ГЕОХИМИЯ, 2023, том 68, № 10, с. 1032–1044

МОРФОГЕНЕТИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ БРИОБИОНТОВ В УСЛОВИЯХ ГЕОХИМИЧЕСКИ КОНТРАСТНОЙ СРЕДЫ ДОНБАССА

© 2023 г. А. И. Сафонов[a], *, А. С. Алемасова[a], И. И. Зиньковская[b], **, К. Н. Вергель[b], Н. С. Юшин[b], А. В. Кравцова[b], О. Чалигава[b]

[a]*Донецкий государственный университет, ул. Университетская, 24, Донецк, 283000 Россия*

[b]*Объединенный институт ядерных исследований, ул. Жолио-Кюри, д. 6, Дубна, 141980 Россия*

**e-mail: andrey_safonov@mail.ru*

***e-mail: inga@jinr.ru*

Поступила в редакцию 19.03.2023 г.
После доработки 05.04.2023 г.
Принята к публикации 08.04.2023 г.

Территория современного центрального Донбасса представлена в качестве экспериментальной площадки для реализации программы ингредиентного биомониторинга. Мохообразные были трансплантированы и экспонированы в геолокалитеты непосредственного импакта предприятий угольно-добывающего и перерабатывающего комплексов, металлургической и химической промышленности, рудеральных и селитебных экотопов. Для бриобионтов с широкой амплитудой устойчивости к техногенному загрязнению (*Amblystegium subtile* (Hedw.) Schimp., *Brachythecium campestre* (Muell. Hal.) Schimp., *Bryum argenteum* Hedw., *Bryum caespiticium* Hedw., *Bryum capillare* Hedw., *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid и *Pylaisia polyantha* (Hedw.) Schimp.) выбраны следующие критерии антропотолерантности: 1) по функции накопления элементов, 2) по способности аккумулировать специфические загрязнители, 3) по структурно-функциональным реакциям и проявлению нетипичного морфогенеза (тератогенеза) растительных организмов и 4) смещения характеристик стратегии выживания видов в условиях глубокой трансформации ландшафтных систем Донбасса. Установлены особенности накопления Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br, Rb, Sr, Zr, Mo, Cd, Sb, I, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Dy, Yb, Hf, Ta, W, Hg, Pb, Th, U в образцах растений-индикаторов, используемых в качестве сезонных фитотест-мониторов для оценки загрязнения природных сред. При радикальном нарушении геохимических циклов в системах жизнеобеспечения растений зафиксированы случаи специфических хлорозов и некрозов точечной локализации, гипо- и гипергенезии и деформации, а также фасциации, пролификации, дистопии, олигомеризации вегетативных органов, особенностей развития отдельных групп клеток в составе покровных и конформационных тканей листового аппарата бриобионтов. Выявленные аномалии являются фитоиндикационной характеристикой при проведении экспресс-анализа уровня техногенного напряжения в полевой диагностике. Рассчитаны коэффициенты биологического поглощения и техногенной концентрации элементов в биосубстратах при оценке геохимической контрастности среды. Выделена эктопическая разница в накопительной способности бриобионтами для отдельных элементов или их ассоциативных групп. Связанная с этим морфогенетическая гетерогенность структур и элементного состава растений является частным случаем соответствия полученных данных идеям В.И. Вернадского о концентрационной, информационной и средообразующей функциях живого вещества.

Ключевые слова: техногенное загрязнение, фитоиндикационный мониторинг, мохообразные, донецкий регион, нейтронный активационный анализ, атомно-абсорбционный анализ, металлургия

DOI: 10.31857/S0016752523100114, **EDN:** NURQVW

ВВЕДЕНИЕ

Для региона, где осуществляется интенсивная работа промышленных предприятий, которая сопровождается выбросами с последующим загрязнением, обязательным является проведение экологического мониторинга (Ермаков и др., 2020; Opekunova et al., 2017; Peng et al., 2018; Pashentsev et al., 2019; Xu et al., 2021; Yeprintsev et al., 2019). В большинстве случаев оценка геохимической активности в ландшафтах опирается на сведения об ингредиентном составе природных сред (Ермаков, 2017; Shahid et al., 2013; Опекунов и др., 2021; Shekoyan et al., 2020), в том числе в растениях (Kabata-Pendias, Pendias, 2001; Трубина и др., 2014; Khiem, 2020). Токсикологическое заключение является информативным, если проанализи-

рован процесс накопления большого количества элементов, или хотя бы основных загрязнителей в биологических структурах (Уфимцева, 2015; Bayouli et al., 2021; Bidleman et al., 2015; Chung et al., 2014). Это позволяет установить причинно-следственные связи между концентрациями приоритетных загрязнителей и их физиологическими эффектами по реакции на живые объекты (Ермаков и др., 2018; Опекунова, 2016; Zaghloul et al., 2020; Луговская и др., 2018).

Мохообразные представляют собой специфическую группу растений, которые часто используются в программах оценки загрязнения воздуха (Quyet et al., 2021; Koroleva et al., 2020; Shi et al., 2017; Kozlova et al., 2022; Frontasyeva et al., 2020; Hristozova et al., 2020; Świsłowski, 2022), что связано с их особенностями строения и спецификой поглощения элементов с осадками и вовлекаемыми в биогенный оборот элементами техногенной пыли (Ah-Peng, 2017; Decker, Reski, 2020; Longton, 1988; Spangler, 2021; Rimac et al., 2022; Vergel et al., 2020).

Территория современного Донбасса в геохимическом отношении изучена мало. Геохимические процессы, связанные с формированием антропогенных аномалий локального типа, находятся в прямой зависимости от угледобывающей деятельности и металлургической промышленности (Государственный..., 2023; Гамов и др., 2016), что также представляет собой актуальную проблему в глобальном масштабе (Bian et al., 2020; Hancock et al., 2020; Massante, 2015; Su et al., 2020; Yuan et al., 2021). Существуют только отрывочные данные, по которым можно косвенно установить фоновые концентрации отдельных элементов в природных средах (преимущественно в почве) и показатели промышленного импакта (Тимофеев и др., 1996; Глухов и др., 2006). Установлены высокий уровень антропогенного воздействия и техногенная гетерогенность Донбасса (Государственный..., 2023; Sergeeva et al., 2021; Алемасова, Сафонов, 2022), что объясняет геохимическую контрастность региона.

В условиях производственного риска и опасности для регулярных геолого-почвенных исследований в Северном Приазовье с 2014 г. осуществление активного мониторинга с помощью растений является единственной возможностью проведения полномасштабного эксперимента на всей доступной территории (Авраимова, Сафонов, 2023; Сафонов, Глухов, 2021). Поэтому анализ геохимических данных по растениям-индикаторам в антропогенно трансформированных ландшафтах Донбасса рассматривается в качестве актуальной научно-прикладной задачи по их диагностике.

Учение В.И. Вернадского о биосфере – фундаментальная разработка, определяющая систему реализации процессов жизни (Вернадский, 1991; Вернадский, 2001; Янин, 2022). При непосредственном изучении концентрационной, информационной и средообразующей функций живого вещества на примере конкретных регионов создается возможность оценки местности для дальнейшего внедрения оптимизационных мероприятий. Реализуемый в Донбассе индикационный эксперимент с использованием мохообразных (Зиньковская и др., 2022; Sergeeva et al., 2021; Safonov, Glukhov, 2021) основывается на методологии и понимании В.И. Вернадским указанных функций биосферы и сопряженных процессов, обусловливающих биогеохимические процессы в промышленном регионе.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Из перечня фитомониторинговых стационаров 113-компонентной наблюдательной сети в Центральном Донбассе выбраны 24 геохимически контрастных локалитета, в которых осуществляли выращивание мхов (рис. 1).

Пробные площади были дифференцированы по способу эксплуатации экотопов: техногенного, селитебного и рекреационно-буферного назначения.

