Опыт фитоиндикационной оценки антропогенных экотопов Донбасса (обзор)

© 2025. А. И. Сафонов, к. б. н., заведующий кафедрой,
Донецкий государственный университет,
283001, Россия, г. Донецк, ул. Университетская, д. 24,
e-mail: andrey_safonov@mail.ru

Современная территория Центрального Донбасса является экологически напряжённым регионом, нуждающимся в разработке научно обоснованных мер по восстановлению и оптимизации нарушенных локальных геосистем. Обзор научных сведений по вопросам фитодиагностики в условиях антропогенной трансформации основан на непосредственном опыте в реализации комплексного экологического мониторинга учёными в Донбассе с указанием успешных практик аналогичных исследований в мировых научных школах. Фитоиндикация рассмотрена как единственно возможный для проведения широкомасштабного эксперимента способ оценки окружающей среды в современных реалиях природных систем Северного Приазовья. Основным механизмом получения сведений о состоянии геосистем основан на выявлении достоверной экотопической разницы в структурно-функциональном статусе растений-индикаторов. Представлен спектр регионально адаптированных и апробированных методов полевой и лабораторной диагностики состояния видов растений с адекватной валентностью к факторам антропогенного стресса, а также способов обработки, интерпретации и визуализации полученных сведений. Фитомониторинг связан со многими вопросами социального благополучия человека: чистоты природных сред, своевременного принятия мер по недопущению катастрофических ситуаций. Специфичность экономико-технологического состояния Донбасса за последние 30 лет является обоснованием для необходимого аналитического обзора накопленного опыта способов и методов квантификации ландшафтов и поводом для обсуждения среди специалистов-экологов в принятии необходимых мер для сохранения уникальной природы и продуктивного развития ресурсного потенциала региона.

Ключевые слова: экологический мониторинг, биодиагностика природных систем, антропогенная трансформация, донецкий регион, растения-индикаторы, полемостресс, фитоквантификация.

A review of phytological assessment of anthropogenic ecotopes in Donbass: a review

© 2025. A. I. Safonov ORCID: 0000-0002-9701-8711,
Donetsk State University,
24, Universitetskaya St., Donetsk, Russia, 283001,
e-mail: andrey_safonov@mail.ru

The modern territory of the Central Donbass is an ecologically stressed region, which requires the development of scientifically based measures for restoration and optimization of disturbed local geosystems. The review of scientific data on phytodiagnosics under anthropogenic transformation is based on the direct experience in the implementation of integrated environmental monitoring by Donbass scientists. The results of successful practices of similar studies in the world scientific schools are specified. Phytoindication is considered as the only possible way of environmental assessment in the current realities of natural systems of the North Azov region for large-scale experiment. The main mechanism of obtaining information on the state of geosystems is based on the identification of reliable ecotope differences in the structural and functional status of indicator plants. The spectrum of regionally adapted and tested methods of field and laboratory diagnostics of the state of plant species with adequate valence to anthropogenic stress factors, as well as methods of processing, interpretation and visualization of the obtained data are presented. As approaches to data analysis, we consider methods of processing quantitative and non-parametric indices, formation of ecological scales, GIS, mapping, identification of localities of pollution of natural environments, identification of new geopathogenic zones, determination of climatic trends and retrospective analysis. The practice of remediation works provides for obligatory procedures of reclamation, phytoremediation, landscape design, taking into account the identified features of adaptation of individual plant species. Phytomonitoring is connected with many issues of the social well-being of mankind: the purity of the natural environment, the timely taking of measures for the prevention of catastrophic situations. Specificity of the economic and technological state of Donbass for the last 30 years is both a justification

for the necessary analytical review of the accumulated experience of ways and methods of landscape quantification, and a reason for discussion among environmental specialists in taking the necessary measures to preserve the unique nature and productive development of resource potential of the region.

Keywords: ecological monitoring, biodiagnostics of natural systems, anthropogenic transformation, Donetsk region, indicator plants, polemostress, phytoquantification.

Территория Центрального Донбасса с 2014 г. является зоной интенсивного антропогенного вмешательства в исторически сформированные балансовые природно-техногенные процессы. Испытывая факторы дополнительного воздействия в результате военных событий, локальные экосистемы в большинстве случаев находятся в деградированном состоянии и нуждаются в научно обоснованных мероприятиях по их восстановлению и рациональному использованию в регионе [1]. Полифункциональность растительных организмов в трансформированных условиях является неотъемлемым звеном технологий нормализации состояния природно-территориальных комплексов [2–4]. В разработке способов по оптимизации нарушенных экосистем должны быть задействованы как теоретические [5–7], так и прикладные [8, 9] подходы, что при совместном их использовании обеспечивает более эффективный результат.

