q., Gu, Z., Yu, H., 2020. An approach to the temporal and spatial characteristics of vegetation in the growing season in Western China. *Remote Sensing* **12** (6), 945.
- Zaghloul, A., Saber, M., Gadow, S., Awad, F., 2020. Biological indicators for pollution detection in terrestrial and aquatic ecosystems. *Bulletin of the National Research Centre* **44** (127), 385.
- Zhang, M., Wang, J., Li, S., Feng, D., Cao, E., 2020. Dynamic changes in landscape pattern in a large-scale opencast coal mine area from 1986 to 2015: a complex network approach. *Catena* **194**, 104738.
- Zhang, P., Ye, Q., Yu, Y., 2021. Research on farmers' satisfaction with ecological restoration performance in coal mining areas based on fuzzy comprehensive evaluation. *Global Ecology and Conservation* **32**, 1934.
- Zhao, A., Yu, Q., Feng, L., Zhang, A., Pei, T., 2020. Evaluating the cumulative and time-lag effects of drought on grassland vegetation: a case study in the Chinese Loess Plateau. *Journal of Environmental Management* **261**, 110214.
- Zinicovscaia, I., Hramco, C., Chaligava, O., Yushin, N., Grozdov, D., Vergel, K., Duca, G., 2021. Accumulation of potentially toxic elements in mosses collected in the Republic of Moldova. *Plants* **10** (3), 1–13. <https://doi.org/10.3390/plants10030471>

## References

- Alemasova, A.S., Penkova, Y.I., Pivovarova, A.S., Ostapenko, P.B., 2018. Vliyanie voennykh deistvii na sodержanie nekotorykh metallov v pochve Saur-Mogily, Donbass [The impact of military operations on the content of some metals in the soil of Saur-Mogily, Donbass]. *Theoretical and Applied Ecology* **3**, 33–39. (In Russian). <http://www.doi.org/10.25750/1995-4301-2018-3-033-039>
- Alemasova, A.S., Safonov, A.I., Sergeeva, A.S., 2019. Nakoplenie tyazhelykh metallov mokhoobraznymi v razlichnykh ekotopakh Donbassa [Accumulation of heavy metals by mosses in different ecotopes of Donbass]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Transformatsiya ekosistem pod vozdeistviem prirodnkh i antropogennykh faktorov"* [Proceedings of the International Scientific

Conference “Transformation of ecosystems under the influence of natural and anthropogenic factors”]. Kirov, Russia, 60–65. (In Russian).

Bayouli, I.T., Bayouli, H.T., Dell’Oca, A., Meers, E., Sun, J., 2021. Ecological indicators and bioindicator plant species for biomonitoring industrial pollution: Eco-based environmental assessment. *Ecological Indicators* **125**, 107508. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107508>

Bell, A.D., 1991. Plant form: An illustrated guide to flowering plant morphology. Oxford University Press, New York, USA, 341 p.

Bian, Z., Yu, H., Hou, J., Mu, S., 2020. Influencing factors and evaluation of land degradation of 12 coal mine areas in Western China. *Journal of China Coal Society* **45**, 338–350.

Frontasyeva, M., Harmens, H., Uzhinskiy, A., Chaligava, O. et al., 2020. 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. Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia, 136 p.

Glazovskaya, M.A., 2007. Geohimiya prirodnykh i tehnogennykh landshaftov SSSR [Geochemistry of natural and anthropogenic landscapes of the USSR]. Moscow State University, Moscow, Russia, 350 p. (In Russian).

Gamov, M.I., Levchenko, S.V., Rylov, V.G., Rybin, I.V., Trufanov, A.V., 2016. Zakonomernosti formirovaniia i perspektivy kompleksnogo ispol'zovaniia metallonosnykh uglei Vostochnogo Donbassa [Patterns of formation and prospects for the integrated use of metal-bearing coals of the Eastern Donbass]. *Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]* **57** (8), 1477–1487. (In Russian).