Первая категория мониторинговых точек включает объекты промышленной инфраструктуры, территории непосредственного воздействия предприятий-загрязнителей, участки глубокой трансформации ландшафтов (отвалы породы угольных шахт), стационарные источники выбросов системы теплоснабжения: **1** – завод металлургического машиностроения (г. Дебальцево), Углегорская ТЭС, **4** – пгт Корсунь, территория импакта Енакиевского металлургического комбината, **5** – г. Енакиево, селитебно-промышленный конгломерат, **13** –импакт металлургического завода; **15** – Зуевская ТЭС, энергомеханический завод (г. Зугрэс); **17** – район шахты Заперевальная (г. Донецк), **19** – Ленинский район г. Донецка (предприятия горно-металлургической промышленности), **20** – Кировский район (предприятия горнодобывающей и перерабатывающей промышленности).

Селитебно-бытовые экотопы характерны для следующих учётных площадок: **11** – п. Пески Ясиноватской агломерации, **12** – п. Спартак Ясиноватской агломерации, **14** – г. Макеевка (Центральногородской район), **16** – г. Иловайск, включая железнодорожную развязку, **22** – г. Моспино, **24** – Пролетарский район г. Донецка.

Категория экотопов рекреационно-буферного назначения рассмотрена в качестве квазиприродных геосистем: **2** – система прудов г. Горловки, **3** – пгт Пантелеймоновка Горловско-Енакиевской агломерации, **6** – г. Шахтерск Торезской агломе-

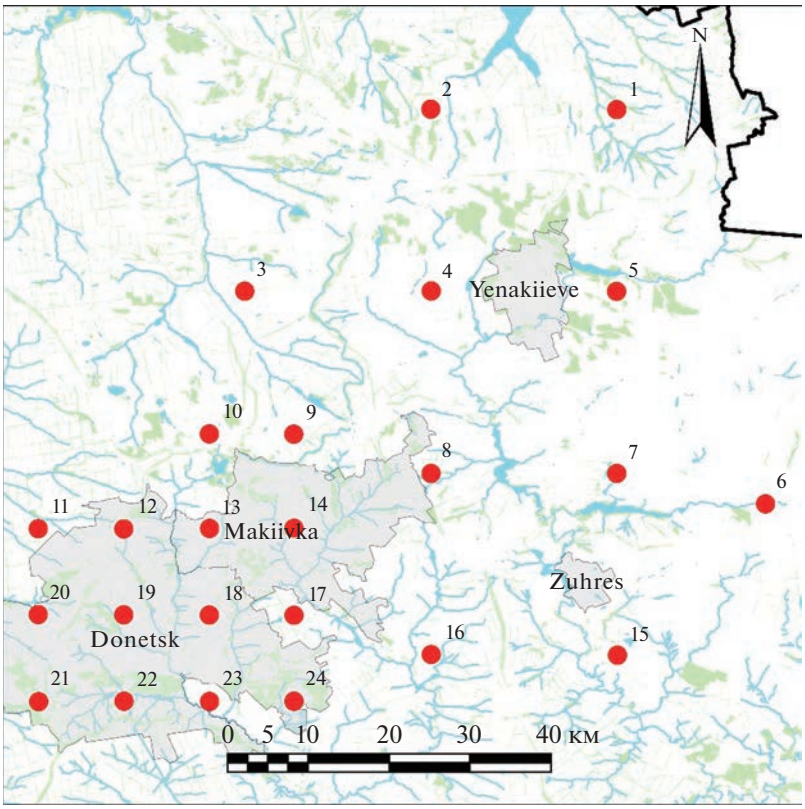

Рис. 1. Учетные площадки экспонирования образцов мхов в центральном Донбассе.

рации, **7** – пгт Зуевка (Зуевский ландшафтный парк), **8** – г. Харцызск, **9** – пгт Ясиновка Макеевской агломерации, **10** – парковые территории г. Ясиноватая, **18** – Куйбышевский район г. Донецка (Красный Пахарь), **21** – Петровский район г. Донецка (зона рекреации), **23** – п. Авдотьино Донецкой агломерации.

Первичные образцы для трансплантации и экспонирования бриобионтов *Amblystegium subtile* (Hedw.) Schimp., *Brachythecium campestre* (Muell. Hal.) Schimp., *Bryum argenteum* Hedw., *Bryum caespiticium* Hedw., *Bryum capillare* Hedw., *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid и *Pylaisia polyantha* (Hedw.) Schimp. были получены в буферной территории Ландшафтного природного парка “Донецкий Кряж”, являющегося объектом государственного природно-заповедного значения. Видовое разнообразие мохообразных в конкретных участках мониторинговой сети проанализировано в предыдущей работе (Сафонов, Морозова, 2021).

Опыт проведен в четыре этапа: 1) подготовка образцов и их трансплантация в конкретный геолокалитет для выращивания (2-я декада ноября, 2018 г.); 2) 6-месячное экспонирование образцов в 5-кратной повторности методом конверта в учетных площадках и сбор приростов гаметофитов за время нахождения их на новом месте (2-я декада мая, 2019 г.); 3) анатомо-морфологическая оценка собранного ботанического материала – выявление аномалий, тератных новообразований и структурной разницы в строении трансплантируемых растений в разных учетных площадках; 4) лабораторная работа по установлению элементного состава в приростах бриобионта-индикатора. Указанный период полевого эксперимента связан с наиболее благоприятным климатическим сезоном для экспонирования мхов в степной зоне Восточной Европы (Erdős et al., 2018; Zanatta et al., 2020) для сохранения интенсивности прироста гаметофитов. 2018–2019 гг. на перспективу рассматриваются в качестве реперного отрезка времени стагнации тяжелой промышленности в регионе (Государственный..., 2023), что позволит в дальнейшем оценивать полученный материал по ингредиентному мониторингу как следствие сформировавшихся геохимических провинций.

Учитывая специфику эксперимента и отсутствие актуальных данных о фоновых геохимических показателях, основное сравнение в системе “опыт–контроль” проведено в ранжированном тренде техногенной нагрузки. В случае выявления структурных аномалий (терат) или морфогенетически функциональных отклонений строения растений в первый полевой период сбора растений ботанико-экологическая часть эксперимента была про-

ведена повторно в те же сезоны 2020–2021 гг. Тератологическая идентификация образцов осуществлялась в соответствии с терминологией, описанной ранее для цветковых растений (Сафонов, 2019; Safonov, 2022). Фитоматериал был проанализирован в контексте избыточных концентраций отдельных элементов при выявлении признаков полевой экспресс-диагностики жизненного состояния растения: анатомо-морфологические показатели, некротические проявления, структурно-функциональные отклонения от нормы по пигментации.

Основным методом определения элементного состава в образцах бриобионтов является нейтронный активационный анализ (НАА) на установке РЕГАТА импульсного быстрого реактора ИБР-2 ЛНФ Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна (Zinicovscaia et al., 2021). Особенности аналитического контроля с помощью атомно-абсорбционного метода на приборе Сатурн-3 описаны ранее (Алемасова, Сафонов, 2022), установлены в аттестованной лаборатории кафедры аналитической химии Донецкого национального университета. Получены сведения об экотопической разнице в приростах бриобионтов следующих элементов: Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br, Rb, Sr, Zr, Mo, Cd, Sb, I, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Dy, Yb, Hf, Ta, W, Hg, Pb, Th, U.

Для выявления возможных источников и причин 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 (причину) превышения концентраций.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ингредиентный мониторинг, элементный состав бриобионтов

Были составлены три ряда ранжированных последовательностей средневзвешенных значений по содержанию (мг/кг) анализируемых элементов в индикаторном бриобионте. Выбор характерных участков в таком аспекте был основан на особенностях разного целевого использования экотопа и, соответственно, техногенной нагрузки.

