

ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В ФИТОСУБСТРАТАХ — ИНДИКАТОРЫ АНТРОПОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА В ПРОМЫШЛЕННОМ РЕГИОНЕ

А.С. Алемасова✉, А.И. Сафонов

ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», 283000, г. Донецк, ул. Университетская, д. 24

kf.analit.chem.zav@donnu.ru

Представлено доказательство экотопической разницы в накоплении тяжелых металлов (Zn, Cu, Fe, Mn, Ni, Cd, Pb) ботаническими объектами индикационной значимости, что определено в результате проведения исследований в местах локализации учетных площадок мониторинговой сети центральной части Донбасса. Приведены материалы изучения растений в зонах влияния техногенных и отдельных антропогенных воздействий, в частности, промышленных предприятий металлургического комплекса, отвалов угольных шахт, мест транспортной нагрузки на экосистемы, селитебных экотопов. Дан сравнительный анализ территорий, подвергшихся масштабной и минимальной трансформации в зонах природно-заповедного фонда Донецкого региона. Установлена таксономическая специфичность в накоплении тяжелых металлов для используемых мохообразных 11 видов природной флоры региона, отмечены факты гипер- и гипоаккумуляции в талломах бриобионтов. По накоплению тяжелых металлов выявлены факты фитогеохимической миграционной активности элементов в приземном слое атмосферы промышленно напряженного региона и содержания в тополином пухе пыльцы растений других видов. Определены причины накопления тяжелых металлов в мохообразных — с осадками, а в свободно парящих в воздухе семенах тополя черного — в результате активного захвата частиц пыли, что обуславливает разницу в накоплении разными фитосубстратами. Полученные данные рассмотрены в контексте возможного усиления сезонного проявления аллергических реакций у людей. Для оценки загрязнения воздуха в Донбассе рекомендовано использовать виды *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid и *Bryum argenteum* Hedw. по накоплению поллютантов в гаметофитах и *Populus nigra* L. по специфике содержания в халазных выростах семян дендроиндикатора.

Ключевые слова: тяжелые металлы, экологический фитомониторинг, техногенное загрязнение

Ссылка для цитирования: Алемасова А.С., Сафонов А.И. Тяжелые металлы в фитосубстратах — индикаторы антропогенного загрязнения воздуха в промышленном регионе // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 6. С. 5–13. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-6-5-13

Экологический мониторинг в промышленно развитых регионах и на территориях с существенными техногенными трансформациями составляет важную часть деятельности научно-исследовательских лабораторий [1–5]. К приоритетным загрязнителям природных сред относят тяжелые металлы как особо опасные для биологических систем токсиканты [6–9].

Современный Донбасс отличается повышенной антропогенной нагрузкой на природные экосистемы, что обуславливает необходимость проведения контрольных мероприятий, позволяющих своевременно выявлять локалитеты недопустимого уровня загрязнений. В Донецком регионе для водных объектов и почвенных сред разработана сеть наблюдательных постов и учетных площадок, по которым отслеживается динамика негативных процессов в экосистемах [10]. Для воздушной среды необходимо использовать сопряженные геохимические индикаторы, в частности [7, 11–15], проявляющие корреляционную функцию накопления тяжелых металлов в приземном слое атмосферы или с выпадающими осадками [6, 9, 11, 16–18].

В проведенных ранее исследованиях [19–21] была актуализирована необходимость экологотоксикологической экспертизы Донецкого региона, разработана мониторинговая сеть фитоекологических стационаров [22], проведена систематическая инвентаризация растительных компонентов, проявляющих индикационные свойства [23, 24], и внедрены методы геоинформационного анализа [25–26].

Цель работы

Цель работы — определение экотопов с высоким уровнем антропогенного загрязнения воздушной среды в центральной части Донбасса на основании данных о содержании тяжелых металлов (Zn, Cu, Fe, Mn, Ni, Cd, Pb) в фитосубстратах индикационной значимости геофиксированных талломов мохообразных и свободно перемещающихся в пределах одного мониторингового локалитета семян тополя черного (*Populus nigra* L.).

Материалы и методы

Образцы растений для элементного анализа были собраны в двух принципиально важных и взаимодополняющих биосистемах:

1) по гаметофитам мохообразных [27], которые проявляют накопительную способность загрязнителей именно из воздушной среды, в том числе с выпадающими осадками [28];

2) по сборам семенного материала тополя черного в приземном слое атмосферы (на высоте 0,5...2,0 м) с учетных площадок 26–35 (г. Донецк), 50–59 (г. Макеевка), 43 и 63–66 (г. Горловка), 82–88 (г. Енакиево), 75, 90, 92 (г. Харцызск), а также в экотопах минимального промышленного импакта (условно контрольные мониторинговые точки 44, 67, 69, 93, 99, 101, 107, 112) в соответствии с заложеной 113-компонентной мониторинговой сетью [22].

По дендрологическому эксперименту, выбор культуры тополя обусловлен анатомо-морфологическим строением семени с выростами в его халазной части, формирующими механо-подвижную конструкцию для свободного перемещения с воздушными потоками [29]. Вследствие широкого использования модельного объекта в городском озеленении, ландшафтном дизайне, благоустройстве техногенных объектов и транспортных коммуникаций [30–32] проведены регистрация мест скопления на 43 учетных площадках и оценка адаптационного потенциала древостоев [33] и ландшафтно-экологических систем с характерными общими признаками в условиях развитой горнодобывающей и металлургической промышленности [34–38].