Gosudarstvennyi komitet po ekologicheskoi politike i prirodnym resursam pri Glave Donetskoi Narodnoi Respubliki [State Committee on Environmental Policy and Natural Resources under the Head of the Donetsk People’s Republic, 2022. Web page. URL: <https://gkecopoldnr.ru/> accessed: 22/07/2022). (In Russian).

Hancock, G.R., Duque, J.F.M., Willgoose, G.R., 2020. Mining rehabilitation – Using geomorphology to engineer ecologically sustainable landscapes for highly disturbed lands. *Ecological Engineering* **155**, 105836. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105836>

Hristozova, G., Marinova, S., Motyka, O., Svozilik, V., Zinicovskaia, I., 2020. Multivariate assessment of atmospheric deposition studies in Bulgaria based on moss biomonitors: trends between the 2005/2006 and 2015/2016 surveys. *Environmental Science and Pollution Research* **27** (31), 39330–39342. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10005-w>

Kabata-Pendias, A., Pendias, H., 2001. Trace elements in soil and plants. CRC Press LLC, USA, Boca Raton, USA, 413 p.

Khiem, L.H., Sera, K., Hosokawa, T., Nam, L.D., Quyet, N.H. et al., 2020. Active moss biomonitoring technique for atmospheric elemental contamination in Hanoi using proton induced X-ray emission. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **325** (2), 515–525. <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07253-y>

Kozlova, E.A., Orlova, E.E., Zubik, I.N., 2022. Growth and development analysis of silver Brium (*Bryum argentium* Hedw.) depending on illumination level influence. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* **6**, 042012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/981/4/042012>

Lemly, A.D. 2008. Aquatic hazard of selenium pollution from coal mining. In: Fosdyke, Gerald B. ed. Coal Mining: Research, Technology and Safety. Chapter 6. Nova Science Publishers, Inc. 167–183.

- Massante, J.C., 2015. Mining disaster: restore habitats now. *Nature* **528**, 39. <https://doi.org/10.1038/528039c>
- Meena, M.K., Singh, A.K., Prasad, L.K., Islam, A., Meena, M.D. et al., 2020. Impact of arsenic-polluted groundwater on soil and produce quality: a food chain study. *Environmental Monitoring and Assessment* **192** (12), 785. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08770-9>
- Neamtu, R., Sluser, B., Plavan, O., Teodosiu, C., 2021. Environmental monitoring and impact assessment of Prut River cross-border pollution. *Environmental Monitoring and Assessment* **193** (340), 09110. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09110-1>
- Opekunova, M.G., 2016. Bioindikaciya zagryaznenii: uchebnoe posobie [Bioindication of pollution: Textbook] St Petersburg State University, St. Petersburg, Russia, 300 p. (In Russian).
- Pashentsev, D.A., Abramova, A.I., Eriashvili, N.D., Grimalskaya, S.A., Gafurova, A.Ya. et al., 2019. Digital software of industrial enterprise environmental monitoring. *Ekoloji* **28** (107), 243–251.
- Pavlov, S.S., Dmitriev, A.Y., Frontasyeva, M.V., 2016. Automation system for neutron activation analysis at the reactor IBR-2, Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **309**, 27–38. <https://doi.org/10.1007/s10967-016-4864-8>
- Peng, J., Pan, Y., Liu, Y., Zhao, H., Wang, Y., 2018. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape. *Habitat International* **71**, 110–124. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2017.11.010>
- Quyut, N.H., Khiem, L.H., My, T.T.T., My, N.T.B., Frontasieva, M. et al., 2021. Biomonitoring of chemical element air pollution in hanoi using barbula indica moss. *Environmental Engineering and Management Journal* **20** (5), 791–800.
- Safonov, A.I., 2013. Phyto-qualimetry of toxic pressure and the degree of ecotopes transformation in Donetsk region. *Problems of ecology and nature protection of technogenic region* **13** (1), 52–59.
- Safonov, A.I., 2016. Phytoindicational monitoring in Donetsk. *World Ecology Journal* **6** (4), 59–71.
- Safonov, A.I., 2019. Teratogenez rastenii-indikatorov promyshlennogo Donbassa [Teratogenesis of plants-indicators of industrial Donbass]. *Raznoobrazie rastitel'nogo mira [Diversity of the Plant World]* **1** (1), 4–16. (In Russian). <http://www.doi.org/10.22281/2686-9713-2019-1-4-16>
- Safonov, A., 2022. Ecological scales of indicator plants in an industrial region. *BIO Web of Conferences* **43**, 03002. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20224303002>
- Safonov, A.I., Germonova, E.A., 2019. Ekologicheskie seti fitomonitoringovogo naznacheniya v Donbasse [Ecological phytomonitoring networks in Donbass]. *Problemy ekologii i okhrany prirody tekhnogennogo regiona [Problems of Ecology and Nature Protection of Technogenic Region]* **3–4**, 37–42 (In Russian).
- Safonov, A., Glukhov, A., 2021a. Ecological phytomonitoring in Donbass using geoinformational analysis *BIO Web Conf.* **31**, 00020 <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213100020>
- Safonov, A.I., Glukhov, A.Z., 2021b. Fitomonitoring v tekhnogenno transformirovannoi srede: metodologiya i praktika [Phytomonitoring in a technologically transformed environment: Methodology and practice]. *Ecosistemy* **28**, 16–28. (In Russian).
- Safonov, A.I., Morozova, E.I., 2021. Vidovoe raznoobrazie briobiontov monitoringovoi seti Central'nogo Donbassa [Species diversity of bryobionts of the Central Donbass monitoring network]. *Problemy*