Рекреационная территория п. Авдотьино (точка 23, рис. 1) характеризуется следующей закономерностью в порядке убывания концентраций (мг/кг) элементов: Si (37000) > Ca (14000) > Fe (8700) > K (8100) > Al (7300) > Mg (4200) > > Na (3050) > Cl (780) > Ti (410) > Mn (204) > > Sr (140) > Ba (121) > Zn (101) > P (52) > Cr (40) > > Zr (39) > S (27) > Rb (19) > Ni (13.8) > V (12.8) > > Ce (12.6) > Nd (12.2) > Br (12) > La (6.3) > Cu (5) > > I (4.4) > As (3.21) > Co (3.2) > Sc (2.36) > Mo (2.1) > > Th (1.98) > Pb (1.7) > Sm (1.29) > Cs (1.17) > Sb (1) > > Hf (0.86) = U (0.86) > W (0.6) > Dy (0.57) > > Se (0.56) > Yb (0.52) > Cd (0.39) > Eu (0.225) > > Ta (0.169) > Tb (0.167) > Hg (0.07). Установить, соответствуют ли такие показатели естественному геохимическому фону в регионе на сегодня, не представляется возможным, поскольку актуальных данных в этом направлении не существует. Поэтому такие результаты представляют собой первичную геохимическую характеристику для территории центрального Донбасса в связи с уровнем антропогенной деятельности именно 2018–2019 гг. Поскольку сама специфика эксперимента (прирост за 6 месяцев новых гаметофитов мохообразных) позволяет связать эти значения с загрязнением воздуха в конкретном локалитете именно в этот период.

Учётная площадка в п. Спартак (точка 12, рис. 1) характеризуется следующим ранжированным рядом содержания элементов (мг/кг) в приросте бриобионтов: Si (169000) > Fe (51000) > Al (32000) > Ca (16500) > K (12600) > Mg (10900) > Na (4400) > > Ti (2020) > Mn (740) > Ba (460) > P (305) > > Cl (270) > Zn (253) > Zr (160) > Cr (143) > Sr (141) > > S (70) > Rb (64) > Ni (57) > V (50) > Ce (43) > > Cu (35) > La (22.4) > Nd (22) > As (16.2) > > Mo (15.7) > Th (15.1) > Co (11.2) > Pb (11) > > Br (9.5) > Sc (7.16) > Sb (4.4) > Sm (4) > I (3.9) > > Cs (3.82) > Hf (3.6) > U (2.82) > Dy (2.8) > W (2) > > Cd (1.85) > Yb (1.58) > Hg (0.8) > Se (0.73) > > Eu (0.68) > Ta (0.63) > Tb (0.511). В этом случае значения средних концентраций существенным образом преобразуются в увеличении доли технофильных элементов, что согласуется с большим воздействием на природные системы антропогенного фактора по сравнению с участком рекреационной зоны.

Установившиеся тенденции увеличения доли Fe, Al, Mg, Ti, Mn, Zn, Pb, Cd и Hg в общем минеральном составе растения-индикатора сохраняются для модельного участка техногенного экотопа (точка 13, рис. 1) в зоне влияния металлургического комбината, сказываются и долгосрочные эффекты загрязнения элементами (мг/кг), входящими в состав выбросов производства: Si (158000) > > Fe (72000) > Al (38400) > Ca (38000) > > Mg (16700) > K (9300) > Na (4100) > Ti (2350) > > Mn (1290) > Zn (670) > Cl (580) > Ba (540) > > P (447) > Cr (235) > Sr (180) > Zr (160) > S (116) > > Ni (90) > V (70) > Cu (69) > Rb (53) > Ce (33) > > Mo (29.3) > Nd (24) > La (19.5) > Pb (19) > > As (14.3) > Co (12.7) > Br (9.6) > W (8.6) > Sb (7.6) > > Sc (7.07) > Th (6) > I (5.5) > Cd (3.9) > Sm (3.6) > > Cs (3.54) > Hf (3.5) > Dy (3.3) > U (2.88) > > Se (2.26) > Hg (2.13) > Yb (1.44) > Eu (0.72) > > Ta (0.65) > Tb (0.468). Информация такого содержания позволяет проследить закономерности

в ряду увеличения доли технофильных элементов, что также доказывает информативность метода биомониторинга по признакам накопления в фитосубстратах.

При сравнении содержания элементов в опытных и контрольных образцах (численное соотношение данных) были установлены по два коэффициента накопления:

1) для урбанизированных участков (рудеральные и селитебные экотопы) и

2) на территориях непосредственного влияния предприятий угольно-добывающего и перерабатывающего комплексов, металлургической и химической промышленности.

Получены следующие результаты по коэффициентам накопления в ряду диапазона установленных концентраций (мг/кг): Na (3.2 и 4.8), Mg (2.8 и 4.4), Al (3.7 и 5.3), Si (3.6 и 4.2), P (2.3 и 16.2), S (1.4 и 3.9), Cl (3.1 и 5.5), K (2.5 и 3.2), Ca (3.5 и 4.6), Sc (3.6 и 4.5), Ti (5.2 и 5.7), V (4.9 и 6.3), Cr (4.6 и 8.9), Mn (4.5 и 7.2), Fe (12.2 и 12.5), Co (3.7 и 4.6), Ni (3.1 и 6.5), Cu (6.6 и 13.1), Zn (5.4 и 10.2), As (6.8 и 8.9), Se (3.8 и 8.3), Br (1.7 и 2.4), Rb (3.4 и 4.5), Sr (2.4 и 3.1), Zr (4.2 и 8.2), Mo (4.5 и 9.9), Cd (2.1 и 10.7), Sb (2.6 и 21.7), I (1.9 и 4.0), Cs (3.4 и 3.9), Ba (7.1 и 14.7), La (4.4 и 6.0), Ce (5.2 и 6.8), Nd (2.3 и 2.7), Sm (3.4 и 5.7), Eu (3.9 и 4.5), Tb (3.5 и 4.5), Dy (4.6 и 5.8), Yb (3.4 и 3.7), Hf (6.8 и 9.3), Ta (3.1 и 7.7), W (8.7 и 14.3), Hg (2.9 и 12.4), Pb (4.4 и 11.0), Th (5.4 и 7.9), U (3.9 и 4.3).

Следовательно, при интенсификации антропогенной нагрузки в биоматериале резко возрастает доля неорганической составляющей, которая концентрируется в клетках и тканях растительного организма, попадая в него с водными осадками в разном агрегатном состоянии и при осаждении пылевых частиц загрязненного воздуха. Такой техногенный импакт отражается на всех процессах жизнеобеспечения бриобионтов и имеет неоднозначную разнонаправленную форму воздействия, что проявляется в гипер-, гипофункциях отдельных органов и тканей, а также может являться причиной аномальных новообразований в растении.

В системе монофакторного анализа подготовлен картографический материал, отражающий специфику загрязнения приземного слоя атмосферы по показателям накопления некоторых технофильных элементов в активном биосубстрате экспонированных бриобионтов (рис. 2).

Визуализация данных в соответствии с четырьмя диапазонами варьирования всего ряда концентраций для отдельных элементов доказывает геохимическую контрастность среды Донбасса, обусловленную интенсивностью антропогенного фактора. Также выделяется территориальная специфичность в загрязнении, что, по-видимому, связано с воздействием разных источников загрязнения. Поскольку индикаторные бриобионты не являются объектом сельскохозяйственной деятельности и сопряжены с процессами загрязнения воздуха, то анализировать результаты в отношении предельно-допустимых концентраций элементов в растениях для данного примера нецелесообразно. Эксперимент также доказывает активную вовлеченность токсичных элементов в биогеохимические циклы, позволяет констатировать существенную роль мохообразных в функциональной оптимизации не только путем занятия пустующих экологических ниш при первичном сукцессионном освоении нео-ландшафтов (например, отвалы угольных шахт, шламонакопители, места складирования особо опасных отходов), но и в качестве компонентов ценоза, уменьшающего поверхностные эрозионные процессы вследствие задернения участков открытых поверхностей. Описанные процессы, безусловно, являются иллюстративным примером биогенной миграции атомов как единичного аспекта учения В.И. Вернадского о биосфере (Вернадский, 1991; Вернадский, 2001), что также согласуется с работами других авторов (Водяницкий, 2013; Ермаков и др., 2009; Уфимцева, 2015; Калинина, 2022; Boch et al., 2018; Opekunona, 2017; Shi et al., 2017).