При выполнении бриологической части эксперимента были проанализированы образцы таких видов, как *Bryum caespiticium* Hedw., *Brachythecium campestre* (Müll.Hal.) Bruch et al., *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid, *Bryum argenteum* Hedw., *Bryum capillare* Hedw., *Platygyrium repens* (Brid.) Schimp., *Aulacomnium palustre* (Hedw.) Schwägr., *Leskea polycarpa* Hedw., *Plagiomnium cuspidatum* (Hedw.) T. Kop., *Tortula muralis* Hedw. и *Orthotrichum speciosum* Nees.

Массовую концентрацию тяжелых металлов в отобранных образцах фитосубстратов определяли в аттестованной лаборатории кафедры аналитической химии Донецкого национального университета (свидетельство об аттестации № ИЛ-124/2019 выдано 16.12.2019 г. ГП «Донецкстандартметрология»). Пробы фитосубстратов отбирались в третью декаду мая в соответствии с рекомендациями работы [39]. При подготовке к анализу пробы ссыпали на полиэтиленовую пленку, измельчали, тщательно перемешивали, квартовали. Подготовленную пробу высушивали в сушильном шкафу при температуре 60...65 °С до воздушно-сухого состояния, истирали в фарфоровой ступке и проводили минерализацию методом сухого озоления при температуре 525 °С в течение 3 ч [40, 41]. Тяжелые металлы из золы экстрагировали азотной

кислотой (1:1) и определяли содержание целевых компонентов в кислотных вытяжках пламенным и электротермическим атомно-абсорбционным методом [42]. Аналитические измерения при атомизации в пламени ацетилен — воздух проводили на атомно-абсорбционном спектрофотометре «Сатурн-3» (ОКБА, г. Северодонецк).

Электротермическое атомно-абсорбционное определение аналитов проводили на атомно-абсорбционных спектрофотометрах «Сатурн-3» (однолучевая схема с дейтериевым корректором неселективного поглощения), «Solaar-M» (земановский и дейтериевый корректоры фона). Для спектрофотометра «Сатурн-3» интегральную интенсивность сигнала регистрировали с помощью модуля связи, сопряженного с персональным компьютером. Использовали графитовые трубки с пиролитическим покрытием и графитовые платформы с пиропокрывом (МПГ-6) (производство г. Северодонецк). Аликвоты анализируемых растворов дозировали с использованием ручного дозатора P200 на платформу печи с пиролитическим покрытием. Точность дозирования составляла ±0,2 %. Типичная программа нагрева графитового атомизатора на спектрофотометрах «Сатурн-3» и «Solaar-M» включала стадию сушки при температуре 105...140 °С, стадию пиролиза, температура на которой изменялась в широком диапазоне — от 400 до 2000 °С при плавном подъеме, и стадию атомизации при температуре 2000...2600 °С. Градуирование приборов проводили по стандартным образцам растворов металлов. Правильность результатов контролировали стандартным методом «введено — найдено».

Результаты и обсуждение

По статистической дифференциации, адекватным аккумулятором из числа видов мохообразных определен *C. purpureus*, для которого установлен ранжированный ряд промышленного воздействия среди предприятий: Енакиевский (I), Донецкий (II) и Макеевский (III) металлургические заводы в градиенте уменьшения токсического эффекта.

Вследствие розы ветров с доминирующими восточными направлениями эффект промышленного импакта сохранился в том же ранжированном ряду, хотя уровень антропогенного воздействия в Донецко-Макеевской промышленной агломерации а priori предполагал сохранение тенденций к накоплению тяжелых металлов. Так, закономерность подтверждает эффективность созданных санитарно-защитных и рекреационных территорий с барьерными и экранирующими свойствами в условиях городских агломераций. Следовательно, зеленый каркас городов Донецка и Макеевки развит в большей степени. Вид *C. purpureus* также рекомендован в качестве

**Содержание тяжелых металлов в мохообразных на примере учетной площадки
Енакиевского металлургического завода**

The content of heavy metals in bryophytes on the example of the registration site of the Enakievo Metallurgical Plant

Образец фитосубстрата	Концентрация микроэлементов, мг/кг						
	Zn	Cu	Fe	Mn	Ni	Cd	Pb
<i>Ceratodon purpureus</i>	739	165	15154	485	19	1,3	108
	Коэффициенты накопления по отношению к <i>Ceratodon purpureus</i>						
<i>Aulacomnium palustre</i>	1,6	0,9	0,9	0,9	2,0	0,9	1,0
<i>Brachythecium campestre</i>	0,7	0,5	0,7	0,8	0,5	0,2	0,1
<i>Bryum argenteum</i>	1,1	0,6	0,9	0,8	0,8	0,2	0,9
<i>Bryum caespiticium</i>	1,1	0,6	0,9	0,8	0,9	0,2	1,0
<i>Bryum capillare</i>	0,9	0,6	0,9	0,8	0,9	0,2	1,0
<i>Leskea polycarpa</i>	0,2	0,5	0,2	0,4	0,2	0,2	0,3
<i>Orthotrichum speciosum</i>	0,9	0,8	2,0	0,9	0,8	0,7	1,0
<i>Plagiomnium cuspidatum</i>	0,9	2,1	1,1	0,8	1,0	0,9	0,9
<i>Platygyrium repens</i>	1,0	0,8	0,9	1,0	1,0	0,9	2,0
<i>Tortula muralis</i>	0,7	0,8	2,1	0,9	0,8	1,0	0,7

реперного для проведения сравнительного межвидового анализа накопления мохообразными тяжелых металлов (табл. 1).

Установлено, что виды рода *Bryum* имеют близкородственные коэффициенты накопления и для полевых мониторинговых сборов не представляют функциональной разницы, поэтому могут использоваться как альтернативные в случае отсутствия одного из видов в конкретной точке забора образца.