По своему ресурсно-эксплуатационному назначению за последние полтора века Донбасс представляет собой крупный урбанизированный конгломерат техногенных институций (угледобывающая, перерабатывающая промышленность, металлургическое производство и пр.) с развитыми аграрными комплексами и социально-бытовой инфраструктурой [10]. Возникшее в 90-х годах XX века направление фитоиндикационного мониторинга антропогенно трансформированной среды [11, 12] является частью большой программы по изучению и использованию растений в промышленно развитом регионе [13, 14]. Доказано, что фитообъекты в экологическом мониторинге являются информативными датчиками для диагностических процедур и составления экспертных заключений [15, 16].

Целью работы является систематизация апробированных способов и методических подходов фитоиндикационной оценки состояния экотопов с учётом их использования в новых реалиях актуального военного противостояния на территории Центрального Донбасса.

Специфика проведённого информационного обзора заключается в необходимости

систематизации накопленного опыта учёных Донбасса. Актуальность обзора обусловлена важностью привлечения научного сообщества к экологическим проблемам региона, требующего внедрения широкомасштабных инновационных разработок по восстановлению нарушенных природно-техногенных систем.

Ресурс информационно-аналитического контроля

Базой для анализа источников информации является многолетняя работа учёных Донецкого государственного университета в кооперации с ведущими библиографами центральных мест хранения публикаций об экологических проблемах Донбасса. За последние 25 лет (с 1999 г.) было подготовлено пять библиографических указателей «Экология Донбасса» (с 2014 г. – «Экология в ДНР») с систематической рубрикацией имеющихся сведений природоохранного характера, включая разделы по экологическому мониторингу, экспертизе, заповедному делу, технологиям диагностики и учёту рационализаторских предложений по вариантам оценки антропогенно трансформированной среды [17] с помощью растений. Из общего пула более 40 тыс. источников информации были выбраны публикации статей в научных журналах, находящиеся в свободном доступе в информационно-аналитических системах eLIBRARY, КиберЛенинка, Scopus и Web of Science. При выборе объектов цитирования для текущего целевого обзора предпочтения были отданы более информативным публикациям в актуальном разрезе данных за последние 5 лет. В обзоре использованы также публикации учёных, работающих на территориально сопряжённых или производственно сходных объектах квантификации. Следует отметить, что на начало 2014 г. учёными Донецкой области было получено более 150 патентов на изобретения и полезные модели в сфере биодиагностики промышленно напряжённой среды. Однако на сегодня статус этих документов утратил свои действия и рассматривается на перспективу как актуальная задача при от-

крытой с 2025 г. возможности сотрудничества с базами данных Роспатента.

Специфика фитомониторинга

Беспрецедентность мониторинговых программ в Донбассе объяснена рядом специфических обстоятельств, позволяющих за период более 10 лет военных событий реализовать оценочные процедуры для экотопов таким образом, чтобы весь ранее накопленный опыт диагностики факторов техногенеза [11, 13] был полностью востребован при квантификации в зонах, испытывающих прямое и опосредованное воздействие разных форм милитаризованной активности [18].

Во-первых, с 2014 г. Центральный Донбасс более 8 лет находился в зоне социально-гуманитарной и научно-технологической изоляции. В таких условиях были критически ограничены факторы жизнеобеспечения для местного населения и отрезаны внешние материальные коммуникации. Имеющееся диагностическое оборудование морально устарело и не модернизировалось. Проводить полевые исследования стало сложно в связи с производственной вредностью и опасностью.

Во-вторых, к 2021 г. было установлено, что из имеющихся (оставшихся) полномасштабных программ экологического мониторинга Донбасса в реализации осталась только фитоиндикационная экспертиза [17, 19] благодаря своей доступности и энтузиазму учёных, продолжающих проводить ежегодные сборы образцов в полевых условиях, анализировать полученные результаты и внедрять передовые методы аналитического контроля по статистическому учёту и визуализации данных в картографических продуктах [18, 20, 21].