Метод главных компонент позволил установить степень корреляционных связей в сопутствующем ингредиентном загрязнении окружающей среды группами элементов. Для проведения анализа элементы были разделены на две группы. Первая группа элементов включила в себя Na, Si, Cl, K, Ca, Sc, Ti, Se, Br, Rb, I, Ba, Ce, Nd, Eu, Tb, Dy, Yb, Hf, Ta, W, Th, U. Для этой группы было выделено несколько ассоциаций элементов (рис. 3а).

Все переменные, спроецированные близко к началу координат, считаются маловажными (Cl, I, W). В то время как короткие расстояния между переменными указывают на тесную корреляцию между элементами. Таким образом, были выделены три ассоциации элементов. Первый компонент включил в себя Na–Se–Rb–Ce–Nd–Eu–Tb–Yb–Hf, а второй Si–Sc–Dy. Оба компонента включают ассоциации редкоземельных элементов и элементов основных почвообразующих минералов, их источником можно считать пыль природного и антропогенного происхождения (транспорт, добыча и переработка угля). Третий компонент включил в себя Br–Ba–K, источниками которых могут быть сжигание топлива, производство удобрений и пестицидов (Bidleman et al., 2015; Peng et al., 2021).

Во вторую группу преимущественно технофильных элементов вошли: Mg, Al, P, S, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Zr, Mo, Cd, Sb, Cs, La, Sm, Hg, Pb (рис. 3б). Для данной группы также были три ассоциации элементов. Первый компонент включил в себя V–Mn–Fe, источниками

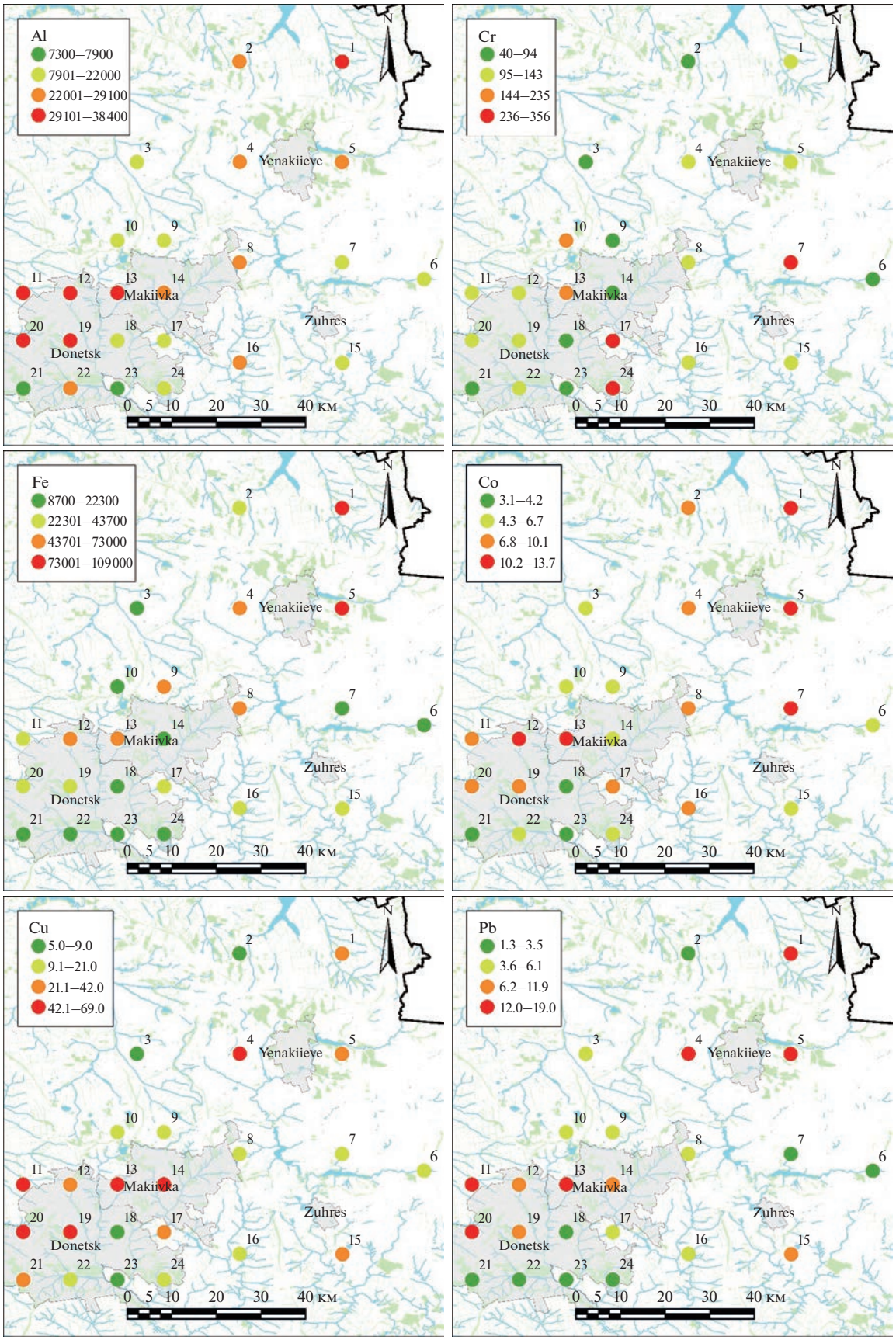

Рис. 2. Содержание Al (а), Cr (б), Fe (в), Co (г), Cu (д) и Pb (е), мг/кг в экспонированных мохообразных.

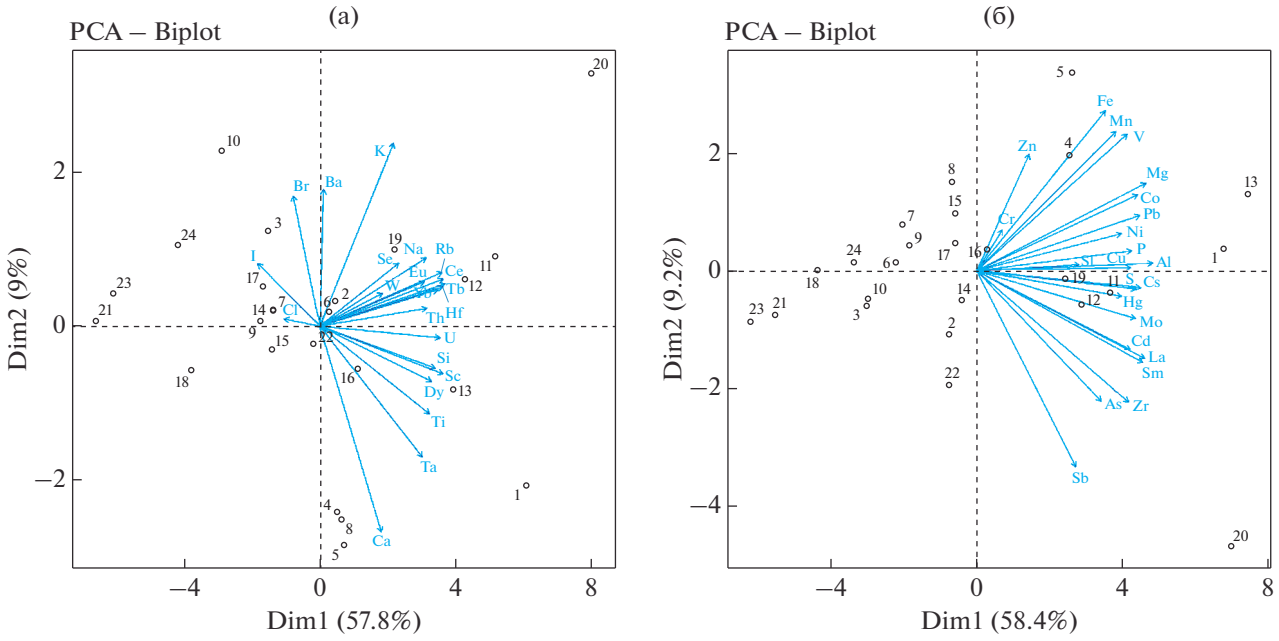

Рис. 3. Ординация элементов, определенных в пробах бриобионтов на плоскости двух первых главных компонент.