Выделить отдельные виды гипер- или гипоаккумуляторов по всем анализируемым металлам не представляется возможным. Такие выводы можно сделать только по отношению к отдельным металлам. Например, *A. palustre* в большем соотношении с *C. purpureus* накапливает цинк и никель, *P. cuspidatum* — медь, *O. speciosum* и *T. muralis* — железо, *P. repens* — свинец. Гипераккумуляции для марганца и кадмия из проанализированных субстратов бриологической природы не установлено. Вид *L. polycarpa* определен не только как индифферентный по морфологическому статусу в период спорофитизации на учетной площадке, но и к высоким концентрациям загрязнителей. Для видов *B. caespiticium* и *B. argenteum* в тех же условиях импакта Енакиевского металлургического завода (ЕМЗ) при гипернакоплении цинка отмечен эффект гипоаккумуляции меди, что рассматривается как пример конкурентного ингибирования (межметаллического взаимодействия) в парной группе физиологической конкуренции «Zn–Cu». Указанные тенденции сохраняются и для других учетных площадок в зонах непосредственного промышленного импакта металлургических предприятий.

Вид *B. campestre* по накопительной способности не выявил устойчивых закономерностей и не может быть рекомендован в экологическом мониторинге по накоплению тяжелых металлов,

однако представляет интерес для физиолого-адаптационных исследований, поскольку зафиксированы сравнительно низкие концентрации соединений преимущественно никеля и свинца даже в условиях их достоверно высоких валовых концентраций в окружающей среде. Полученные сведения о специфике аккумуляции элементов в открытых ландшафтных системах являются основанием для целенаправленного лабораторного эксперимента по рассмотрению механизмов взаимодействия растений с токсическими средами и возможной детоксикации при первичных освоениях техногенного неосубстрата, например, на террикониках, отвалах угольных шахт и пр. Биоиндикационные свойства фитокомпонентов востребованы в качестве сведений о состоянии среды в промышленных регионах [35, 38, 43–45].

Данные о накоплении тяжелых металлов в тополином пухе (табл. 2) свидетельствуют о специфической территориальной приуроченности к конкретным категориям экотопов. Диапазон значений по цинку, меди, марганцу и никелю (см. табл. 2) не перекрывается при сравнении результатов по определению принадлежности к ландшафтным системам разного хозяйственного назначения.

По двум системам сбора данных — по мохообразным и дендроиндикаторам — были установлены закономерности накопления тяжелых металлов, а также корреляционная связь между накоплением конкретных тяжелых металлов в отдельных видах бриобионтов и тополином пухе (табл. 3).

Индикационные свойства бриобионтов, в частности *B. argenteum*, рассмотрены авторами работы [28]. Пример с мохообразным *L. polycarpa* показывает нецелесообразность его использования по запрашиваемой целевой программе — в фитоиндикации по накоплению загрязнителей.

Т а б л и ц а 2

Содержание тяжелых металлов в фитосубстратах *Populus nigra* для различных категорий экотопов мониторинговой сети Донбасса
The content of heavy metals in phytosubstrates of *Populus nigra* for various categories of ecotopes of the monitoring network in Donbass

Экотоп	Концентрация микроэлементов, мг/кг						
	Zn	Cu	Fe	Mn	Ni	Cd	Pb
Металлургические предприятия	510...805	136...188	8510...12071	434...490	24...31	1,6...2,1	111...119
Карьерно-отвалыные комплексы	450...461	120...134	7561...11279	410...429	22...23	0,8...2,1	34...107
Пути сообщений, автотранспортных коммуникаций	411...445	115...119	6846...10884	407...409	20...21	0,2...1,1	15...88
Селитебные территории	120...401	74...99	3561...9753	342...401	8...18	0,2...0,9	15...40
Малонарушенные, объекты природно-заповедного фонда	45...51	6...8	4020...4056	302...312	4...6	0,1...0,3	7...10

Т а б л и ц а 3

Коэффициенты корреляции по накоплению тяжелых металлов в бриобионтах и тополином пухе
Correlation coefficients of heavy metals accumulation in bryobionts and poplar fluff

Корреляционные пары в фитосубстратах	Zn	Cu	Fe	Mn	Ni	Cd	Pb
<i>Ceratodon purpureus</i> & <i>Populus nigra</i>	+0,94*	+0,94	+0,88*	+0,94	+0,89	+0,91*	+0,95*
<i>Bryum argenteum</i> & <i>Populus nigra</i>	+0,91*	+0,66	+0,43	+0,88*	+0,85	+0,55*	+0,92
<i>Leskea polycarpa</i> & <i>Populus nigra</i>	-0,22	-0,23	+0,37	+0,25	-0,27	+0,16	-0,18

*Достоверно при $p \leq 0,05$

Это доказывает, что при проведении эколого-токсикологического эксперимента выбор индикатора из числа мохообразных также должен учитывать видовую принадлежность используемого в диагностическом анализе субстрата.

В отношении специфики содержания железа и марганца доказана устойчивая тенденция большего накопления именно в образцах индикаторного мохообразного. Это, по-видимому, обусловлено спецификой геохимической активности указанных элементов в миграционных потоках аэро-фитогоризонтов. При этом захват содержания техногенной пыли на халазных выростах семян тополя черного происходит в приземном слое атмосферы более активным путем для мелкодисперсных фракций промышленных эмиссий, а в случае с мохообразными фиксируется эффект их накопления только после выпадения фрагментарных осадков. Судя по результатам проведенного эксперимента, соединения железа и марганца при этом имеют большую массовую долю по сравнению с их содержанием в приземных слоях воздушных масс городов и отдельно рассматриваемых промышленных территорий. Следовательно, использование фитосубстратов индикационного назначения позволяет дифференцировать содержание элементов в приземном слое атмосферы промышленно развитых регионов, что отмечено ранее [20, 27] и подтверждено исследованиями других авторских коллективов [3, 5, 7, 12, 34, 45].