*ekologii i okhrany prirody tekhnogennogo regiona [Problems of Ecology and Nature Protection of Technogenic Region] 1–2*, 39–43. (In Russian).

Safonov, A.I., Alemasova, A.S., Zinicovscaia, I., Vergel, K.N., Yushin, N.S., Kravtsova, A.V., Chaligava, O., 2023. Morphogenetic abnormalities of bryobionts in geochemically contrasting conditions in Donbass. *Geochemistry International* **68** (10). <https://doi.org/10.31857/S0016752523100114>

Sergeeva, A., Zinicovscaia, I., Grozdov, D., Yushin, N., 2021a. Assessment of selected rare earth elements, HF, Th, and U in the Donetsk region using moss bags technique. *Atmospheric Pollution Research* **12** (9), 101165. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101165>

Sergeeva, A., Zinicovscaia, I., Vergel, K., Yushin, N., 2021b. The effect of heavy industry on air pollution studied by active moss biomonitoring in Donetsk region. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* **80** (3), 546–557. <https://doi.org/10.1007/s00244-021-00834-2>

Shaikhutdinova, A.N., 2015. Otsenka stepeni zagryazneniya agrogennykh pochv Kuzbassa podvizhnymi formami tyazhelykh metallov [Assessment of the degree of pollution of agrogenic soils of Kuzbass by mobile forms of heavy metals]. *Sbornik materialov V Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Otrazhenie bio-, geo-, antroposfernykh vzaimodeistvii v pochvakh i pochvennom pokrove" [Proceedings of the V International Scientific Conference "Redounds of bio-, geo-, anthroposphere interactions in soils and soil cover"]*. Tomsk, Russia, 286–289. (In Russian).

Świsłowski, P., Vergel, K., Zinicovscaia, I., 2022. Mosses as a biomonitor to identify elements released into the air as a result of car workshop activities. *Ecological Indicators* **138**, 108849. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108849>

Trubina, M.R., Mukhacheva, S.V., Bezel, V.S., Vorobeichik, E.L., 2014. Soderzhanie tyazhelykh metallov v plodakh dikorastushchikh rastenii v zone aerotekhnogennogo vozdeistviya Sredneural'skogo medeplavil'nogo zavoda (Sverdlovskaya oblast') [Content of heavy metals in fruits of wild plants in the area of aerotechnogenic impact of Sredneuralsk copper smelter (Sverdlovsk Oblast)]. *Rastitelnye resursy [Plant Resources]* **50** (1), 67–83. (In Russian).