которых можно считать металлургические предприятия. Второй компонент включил Mg–Al–P–S–Co–Ni–Cu–Sr–Mo–Cd–Cs–La–Sm–Hg–Pb, источниками которых может быть добыча и переработка угля (Su et al., 2020). В третий компонент вошли As–Zr–Sb, для которых возможны несколько источников происхождения: сжигание угля, производство удобрений и дорожная пыль (Shahid et al., 2013; Chung et al., 2014). Полученные результаты иллюстрируют процессы сопряженного поступления технофильных элементов в окружающую среду в зависимости от специфики антропогенной деятельности в регионе.

Фитоиндикационный структурно-функциональный мониторинг. Аномалии строения бриобионов. Стратегии выживания видов

При доказательстве выбора *Ceratodon purpureus* в качестве модельного вида в учетных площадках были также размещены и другие виды мохообразных, которые в большинстве случаев не выдержали нагрузки токсичной среды даже в благоприятный макроклиматический период своего зимне-весеннего развития (по фактору увлажнения воздуха в регионе), поэтому экспериментально установлено не только биоиндикационное значение вида по концентрационным параметрам при выявлении экотопической разницы, но и отмечен высокий уровень толерантности вида к условиям неспецифического стресса в ландшафтных системах центрального Донбасса.

В эксперименте по трансплантации мохообразных были задействованы образцы следующих видов с указанием выживаемости в точках мониторинговой сети: *Ceratodon purpureus* (100%), *Bryum argenteum* (92), *Brachythecium campestre* (83), *Bryum caespiticium* (79), *Bryum capillare* (71), *Pylaisia polyantha* (63) и *Amblystegium subtile* (54). Гаметофиты перемещённых тест-растений проявляли интенсификацию ростовых процессов на 20–25 день после пересадки. Заметное торможение роста, а затем появление адаптивного прироста позволили анатомо-морфологически обособить участок растения, который сформировался именно в учётной площадке. Поскольку мохообразные способны поглощать вещества всей надземной поверхностью тела, то элементный состав в образовавшихся за период экспозиции частях растений и считается информационно-индикаторным критерием в оценке качества воздушной среды (Khiem, 2020; Ah-Htng et al., 2017; Boch et al., 2018; Koroleva et al., 2020; Quyet et al., 2021). Вовлеченные в биогеохимический цикл элементы окружающей среды (преимущественно техногенного происхождения) являются стрессовым фактором для растений в процессе их интродукционного испытания (Kabata-Pendias, Pendias, 2001; Kozlova et al., 2022), поэтому проявляются соответствующие компенсаторные механизмы выживания каждой особи в отдельности; эти признаки специфичны для разных видов и рассмотрены в качестве индикаторных.

Весь диапазон ответных структурных реакций бриобионта на техногенное загрязнение был условно разделен на две группы функциональных

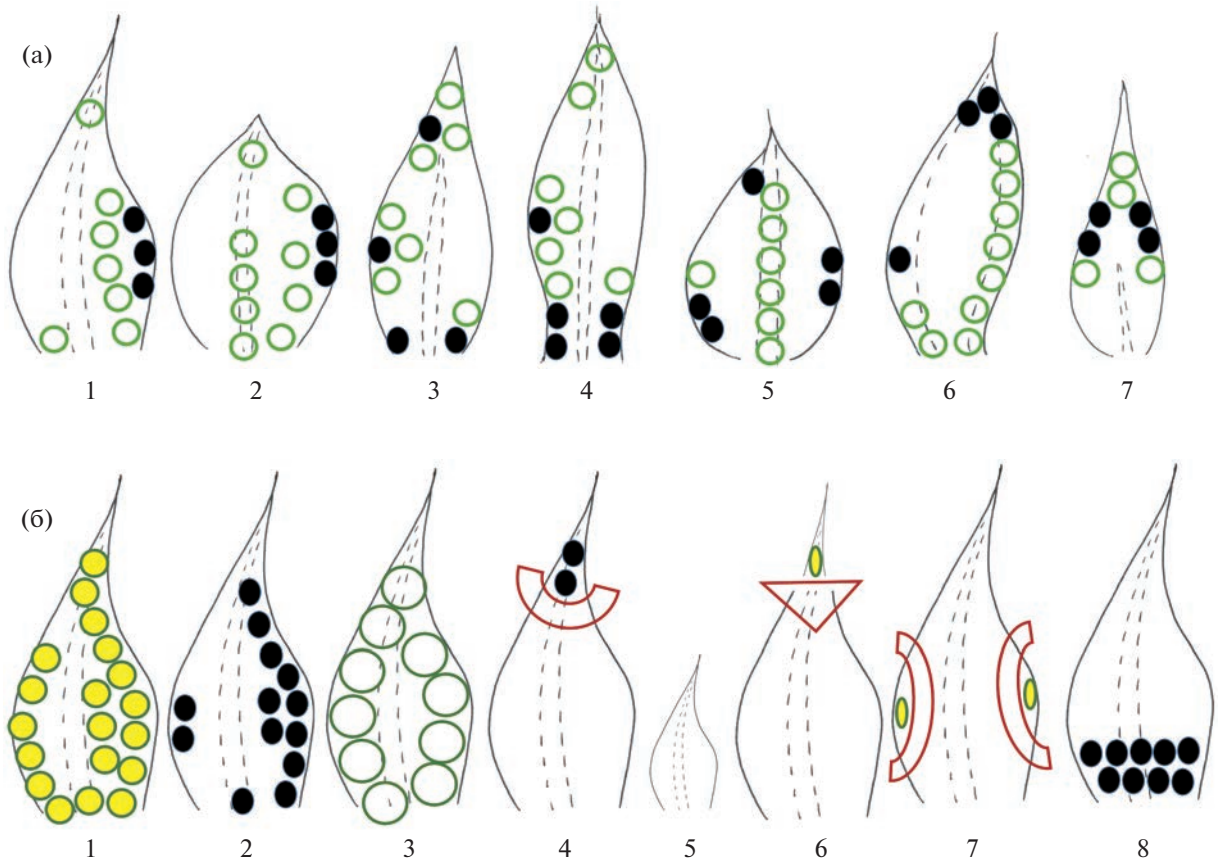

Рис. 4. Морфогенетические модификации листа бриобионтов в условиях экспонирования в Донбассе: (а) – межвидовая разница в образовании хлорозов и некрозов *Ceratodon purpureus* (1), *Bryum argenteum* (2), *Brachythecium campestre* (3), *Bryum caespiticium* (4), *Bryum capillare* (5), *Pylaisia polyantha* (6) и *Amblystegium subtile* (7); (б) – варианты специфических модификаций при пороговом накоплении элементов (пояснение в тексте).

преобразований: 1) общие-неспецифические – функциональные, например, хлорозы, некрозы и 2) дискретно-специфические, эндемично проявляющиеся только при конкретной комбинации загрязняющих элементов или монодоминантном загрязнении.