Результаты проведенного эксперимента показали высокий уровень загрязнения воздушной среды тяжелыми металлами в следующих локалитетах: 1) 48°15'21"N; 38°27'22"E; 2) 47°49'43"N; 38°02'22"E; 3) 47°53'30"N; 38°38'36"E; 4) 48°11'41"N; 38°05'12"E; 5) 47°56'18"N; 37°48'06"E; 6) 48°04'09"N; 37°54'15"E; 7) 48°08'13"N; 38°21'28"E; 8) 47°58'58"N; 37°55'03"E; 9) 48°01'35"N; 38°28'05"E; 10) 48°18'18"N; 38°21'57"E; 11) 48°13'02"N; 38°13'49"E. Они подтверждают закономерность суммарного процесса накопления токсикантов вследствие территориального совмещения (наложения друг на друга) зон импакта объектов тяжелой промышленности и эмиссий от передвижных источников загрязнения. Установленные факты представляют собой дополнительные сведения к базе данных о состоянии природных сред Донбасса, сформированной специализированным государственным комитетом в ДНР [10].

Эксперимент по выявлению особенностей накопления (оседания) соединений тяжелых металлов в тополином пухе позволил установить факт наличия на халазных выростах семян большого количества пыльцы следующих цветущих в это время растений: *Berteroa incana* (L.) DC., *Diplotaxis muralis* (L.) DC., *Sinapis alba* L., *Senecio vulgaris* L., *Dactylis glomerata* L., а также виды родов *Bromus* L., *Bromopsis* (Dumort.) Fourg., *Elytrigia* Desv., *Festuca* L. и *Poa* L. Это в целом

усугубляет картину аллергических заболеваний в регионе, поскольку наряду с механическим раздражением слизистых оболочек человеческого организма аллергенами добавляются биологически активные компоненты.

Выводы

По уровню накопления тяжелых металлов в фитосубстратах *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid, *Bryum argenteum* Hedw. и *Populus nigra* L. установлена высокая степень загрязнения сети промышленных предприятий и городских агломераций Донбасса, мест размещения карьерно-отвальных комплексов, селитебных территорий и экотопов путей сообщений, что на современном этапе является важной информацией для государственных экологических служб.

Элементный анализ проб индикаторных растений признан приемлемым способом проведения мониторинговых исследований фонового и импактного характера в регионе высоких антропогенных трансформаций. Он позволяет опосредованно характеризовать степень загрязнения воздушной среды, пылевое содержание в аэрофитогоризонтах, в том числе в связи с локальным воздействием объектов промышленности.