Ufimtseva, M.D., 2015. Zakonomernosti nakopleniya khimicheskikh elementov vysshimi rasteniyami i ikh reaktsii v anomal'nykh biogeohimicheskikh provintsiyakh [Regularities of chemical element accumulation by higher plants and their responses in anomalous biogeochemical provinces]. *Geokhimiya [Geochemistry]* **5**, 450–465. (In Russian).

Vergel, K., Zinicovscaia, I., Yushin, N., Gundorina, S., 2020. Assessment of atmospheric deposition in Central Russia using moss biomonitors, neutron activation analysis and GIS technologies. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **325** (3), 807–816. <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07234-1>

Vodyanitsky, Y.N., 2013. Zagryaznenie pochv tyazhelymi metallami i metalloidami i ikh ekologicheskaya opasnost' (analiticheskii obzor) [Soil contamination by heavy metals and metalloids and their environmental hazards (analytical review)]. *Pochvovedenie [Soil Science]* **7**, 872–881 (In Russian).

Wang, S., Huang, J., Yu, H., Ji, C., 2020. Recognition of landscape key areas in a coal mine area of a semi-arid steppe in China: a case study of Yimin open-pit coal mine. *Sustainability* **12**, 2239.

Wu, Z., Lei, S., Yan, Q., Bian, Z., Lu, O., 2021. Landscape ecological network construction controlling surface coal mining effect on landscape ecology: A case study of a mining city in semi-arid steppe. *Ecological Indicators* **133**, 108403.

Xu, W., Wang, J., Zhang, M., Li, S., 2021. Construction of landscape ecological network based on landscape ecological risk assessment in a large-scale opencast coal mine area. *Journal of Cleaner Production* **286**, 125523.



- Yeprintsev, S.A., Shekoyan, S.V., Lepeshkina, L.A., Voronin, A.A., Klevtsova, M.A., 2019. Technologies for creating geographic information resources for monitoring the socio-ecological conditions of cities. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **582** (1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/582/1/012012>
- Yu, H., Huang, J., Ji, C., Li, Z., 2021. Construction of a landscape ecological network for a large-scale energy and chemical industrial base: a case study of Ningdong, China. *Land* **10** (4), 344.
- Yuan, J., Bian, Z., Yan, Q., Gu, Z., Yu, H., 2020. An approach to the temporal and spatial characteristics of vegetation in the growing season in Western China. *Remote Sensing* **12** (6), 945.
- Zaghloul, A., Saber, M., Gadaw, S., Awad, F., 2020. Biological indicators for pollution detection in terrestrial and aquatic ecosystems. *Bulletin of the National Research Centre* **44** (127), 385.
- Zhang, M., Wang, J., Li, S., Feng, D., Cao, E., 2020. Dynamic changes in landscape pattern in a large-scale opencast coal mine area from 1986 to 2015: a complex network approach. *Catena* **194**, 104738.
- Zhang, P., Ye, Q., Yu, Y., 2021. Research on farmers' satisfaction with ecological restoration performance in coal mining areas based on fuzzy comprehensive evaluation. *Global Ecology and Conservation* **32**, 1934.
- Zhao, A., Yu, Q., Feng, L., Zhang, A., Pei, T., 2020. Evaluating the cumulative and time-lag effects of drought on grassland vegetation: a case study in the Chinese Loess Plateau. *Journal of Environmental Management* **261**, 110214.
- Zinicovscaia, I., Hramco, C., Chaligava, O., Yushin, N., Grozdov, D., Vergel, K., Duca, G., 2021. Accumulation of potentially toxic elements in mosses collected in the Republic of Moldova. *Plants* **10** (3), 1–13. <https://doi.org/10.3390/plants10030471>