Выделено 8 общих-неспецифических структурно-функциональных реакций бриобионтов-индикаторов (рис. 4) в проведенном эксперименте: хлороз (более 40% площади листовой поверхности) проявлялся при концентрации следующих элементов: Na > 2700 мг/кг, Mn > 800 мг/кг, Zn > > 500 мг/кг в растениях (рис. 4б, 1); некротические образования (более 20% площади листовой поверхности) при концентрации K > 15000 мг/кг, Co > 10 мг/кг, Sb > 2.5 мг/кг, Cu > 30 мг/кг, Cd > > 1.5 мг/кг (рис. 4б, 2); бесхлорофиллные листья (рис. 4б, 3) при Cl > 500 мг/кг, Zn > 600 мг/кг, Nd > 24 мг/кг, P > 210 мг/кг; краевой некроз верхушки листа (рис. 4б, 4) – Mg > 10000 мг/кг, Ni > > 45 мг/кг, Eu > 0.7 мг/кг; частая гипогенезия листа (рис. 4б, 5) – Cr > 230 мг/кг, Sr > 180 мг/кг; скручивание верхушки (рис. 4б, 6) – Na > 2800 мг/кг, Co > 11 мг/кг, Zr > 150 мг/кг, Mo > 1.5 мг/кг; скручивание боковых частей листа (рис. 4б, 7) – Mn > > 900 мг/кг, La > 20 мг/кг; локальные хлорозы у основания листа (рис. 4б, 8) – Fe > 72000 мг/кг, Hf > 4 мг/кг. В перечне установленных пороговых концентраций некоторых элементов приведены примеры доказанных эффектов при морфоструктурном учете образцов. Большинство элементов ассоциированы в группы совместного загрязнения, поэтому подход выделения пороговой концентрации для конкретного элемента-загрязнителя, как правило, сопряжен с характеристиками высоких концентраций сопутствующих ему элементов.

Установлено, что проявление хлорозов и некрозов для листа бриобионтов является видоспецифическим (рис. 4а). Этот критерий можно рассматривать как элемент проведения полевой экспресс-диагностики для тех видов растений, которые встречаются в местах предполагаемой геохимической провинции, в том числе техногенного происхождения, что актуально для территории Донбасса. Из общих закономерностей форми-

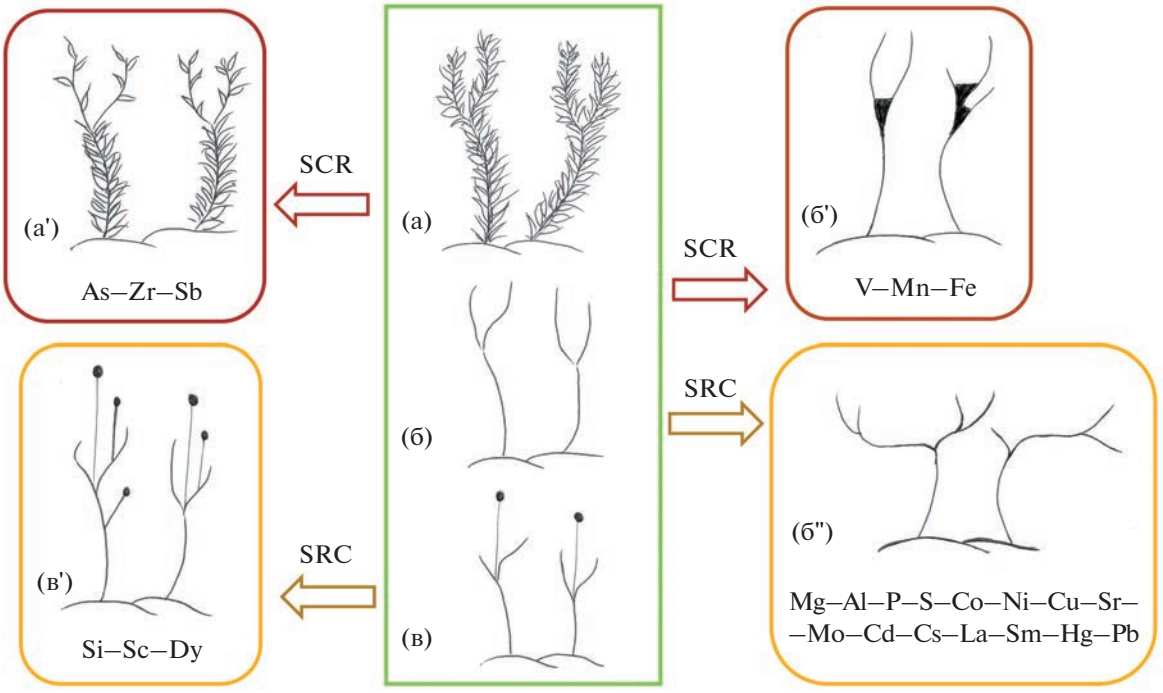

Рис. 5. Трансформация жизненных стратегий *Ceratodon purpureus* в условиях геохимического контраста: (а) – фенотипическая норма, (б) – схема типичного габитуса, (в) – схема в стадии спорофита (норма), (а') – олигомеризация индикаторного прироста, (б') – барьерная фасциация осей гаметофита, (б") – дистопия архитектоники гаметофита, (в') – нетипичная пролификация спорофита (патология); SCR – тенденции проявления патиентных стратегий; SRC – реализация эксплерентных стратегий.

рования некротических пятен и мест деградации хлорофилла подтверждено, что лист ассиметричного строения уязвим в первую очередь в большей по размеру доле. Этот факт существенным образом доказывает большую физиологическую значимость центральной части листа и объясняет возможную асимметрию в условиях неспецифического стресса.

Среди локально-эндемичных и проявляющихся в качестве дискретно специфических структурных реакций бриобионта отмечены следующие 8 вариантов: фасциации осей гаметофита при Sc > 7 мг/кг, U > 3 мг/кг; прозенхимизация клеток вдоль центральной жилки листа – As > 27 мг/кг, Ce > 45 мг/кг; трансформация скульптуры адаксиальной поверхности листа – Ti > 2000 мг/кг, Cd > 3 мг/кг, Hg > 4.5 мг/кг; дистопия элементов гаметофита в общей архитектонике прироста – Se > 2 мг/кг, единичные изгибы центральной жилки листа – Al > 27000 мг/кг, Ta > 1 мг/кг, Th > > 11 мг/кг, Cu > 55 мг/кг; олигомеризация листочков при деструкции по жилкованию – Ni > 85 мг/кг, Hg > 5 мг/кг; нетипичная гетерогенность паренхимных клеток по соотношению размеров – V > > 70 мг/кг, Sc > 3.5 мг/кг; нетипичная пролификация спорофита – Rb > 60 мг/кг, Dy > 3 мг/кг, W > 5 мг/кг. Такие специфические новообразования условно разделены на два пути проявления: по клеточным структурам поверхности листа и покровных тканей, а также в отношении габитуальных трансформаций (изменения внешнего вида, архитектоники), что проявляется как для гаметофита, так и для спорофита бриобионта.

В эколого-ботанической литературе вопрос жизненных стратегий мохообразных обсуждается, как правило, только в контексте общих морфологических и ценотических описаний (Kürschner, 2004; Longton, 1988; Decker, Reski, 2020; Spangler, 2021; Zanatta et al., 2020). Такая информация нуждается в геохимическом осмыслении при анализе процессов трансформации жизненных стратегий – принципиальной смены приспособлений по выживанию за счет структурно-функциональных новообразований. Установлено, что после трансплантации и 6-месячном экспонировании гаметофиты мохообразных испытывают не только состояние стресса, но и проявляют разные механизмы адаптационной устойчивости в токсической среде, что отражается в морфогенетических процессах с частым проявлением тератного строения растений и сопряжено со спецификой геохимического контраста по ассоциированным группам загрязнителей (рис. 5).

На фоне общего химического стресса *Ceratodon purpureus* является патиентом. Но способы такой стратегии существенным образом дополняются ме-

ханизмами устойчивости, характерными для виолентных и эксплерентных сценариев освоения территории, ресурсов и реализации программы выживания. На этом примере ценотический подход в эколого-ботаническом анализе напрямую связан с индивидуальными свойствами растительного организма в зависимости от тех факторов среды, которые по своему воздействию близки к ограничивающим диапазон выносливости на аутэкологическом уровне.