Список литературы

- [1] Yeprintsev S.A., Shekoyan S.V., Lepeshkina L.A., Voronin A.A., Klevtsova M.A. Technologies for creating geographic information resources for monitoring the socio-ecological conditions of cities // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 582(1), p. 012012.
- [2] An Y., Liu S., Sun Y., Shi F., Beazley R. Construction and optimization of an ecological network based on morphological spatial pattern analysis and circuit theory // Landscape Ecology 2021, v. 36, pp. 2059–2076.
- [3] Bian Z., Yu H., Hou J., Mu S. Influencing factors and evaluation of land degradation of 12 coal mine areas in Western China // J. of China Coal Society, 2020, v. 45, pp. 338–350.
- [4] Wang S., Huang J., Yu H., Ji C. 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, 2020, v. 12, p. 2239.
- [5] Yu H., Huang J., Ji C., Li Z. Construction of a landscape ecological network for a large-scale energy and chemical industrial base: a case study of Ningdong, China // Land, 2021, v. 10, no. 4, p. 344.
- [6] Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. М.: Изд-во МГУ, 2007. 350 с.
- [7] Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soil and plants. CRC Press LLC, 2001, 413 p.
- [8] Pashentsev D.A., Abramova A.I., Eriashvili N.D., Grimalskaya S.A., Gafurova A.Ya., Kharisova G.M., Karpenko G.V., Avilova V.V. Digital software of industrial enterprise environmental monitoring // Ekoloji, 2019, vol. 28 (107), pp. 243–251.
- [9] Zaghoul A., Saber M., Gadow S., Awad F. Biological indicators for pollution detection in terrestrial and aquatic ecosystems // Bulletin of the National Research Centre, 2020, v. 44, no. 127, p. 385.
- [10] Государственный комитет по экологической политике и природным ресурсам при Главе Донецкой Народной Республики. URL: <https://gkescoroldnr.ru/> (дата обращения 01.03.2022).
- [11] Опекунова М.Г. Биоиндикация загрязнений. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2016. 300 с.
- [12] Уфимцева М.Д. Закономерности накопления химических элементов высшими растениями и их реакции в аномальных биогеохимических провинциях // Геохимия, 2015. № 5. С. 450–465.
- [13] Bayouli I.T., Bayouli H.T., Dell’Oca A., Meers E., Sun J. Ecological indicators and bioindicator plant species for biomonitoring industrial pollution: Eco-based environmental assessment // Ecological Indicators, 2021, v. 125, p. 107508.
- [14] Луговская А.Ю., Храмова Е.П., Чанкина О.В. Влияние транспортно-промышленного загрязнения на морфометрические параметры и элементный состав *Potentilla fruticosa* // Сибирский экологический журнал, 2018. Т. 25, № 1. С. 111–121.
- [15] Hancock G.R., Martin Duque J.F., Willgoose G.R. Mining rehabilitation – Using geomorphology to engineer ecologically sustainable landscapes for highly disturbed lands // Ecological Engineering, 2020, v. 155, p. 105836.
- [16] Трубина М.Р., Мухачева С.В., Безель В.С., Воробейчик Е.Л. Содержание тяжелых металлов в плодах дикорастущих растений в зоне аэротехногенного воздействия Среднеуральского медеплавильного завода (Свердловская область) // Растительные ресурсы, 2014. Т. 50. № 1. С. 67–83.
- [17] Meena M.K. Impact of arsenic-polluted groundwater on soil and produce quality: a food chain study // Environmental Monitoring and Assessment, 2020, v. 192, no. 12, p. 785.
- [18] Zhao A., Yu Q., Feng L., Zhang A., Pei T. Evaluating the cumulative and time-lag effects of drought on grassland vegetation: a case study in the Chinese Loess Plateau // J. of Environmental Management, 2020, v. 261, p. 110214.
- [19] Алемасова А.С., Пенькова Ю.И., Пивоварова А.С., Остапенко П.В. Влияние военных действий на содержание некоторых металлов в почве Саур-Могилы, Донбасс // Теоретическая и прикладная экология, 2018. № 3. С. 33–39.
- [20] Safonov A.I. Phyto-qualimetry of toxic pressure and the degree of ecotopes transformation in Donetsk region // Problems of ecology and nature protection of technogenic region, 2013, no. 1, pp. 52–59.
- [21] Safonov A.I. Phytoindicational monitoring in Donetsk // World Ecology J., 2016, v. 6, no. 4, pp. 59–71.
- [22] Сафонов А.И., Гермонова Е.А. Экологические сети фитомониторингового назначения в Донбассе // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона, 2019. № 3–4. С. 37–42.
- [23] Safonov A. Ecological scales of indicator plants in an industrial region // BIO Web Conf., 2022, v. 43, no. 03002, 8 p.
- [24] Сафонов А.И., Морозова Е.И. Видовое разнообразие бриобионтов мониторинговой сети Центрального Донбасса // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона, 2021. № 1–2. С. 39–43.
- [25] Safonov A., Glukhov A. Ecological phytomonitoring in Donbass using geoinformational analysis // BIO Web Conf., 2021, v. 31, no. 00020, 4 p.
- [26] Сафонов А.И., Глухов А.З. Фитомониторинг в техногенно трансформированной среде: методология и практика // Экосистемы, 2021. № 28. С. 16–28.
- [27] Алемасова А.С., Сафонов А.И., Сергеева А.С. Накопление тяжелых металлов мохообразными в различных экотопах Донбасса // Трансформация экосистем под воздействием природных и антропогенных факторов: матер. Междунар. науч. конф., Киров, 16–18 апреля 2019 г. Киров: Изд-во ВятГУ, 2019. С. 60–65.

- [28] Kozlova E.A., Orlova E.E., Zubik I.N. Growth and development analysis of silver Bryum (*Bryum argentium* Hedw.) depending on illumination level influence // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, no. 6, p. 042012.
- [29] Bell A.D. Plant form: An illustrated guide to flowering plant morphology. Oxford; New York; Tokyo: Oxford University Press, 1991, 341 p.
- [30] Кругляк В.В., Гурьева Е.И. Принципы формирования ландшафтного тематического комплекса в Центральном Черноземье // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 2. С. 59–68.
DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-59-68
- [31] Боровлев А.О., Скрыпников А.В., Брюховецкий А.Н., Тимофеев В.А., Прокопец В.С. Обзор принципов пространственного проектирования лесовозных автомобильных дорог // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 5. С. 119–124.
DOI: 10.18698/2542-1468-2021-5-119-124
- [32] Ковылин Н.В., Ковылина О.П., Сухенко Н.В. Особенности взаимоотношения древостоя и напочвенного покрова в искусственных фитоценозах *Populus balsamifera* L. и *Populus nigra* L. // ИзВУЗ Лесной журнал, 2016. № 3(351). С. 31–41.
- [33] Уразильдин Р.В., Кулагин А.Ю. Повреждения, адаптации, стратегии древесных видов в условиях техногенеза: структурно-функциональные уровни реализации адаптивного потенциала // Успехи современной биологии, 2022. Т. 142. № 1. С. 52–69.
- [34] Peng J., Pan Y., Liu Y., Zhao H., Wang Y. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape // Habitat International, 2018, v. 71, pp. 110–124.
- [35] Wu Z., Lei S., Yan Q., Bian Z., Lu O. 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, 2021, v. 133, p. 108403.
- [36] Yuan J., Bian Z., Yan Q., Gu Z., Yu H. An approach to the temporal and spatial characteristics of vegetation in the growing season in Western China // Remote Sensing, 2020, v. 12 (6), p. 945.
- [37] Massante J.C. Mining disaster: restore habitats now // Nature, 2015, v. 528, p. 39.
- [38] Zhang P., Ye Q., Yu Y. Research on farmers' satisfaction with ecological restoration performance in coal mining areas based on fuzzy comprehensive evaluation // Global Ecology and Conservation, 2021, v. 32, p. 1934.
- [39] Кузнецов А.В., Фесюн А.П., Самохвалов С.Г., Махонько Э.П. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: Изд-во ЦИНАО, 1992. 61 с.
- [40] Сырье и продукты пищевые. Подготовка проб. Минерализация для определения токсичных элементов: ГОСТ 26929–94. Межгосударственный стандарт. Дата введения 1996-01-01. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002.
- [41] Хавезов И., Цалев Д. Атомно-абсорбционный анализ. Л.: Химия. 1983. 144 с.
- [42] Пупышев А.А. Атомно-абсорбционный спектральный анализ. М.: Техносфера, 2009. 784 с.
- [43] Xu W., Wang J., Zhang M., Li S. Construction of landscape ecological network based on landscape ecological risk assessment in a large-scale opencast coal mine area // J. of Cleaner Production, 2021, v. 286, p. 125523.
- [44] Zhang M., Wang J., Li S., Feng D., Cao E. Dynamic changes in landscape pattern in a large-scale opencast coal mine area from 1986 to 2015: a complex network approach // Catena, 2020, v. 194, p. 104738.
- [45] Neamtu R., Sluser B., Plavan O., Teodosiu C. Environmental monitoring and impact assessment of Prut River cross-border pollution // Environmental Monitoring and Assessment, 2021, v. 193, no. 340, p. 09110.