Для геохимических ассоциаций элементов, установленных методом главных компонент (рис. 3), сопряженность с атипичным проявлением морфогенеза выявили группы As–Zr–Sb и V–Mn–Fe по реализации общей патиентной стратегии с характерными признаками для виолентов (олигомеризация и фасциация) и группы Si–Sc–Dy и Mg–Al–P–S–Co–Ni–Cu–Sr–Mo–Cd–Cs–La–Sm–Hg–Pb, связанные с реализацией эксплерентных стратегий (пролификация и дистопия) (рис. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках понимания одного из аспектов учения В.И. Вернадского о концентрационной, средообразующей и информационной функциях биосферы проведена экспертиза природно-техногенных комплексов центрального Донбасса, которые подверглись глубокой антропогенной трансформации. На основании выделенной накопительной способности растений определены сопряженные закономерности в структурно-функциональных изменениях бриобионтов.

Мохообразные в условиях техногенного импакта являются таксономически разнообразной и функционально важной группой организмов. Благодаря выживанию в токсичной и трансформированной среде бриобионты обеспечивают многие процессы первичной сукцессии и подготовки почвенного субстрата для развития видов, имеющих эдификационное значение по макроклиматическим требованиям. В процессе вовлечения бриобионтами особо токсичных элементов в биогеохимические циклы осуществляется как средообразующая, так и концентрационная функции живого вещества. На примере выявленных закономерностей в специфическом строении растений при условии накопления ими отдельных элементов (или ассоциаций элементов) рассмотрено индикационное значение видов, что в частном случае отражает информационную функцию биосферы. Использование растений-индикаторов на сегодня представляет собой способ проведения функционального экологического мониторинга для территории антропогенно трансформированного Донбасса.

Установлено, что при увеличении техногенного загрязнения нарушаются структурно-функциональные параметры растительного организма, которые проявляются во многочисленных хлорозах и некрозах листовой пластинки, а также патологических трансформациях строения тканей до специфического тератообразования на анатомическом уровне развития мохообразных.

Выявленные морфогенетические аномалии являются фитоиндикационной характеристикой при проведении экспресс-оценки уровня техногенного напряжения в полевой диагностике, что существенным образом может скорректировать необходимость проведения химического анализа для многочисленных проб в режимном экологическом мониторинге техногенно трансформированного региона.

Представленные в работе данные – единственный широкомасштабный эксперимент по ингредиентной фитодиагностике локальных геосистем в центральном Донбассе периода 2018–2021 гг.

ВЫВОДЫ

1. С помощью фитоиндикационного эксперимента установлен факт геохимического контраста на территории современного Донбасса. Метод активного биомониторинга позволил объединить весь регион единой программой оценки и выявить локальные характеристики загрязнения отдельными элементами в условиях действия антропогенного фактора.

2. Доказан высокий уровень вовлеченности мхов в биогеохимические циклы миграционных потоков технофильных элементов, что также обеспечивает процессы частичной детоксикации в антропогенно трансформированной среде.

3. Попадая в разные условия произрастания, мхи не только индицируют характер загрязнения конкретными элементами или их группами, но и реализуются в специфических жизненных формах по совокупным реакциям морфогенеза, что соответствует разным стратегиям выживания видов по эксплерентному (переход к специфической спорофитизации и (или) захват территории) или виолентному (консервативный структурный адаптациогенез) сценариям для индуцированных бриопатиентов в ответ на действие факторов химического стресса. Стратегическая переориентация мхов связана с комплексным дисбалансом и тесно коррелирует с установленными геохимическими характеристиками среды по ассоциированным группам элементов.

Выражаем глубокую признательность научному редактору Вадиму Викторовичу Ермакову и рецензентам за внимательное ознакомление с материалами рукописи, корректные замечания, высокий уровень компетентности в освещаемых вопросах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авраимова Т.В., Сафонов А.И. (2023) Экологические разработки в Донбассе: библиографический учет и популяризация научных исследований. *Научные и технические библиотеки*. (3), 30-42.

Алемасова А.С., Сафонов А.И. (2022) Тяжелые металлы в фитосубстратах – индикаторы антропогенного загрязнения воздуха в промышленном регионе. *Лесной вестник. Forestry Bulletin*. **26**(6), 5-13.

Вернадский В.И. (1991) *Научная мысль как планетное явление*. М.: Мысль, 271 с.

Вернадский В.И. (2001) Биосфера: Мысли и наброски. М.: Фонд им. В.И. Вернадского, 244 с.

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*. М.: Изд-во МГУ, 350 с.

Глухов О.З., Сафонов А.І., Хижняк Н.А. (2006) Фітоіндикація металопресингу в антропогенно трансформованому середовищі. Донецьк: Норд-Прес, 360 с.

Государственный комитет по экологической политике и природным ресурсам при Главе Донецкой Народной Республики. URL: https://gkecopoldnr.ru/ (дата обращения 01.03.2023).

Ермаков В.В. (2017). Концепция биогеохимических провинций А.П. Виноградова и её развитие. *Геохимия*. (10), 875-890.

Ermakov V.V. (2017) A.P. Vinogradov's concept of biogeochemical provinces and its development. *Geochem. Int.* **55**(10). 872-886.

Ермаков В.В., Дегтярев А.П., Кречетова Е.В., Тютиков С.Ф., Петрунина Н.С. (2009) Биогеохимические провинции и их эволюция. *Проблемы биогеохимии и геохимической экологии*. **1**(9), 3-21.

Ермаков В.В., Тютиков С.Ф., Данилова В.Н. (2020) Экологический мониторинг Унальской котловины (Республика Северная Осетия-Алания) методами биогеохимической индикации. *Геохимия*. **65**(3), 289-299.

Ermakov V.V., Tyutikov S.F., Danilova V.N. Ecological monitoring of the Unal depression, Northern Ossetiya-Alania, using techniques of biogeochemical indication. *Geochem. Int.* **58**(3), 332-341.

Ермаков В.В., Тютиков С.Ф., Сафонов В.А. (2018) *Биогеохимическая индикация микроэлементозов*. М. 386 с.

Зиньковская И.И., Вергель К.Н., Кравцова А.В., Сафонов А.И. (2022) *Биомониторинговая программа по оценке воздуха в Донбассе с помощью нейтронно-активационного анализа. Донецкие чтения 2022: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности*. Донецк: ДонНУ, 69-71.

Калинина А.В. (2022). Состояние ценопопуляций видов рода *Oenothera* L. в трансформированных экотопах Донбасса. *Лесохозяйственная информация*. (3), 135-144.

Луговская А.Ю., Храмова Е.П., Чанкина О.В. (2018) Влияние транспортно-промышленного загрязнения на морфометрические параметры и элементный состав *Potentilla fruticosa*. *Сибирский экологический журн*. **25**(1), 111-121.

Опекунов А.Ю., Опекунова М.Г., Кукушкин С.Ю., Янсон С.Ю., Арестова И.Ю., Шейнерман Н.А., Спасский В.В., Папян Э.Э., Елсукова Е.Ю. (2021) Минералого-геохимическая характеристика снежного покрова в районах горнорудного производства. *Геохимия*. **66**(7), 659-672.

Opekunov A.Y., Opekunova M.G., Kukushkin S.Y., Yanson S.Y., Arestova I.Y., Sheinerman N.A., Spasskii V.V., Elsukova E.Y., Papyan E.E. (2021) Mineralogical-geochemical characteristics of the snow cover in areas with mining and ore-processing facilities. *Geochem. Int.* **59**(7), 711-724.

Опекунова М.Г. (2016) Биоиндикация загрязнений: учеб. пособие. СПб.: Санкт-Петербургский университет, 300 с.

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.

Сафонов А.И. (2019) Тератогенез растений-индикаторов промышленного Донбасса. *Разнообразие растительного мира*. **1**(1), 4-16.

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.