Сведения об авторах

Алемасова Антонина Сергеевна [✉] — д-р хим. наук, профессор, Донецкий национальный университет, kf.analit.chem.zav@donnu.ru

Сафонов Андрей Иванович — канд. биол. наук, доцент, Донецкий национальный университет, a.safonov@donnu.ru

Поступила в редакцию 10.06.2022.

Одобрено после рецензирования 20.09.2022.

Принята к публикации 26.09.2022.

HEAVY METALS IN PHYTOSUBSTRATES AS INDICATORS OF ANTHROPOGENIC AIR POLLUTION IN INDUSTRIAL REGION

A.S. Alemasova✉, A.I. Safonov

Donetsk National University, 24, Universitetskaya st., 83000, Donetsk

kf.analit.chem.zav@donnu.ru

The ecotopic difference in the accumulation of heavy metals (Zn, Cu, Fe, Mn, Ni, Cd, Pb) by botanical objects of indicator significance has been proven. To assess air pollution in Donbass, it is recommended to use the species *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid and *Bryum argenteum* Hedw. to check the accumulation of pollutants in gametophytes and *Populus nigra* L. on the specific content of the dendroindicator seeds in chalcid capillary bristles. The studies were carried out in the registration sites of the monitoring network in the central Donbass. The plants in the zones of technogenic and particular anthropogenic impacts (industrial enterprises of the metallurgical complex, dumps of coal mines, places of transport load on ecosystems, residential ecotopes) were studied in comparison with the territories of minimal transformation in the zones of the natural reserve fund in the Donetsk region. For the bryophytes of 11 species of the regional natural flora, taxonomic specificity in the accumulation of heavy metals was established, the facts of hyper- and hypoaccumulation in the thalli of bryobionts were noted. Based on the actual accumulation of heavy metals, the facts of the phytogeochemical migration activity of elements in the surface layer of the atmosphere of an industrially intense region were established. Accumulation of heavy metals in bryophytes occurs during precipitation, and in black poplar seeds freely floating in the air, as a result of active capture of dust particles, which causes a difference in accumulation by different phytosubstrates. The facts of the pollen content in other species of poplar fluff have been established, which is also considered in the context of a possible increase in the seasonal allergenic effect in the population. Accumulation of heavy metals in bryophytes occurs with precipitation, and in black poplar seeds freely floating in the air as a result of active capture of dust particles, which causes a difference in accumulation by different phytosubstrates. Pollen content in other species in poplar fluff have been established, which is also considered in the context of a possible increase in the seasonal allergic reactions.

Keywords: heavy metals, ecological phytomonitoring, technogenic pollution

Suggested citation: Alemasova A.S., Safonov A.I. *Tyazhelye metally v fitosubstratakh — indikatory antropogennogo zagryazneniya vozdukh v promyshlennom regione* [Heavy metals in phytosubstrates as indicators of anthropogenic air pollution in industrial region]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 6, pp. 5–13.

DOI: 10.18698/2542-1468-2022-6-5-13


References

- [1] Yeprintsev S.A., Shekoyan S.V., Lepeshkina L.A., Voronin A.A., Klevtsova M.A. Technologies for creating geographic information resources for monitoring the socio-ecological conditions of cities. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 582(1), p. 012012.
- [2] An Y., Liu S., Sun Y., Shi F., Beazley R. Construction and optimization of an ecological network based on morphological spatial pattern analysis and circuit theory. *Landscape Ecology* 2021, v. 36, pp. 2059–2076.
- [3] Bian Z., Yu H., Hou J., Mu S. Influencing factors and evaluation of land degradation of 12 coal mine areas in Western China. *J. of China Coal Society*, 2020, v. 45, pp. 338–350.
- [4] Wang S., Huang J., Yu H., Ji C. 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*, 2020, v. 12, p. 2239.
- [5] Yu H., Huang J., Ji C., Li Z. Construction of a landscape ecological network for a large-scale energy and chemical industrial base: a case study of Ningdong, China. *Land*, 2021, v. 10, no. 4, p. 344.
- [6] Glazovskaya M.A. *Geokhimiya prirodnykh i tekhnogennykh landshaftov SSSR* [Geochemistry of natural and technogenic landscapes of the USSR]. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 2007, 350 p.
- [7] Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soil and plants. CRC Press LLC, 2001, 413 p.
- [8] Pashentsev D.A., Abramova A.I., Eriashvili N.D., Grimalskaya S.A., Gafurova A.Ya., Kharisova G.M., Karpenko G.V., Avilova V.V. Digital software of industrial enterprise environmental monitoring. *Ekoloji*, 2019, vol. 28 (107), pp. 243–251.
- [9] Zaghoul A., Saber M., Gadow S., Awad F. Biological indicators for pollution detection in terrestrial and aquatic ecosystems. *Bulletin of the National Research Centre*, 2020, v. 44, no. 127, p. 385.
- [10] *Gosudarstvennyy komitet po ekologicheskoy politike i prirodnykh resursam pri Glave Donetskoy Narodnoy Respubliki* [State Committee for Environmental Policy and Natural Resources under the Head of the Donetsk People's Republic]. Available at: <https://gkecopoldnr.ru/> (accessed 01.03.2022).
- [11] Opekunova M. G. *Bioindikatsiya zagryazneniy* [Bioindication of contaminants]. St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg University, 2016. 300 p.
- [12] Ufimtseva M.D. *Zakonomernosti nakopleniya khimicheskikh elementov vysshimi rasteniyami i ikh reaktivnosti v anomal'nykh biogeokhicheskikh provintsiyakh* [The patterns in accumulation of chemical elements by higher plants and their responses in biogeochemical provinces]. *Geokhimiya [Geochemistry]*, 2015, v. 53, no. 5, pp. 441–455.
- [13] Bayouli I.T., Bayouli H.T., Dell'Oca A., Meers E., Sun J. Ecological indicators and bioindicator plant species for biomonitoring industrial pollution: Eco-based environmental assessment. *Ecological Indicators*, 2021, v. 125, p. 107508.

- [14] Lugovskaya A. Yu., Khramova E.P., Chankina O.V. *Vliyaniye transportno-promyshlennogo zagryazneniya na morfometricheskie parametry i elementnyy sostav Potentilla fruticosa* [Effect of transport and industrial pollution on morphometric parameters and element composition of *Potentilla fruticosa*]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal* [Siberian Ecological Journal], 2018, v. 25, no. 1. pp. 111–121.
- [15] Hancock G.R., Martin Duque J.F., Willgoose G.R. Mining rehabilitation – Using geomorphology to engineer ecologically sustainable landscapes for highly disturbed lands. *Ecological Engineering*, 2020, v. 155, p. 105836.
- [16] Trubina M.R., Mukhacheva S.V., Bezel' V.S., Vorobeichik E.L. *Soderzhaniye tyazhelykh metallov v plodakh dikorastushchikh rasteniy v zone aerotekhnogennoy vozdeystviya Sredneural'skogo medepilavil'nogo zavoda (Sverdlovskaya oblast')* [Content of heavy metals in wild berries in the zone under aerotechnogenic impact of the Middle Urals copper smelter (Sverdlovsk oblast)]. *Rastitel'nye resursy* [Plant Resources], 2014, v. 50, no. 1, pp. 67–83.
- [17] Meena M.K. Impact of arsenic-polluted groundwater on soil and produce quality: a food chain study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, v. 192, no. 12, p. 785.
- [18] Zhao A., Yu Q., Feng L., Zhang A., Pei T. Evaluating the cumulative and time-lag effects of drought on grassland vegetation: a case study in the Chinese Loess Plateau. *J. of Environmental Management*, 2020, v. 261, p. 110214.
- [19] Alemasova A.S., Penkova Y.I., Pivovarova A.S., Ostapenko R.V. *Vliyaniye voyennykh deystviy na sodержaniye nekotorykh metallov v pochve Saur-Mogily, Donbass* [Military activity influence on some metals content in the Saur-Mogila soil, Donbass]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and applied ecology], 2018, no. 3, pp. 33–39.
- [20] Safonov A.I. Phyto-qualimetry of toxic pressure and the degree of ecotopes transformation in Donetsk region. *Problems of ecology and nature protection of technogenic region*, 2013, no. 1, pp. 52–59.
- [21] Safonov A.I. Phytointeractional monitoring in Donetsk. *World Ecology J.*, 2016, v. 6, no. 4, pp. 59–71.
- [22] Safonov A.I., Germonova E.A. *Ekologicheskiye seti fitomonitoringovogo naznacheniya v Donbasse* [Ecological networks for phytomonitoring purposes in Donbass]. *Problemy ekologii i okhrany prirody tekhnogennoy regiona* [Problems of ecology and nature protection of technogenic region], 2019, no. 3–4, pp. 37–42.
- [23] Safonov A. Ecological scales of indicator plants in an industrial region. *BIO Web Conf.*, 2022, v. 43, no. 03002, 8 p.
- [24] Safonov A.I., Morozova E.I. *Vidovoye raznoobraziye briobiontov monitoringovoy seti Tsentral'nogo Donbassa* [Species diversity of bryobionts of the monitoring network of the Central Donbass]. *Problemy ekologii i okhrany prirody tekhnogennoy regiona* [Problems of ecology and nature protection of technogenic region], 2021, no. 1–2, pp. 39–43.
- [25] Safonov A., Glukhov A. Ecological phytomonitoring in Donbass using geoinformational analysis. *BIO Web Conf.*, 2021, v. 31, no. 00020, 4 p.
- [26] Safonov A.I., Glukhov A.Z. *Fitomonitoring v tekhnogenno transformirovannoy srede: metodologiya i praktika* [Phytomonitoring in a technologically transformed environment: methodology and practice]. *Ekosistemy*, 2021, v. 28, pp. 16–28.
- [27] Alemasova A.S., Safonov A.I., Sergeeva A.S. *Nakopleniye tyazhelykh metallov mokhoobraznyimi v razlichnykh ekotopakh Donbassa* [Accumulation of heavy metals by bryophytes in various ecotopes of Donbass]. *Transformatsiya ekosistem pod vozdeystviem prirodnykh i antropogennykh faktorov* [Transformation of ecosystems under the influence of natural and anthropogenic factors]. *Mater. International scientific conf.*, Kirov, April 16–18, 2019. Kirov: Vyatka State University, 2019, pp. 60–65.
- [28] Kozlova E.A., Orlova E.E., Zubik I.N. Growth and development analysis of silver Brium (*Bryum argenteum* Hedw.) depending on illumination level influence. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, no. 6, p. 042012.
- [29] Bell A.D. *Plant form: An illustrated guide to flowering plant morphology*. Oxford; New York; Tokyo: Oxford University Press, 1991, 341 p.
- [30] Kruglyak V.V., Gureva E.I. *Printsipy formirovaniya landshafinogo tematicheskogo kompleksa v Tsentral'nom Chernozem'e* [Principles of landscape themed complex formation in the Central Black Earth]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 2, pp. 59–68. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-59-68
- [31] Borovlev A.O., Skrypnikov A.V., Bryukhovetsky A.N., Timofeev V.A., Prokopets V.S. *Obzor printsipov prostranstvennogo proektirovaniya lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Principles of spatial design for haulage roads]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 5, pp. 119–124. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-5-119-124
- [32] Kovylin N.V., Kovylin O.P., Sukhenko N.V. *Osobennosti vzaimootnosheniya drevostoya i napochvennogo pokrova v iskusstvennykh fitosenozakh Populus balsamifera L. i Populus nigra L.* [Peculiarities of the relationship between forest stand and ground cover in artificial phytocenoses of *Populus balsamifera* L. and *Populus nigra* L.]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 2016, no. 3(351), pp. 31–41.
- [33] Urazgildin R.V., Kulagin A.Yu. *Povrezhdeniya, adaptatsii, strategii drevesnykh vidov v usloviyakh tekhnogeneza: strukturno-funktsional'nyye urovni realizatsii adaptivnogo potentsiala* [Damages, adaptations, strategies of tree species in technogenesis conditions: structural-functional levels of adaptive potential realization]. *Uspekhi sovremennoy biologii* [Advances in modern biology], 2022, v. 142, no. 1, pp. 52–69.
- [34] Peng J., Pan Y., Liu Y., Zhao H., Wang Y. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape. *Habitat International*, 2018, v. 71, pp. 110–124.
- [35] Wu Z., Lei S., Yan Q., Bian Z., Lu O. 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*, 2021, v. 133, p. 108403.
- [36] Yuan J., Bian Z., Yan Q., Gu Z., Yu H. An approach to the temporal and spatial characteristics of vegetation in the growing season in Western China. *Remote Sensing*, 2020, v. 12 (6), p. 945.
- [37] Massante J.C. Mining disaster: restore habitats now. *Nature*, 2015, v. 528, p. 39.
- [38] Zhang P., Ye Q., Yu Y. Research on farmers' satisfaction with ecological restoration performance in coal mining areas based on fuzzy comprehensive evaluation. *Global Ecology and Conservation*, 2021, v. 32, p. 1934.
- [39] Kuznetsov A.V., Fesyun A.P., Samokhvalov S.G., Makhonko E.P. *Metodicheskiye ukazaniya po opredeleniyu tyazhelykh metallov v pochvakh sel'khozugodiy i produktsii rasteniyevodstva* [Guidelines for the determination of heavy metals in agricultural soils and crop products]. Moscow: TsINAO Publishing House, 1992, 61 p.