Тимофеев М.М., Александров С.Н., Черепов В.А., Жеряков А.И., Назарова Л.Г. (1996) *Загрязнение тяжелыми металлами Донецкой области, их судьба в почве, растениях, животных; механизмы действия в биологических объектах*. Донецк: ДИАПП, 72 с.

Уфимцева М.Д. (2015) Закономерности накопления химических элементов высшими растениями и их реакции в аномальных биогеохимических провинциях. *Геохимия*. (5), 450-465.

Ufimtseva M.D. (2015) The patterns in accumulation of chemical elements by higher plants and their responses in biogeochemical provinces. *Geochem. Int.* **53**(5), 441-455.

Янин Е.П. (2022) Из архивного наследия академика В.И. Вернадского. История и судьба сборника "Живое вещество". М.: НП "АРСО", 371 с.

Ah-Peng C., Cardoso A.W., Flores O., West A., Wilding N., Strasberg D., Hedderson T.A.J. (2017). The role of epiphytic bryophytes in interception, storage, and the regulated release of atmospheric moisture in a tropical montane cloud forest. *J. Hydrology*. **548**, 665-673.

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.

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

Bidleman T., Agosta K., Andersson A., Brorström-Lundén E., Haglund P., Hansson K., Laudon H., N. Seth, Olle N.,

Ripszam M., Tysklind M., Wiberg K. (2015) Atmospheric pathways of chlorinated pesticides and natural bromoanisoles in the northern Baltic Sea and its catchment. *AMBIO*. **44**(3), 472-483.

Boch S., Allan E., Humbert J.Y., Kurtogullari Y., Lessard-Therrien M., Müller J., Prati D., Rieder N.S., Arlettaz R., Fischer M. (2018) Direct and indirect effects of land use on bryophytes in grasslands. *Science of the Total Environment*. **644**, 60-67.

Chung J.Y., Yu S.D., Hong Y.S. (2014) Environmental source of arsenic exposure. *J. Prev Med Public Health*. **47**(5), 253-257.

Decker E.L., Reski R. (2020) Mosses in biotechnology. *Current Opinion in Biotechnology*. **61**, 21-27.

Erdős L., Kiss M., Kröel-Dulay G., Molnár Z., Ambarlı D., Anenkhonov O.A., Bátori Z., Tölgyesi C., Cserhalmi D., Liu H., Magnes M., Naqinezhad A., Semenishchenkov Y.A., Török P. (2018) The edge of two worlds: a new review and synthesis on Eurasian Forest-Steppes. *Applied Vegetation Science*. **21**(3), 345-362.

Frontasyeva M., Harmens H., Uzhinskiy A., Chaligava O. and participants of the moss survey. (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, Russian Federation, 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. *Ecol. Eng.* **155**, 105836.

Hristozova G., Marinova S., Motyka O., Svozilík V., Zinicovscaia 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.

Kabata-Pendias A., Pendias H. (2001) *Trace elements in soil and plants*. CRC Press LLC, 413 p.

Khiem L.H., Sera K., Hosokawa T., Nam L.D., Quyet N.H., Frontasyeva M., My T.T.T., My N.T.B., Zinicovscaia I., Nghia N.T., Trung T.D., Hong K.T., Mai N.N., Thang D.V., Son N.A., Thanh T.T., Xayheungsy S. (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.

Koroleva Y., Napreenko M., Baymuratov R., Schefer R. (2020) Bryophytes as a bioindicator for atmospheric deposition in different coastal habitats (a case study in the Russian sector of the Curonian Spit, South-Eastern Baltic). *International J.f Environmental Studies*. **77**(1), 152-162.

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.

Kürschner H. (2004) Life strategies and adaptations in bryophytes from the Near and Middle East. *Turkish J. Botany*. **28**(1), 1-7.

Kürschner H., Frey W. (2012) Life strategies in bryophytes – a prime example for the evolution of functional types. *Nova Hedwigia*. **96**(1–2), 83-116.

Longton R.E. (1988) Life-history strategies among bryophytes of arid regions. *J. Hattori Botanical Laboratory*. **64**, 15-28.

Massante J.C. (2015) Mining disaster: restore habitats now. *Nature*. **528**, 39.

Meena M.K. (2020) Impact of arsenic-polluted groundwater on soil and produce quality: a food chain study. *Environ. Monit. Assess.* 192(12), 785.

Opekunova M.G., Opekunov A.Ju., Papyan E.E., Somov V.V. (2017) Phytoindicational properties of the vegetation in landscape transformation studies on Sibay chalcopyrite deposits (Southern Urals). *Contemporary Problems of Ecology*. **10**(3), 301-314.

Pashentsev D.A., Abramova A.I., Eriashvili N.D., Grimalskaya S.A., Gafurova A.Ya., Kharisova G.M., Karpenko G.V., Avilova V.V. (2019) Digital software of industrial enterprise environmental monitoring. *Ekoloji*. **28**(107), 243-251.

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.

Peng X., Weihao W., Men X., Chen H., Ravishankara A.R., Li Q., Saiz-Lopez A., Liu P., Zhang F., Zhang C., Xue L., Wang X., George C., Wang J., Mu Y., Chen J., Wang T. (2021) An unexpected large continental source of reactive bromine and chlorine with significant impact on wintertime air quality. *National Science Review*. **8**(7), 304.

Quyet N.H., Khiem L.H., My T.T.T., My N.T.B., Frontasieva M., Zinicovscaia I., Son N.A., Thanh T.T., Nam L.D., Hong K.T., Mai N.N., Trung T.D., Thang D.V., Hang N.T.T. (2021). Biomonitoring of chemical element air pollution in hanoi using barbula indica moss. *Environmental Engineering and Management J*. **20**(5), 791-800.

Rimac A., Šegota V., Alegro A., Vuković N., Koletić N. (2022) Croatian freshwater bryoflora-diversity and distribution. *Biodiversity Data J. 10*: e83902.

Safonov A. (2022) Ecological scales of indicator plants in an industrial region. *BIO Web Conf*. **43**, 03002.

Safonov A., Glukhov A. (2021) Ecological phytomonitoring in Donbass using geoinformational analysis. *BIO Web Conf*. **31**, 00020.

Sergeeva A., Zinicovscaia I., Vergel K., Yushin N. (2021) 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.

Shahid M., Ferrand E., Schreck E., Dumat C. (2013) Behavior and impact of zirconium in the soil-plant system: plant uptake and phytotoxicity. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. **221**, 107-127.

Shekoyan S.V., Yeprintsev S.A., Vinogradov P.M., Lepeshkina L.A., Voronin A.A. (2020) Environmental quality assessment of urban areas using geoinformation technologies (on example of the cities of Central Russia). *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. **543**, 012025.

Shi X.-M., Song L., Liu W.-Y., Lu H.-Z., Qi J.-H., Li S., Chen X., Wu J.-F., Liu S., Wu C.-S. (2017) Epiphytic bryophytes as bio-indicators of atmospheric nitrogen deposition

in a subtropical montane cloud forest: Response patterns, mechanism, and critical load. *Environmental Pollution*. **229**, 932-941.

Spangler K. (2021) Bryophyte ecosystem services: how bryophytes impact ecosystem processes and their use in urban systems. *University Honors Theses*, 1042.

Su X., Ding R., Zhuang X. (2020) Characteristics of dust in coal mines in Central North China and its research significance. *ACS Omega*. **5**(16), 9233-9250.

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.

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. *J. Radioanalytical and Nuclear Chemistry.* **325**(3), 807-816.

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. *J. Cleaner Production*. **286**, 125523.

Yuan X., Xue N., Han Z. (2021) A meta-analysis of heavy metals pollution in farmland and urban soils in China over the past 20 years. *J. Environmental Sciences*. **101**, 217-226.

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.

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.

Zanatta F., Engler R., Collart F., Broennimann O., Mateo R.G., Papp B., Muñoz J., Baurain D., Guisan A., Vanderpoorten A. (2020) Bryophytes are predicted to lag behind future climate change despite their high dispersal capacities. *Nature Communications.* **11**(1), 5601.

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.