- [40] Syr'ye i produkty pishchevyye. Podgotovka prob. Mineralizatsiya dlya opredeleniya toksichnykh elementov: GOST 26929–94. Mezhgosudarstvennyy standart. Data vvedeniya 1996-01-01 [Raw materials and food products. Sample preparation. Mineralization for determination of toxic elements: GOST 26929–94. Interstate standard. Date of introduction 1996-01-01]. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov [IPK Standards Publishing House], 2002.
- [41] Khavezov I., Tsalev D. *Atomno-absorbtsionnyi analiz* [Atomic absorption analysis]. Leningrad: Khimiya [Chemistry], 1983, 144 p.
- [42] Pupyshv A.A. *Atomno-absorbtsionnyy spektral'nyy analiz* [Atomic absorption spectral analysis]. Moscow: Technosfera, 2009, 784 p.
- [43] Xu W., Wang J., Zhang M., Li S. Construction of landscape ecological network based on landscape ecological risk assessment in a large-scale opencast coal mine area. *J. of Cleaner Production*, 2021, v. 286, p. 125523.
- [44] Zhang M., Wang J., Li S., Feng D., Cao E. Dynamic changes in landscape pattern in a large-scale opencast coal mine area from 1986 to 2015: a complex network approach. *Catena*, 2020, v. 194, p. 104738.
- [45] Neamtu R., Sluser B., Plavan O., Teodosiu C. Environmental monitoring and impact assessment of Prut River cross-border pollution. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, v. 193, no. 340, p. 09110.

Authors' information

Alemasova Antonina Sergeevna  — Dr. Sci. (Chemistry), Professor, Head of Analytical Chemistry Department, Donetsk National University, kf.analit.chem.zav@donnu.ru

Safonov Andrey Ivanovich — Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Head of Botany and Ecology the Department, Donetsk National University, a.safonov@donnu.ru

Received 10.06.2022.

Approved after review 20.09.2022.

Accepted for publication 26.09.2022.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
The authors declare that there is no conflict of interest