В-третьих, многолетний опыт полевой диагностики и определённая универсальность интерпретации сведений по состоянию открытых ландшафтных комплексов с помощью индикаторных характеристик растений достоверной значимости [22] позволили объединить все результаты, имеющие точную привязку к геолокалитету, в единое геоинформационное поле как прямой аналог базы данных, имеющей территориальную детерминанту [20, 21, 23] с доступной динамикой [22, 24–26] за последние 20–28(30) лет по отдельным фитоиндикационным признакам. Поэтому в Донбассе были предложены к внедрению и апробированы такие способы оценки и методические подходы, которые имеют эксклюзивно региональную специфику, что

и обуславливает необходимость обобщения полученных сведений именно на местах диагностической апробации разрабатываемых технологий.

В результате тесного сотрудничества с аналитическими лабораториями была проведена необходимая идентификация зон геохимического контраста, в том числе атипичного для естественного фона региона даже с учётом имеющихся факторов техногенеза. Специально подготовленные образцы растений были проанализированы атомно-абсорбционным [27–29], нейтронно-активационным [30–33] и масс-спектрометрическим методом с индуктивно связанной плазмой [34].

В качестве принципиально важных, а также идейно и организационно приемлемых принципов осуществления экологического мониторинга в Донбассе был использован опыт передовых научных школ по радиационной биологии и ландшафтоведению [35], медико-социальному мониторингу [36], геоэкологии [37], биогеохимии [38–40], популяционной экологии [41] и фитоценологии [42, 43], почвоведению [44–46], дистанционному зондированию с ГИС-технологиями [47–49] и токсикологии [50, 51] с учётом особенностей развития горнодобывающих регионов [40, 52, 53].

Индикация природных сред

Большинство экологических разработок имеют комплексный характер изучения антропогенно зависимых процессов [2, 8, 9, 35, 40, 46, 54] и затрагивают одновременно несколько средообразующих характеристик [4, 15, 16, 36, 44, 48, 52]. Однако специфика некоторых индикаторных исследований ввиду использования отдельных экологических групп растений имеет прямое сопряжение с конкретной средой обитания организмов, рассматриваемых в качестве мониторинговых сенсоров.

В аспекте проведения аэроэкологического мониторинга в Донбассе были востребованы три направления диагностики: 1) импактный анализ в градиенте антропогенной нагрузки [9, 36, 55], что в первую очередь детерминировано фактором запылённости, интенсификацией эоловых процессов и смещением воздушных масс; 2) ингредиентная идентификация по накоплению отдельных элементов в телах мхов [15, 22, 30] как универсальных индикаторов воздуха при выпадении осадков [23, 33, 56] и осаждении загрязнителей [24, 27, 32, 57]; 3) палинологический анализ воздушных масс

как в контексте угрозы аллергенных атак для населения [58, 59], возможной историко-ботанической экспертизы [12, 21, 60, 61], а также непосредственной индикации местности в результате трансформации пыльцевых зёрен и воздействия на них агрессивных газозооаэрозольных смесей [14, 62, 63]. Результаты палинологического анализа визуализированы на картах для Донбасса [41, 21, 62]. При этом получена информация о пространственном распределении данных, представляющих интерес в вопросах аллергологии, токсикологии, зонирования территории по критериям санитарных норм для воздушной среды региона [19, 22, 26, 63, 64]. Информация о местах с наибольшей концентрацией пыльцевых зёрен в городах Донбасса регулярно предоставляется в местные исполнительные инстанции в первую очередь для принятия мер по регуляции газонокосшения.

Водные ресурсы для обеспечения жизнедеятельности региона по природно-климатической предрасположенности скудны. Степной полуаридный характер естественного гидрообеспечения во многом ограничивает хозяйственную деятельность. Мировые научные школы по изучению фитопланктона [65, 66] открытых водоёмов формируют спектр актуальных задач, которые связаны с детализацией видов водорослей в качестве индикаторов состояния гидросистем. В лабораториях донецких учёных отмечено два ведущих направления ботанико-экологических разработок: 1) анализ биофизических процессов и закономерностей в условиях индустриализации региона [67]; 2) таксономический анализ открытых водоёмов по альгологической составляющей и способы индикации разного характера их загрязнений [68, 69]. Тематика гидрологических исследований существенно расширяется в связи с государственными запросами по восстановлению экосистем Азовского моря.

Спектр прикладных задач изучения и оценки почвенных сред включает два принципиально разных, но методически сопряжённых процесса: 1) установление характеристик эдафических горизонтов в условиях интенсификации техногенеза [4, 39, 70–72]; 2) определение качества почв сельскохозяйственного назначения [2, 38, 73, 74] и внедрение технологий по их улучшению [1, 40, 44]. Целевые исследования токсичности почвенных образцов, взятых в местах боевых сражений, не всегда имеют подтверждение достоверных отличий от природного геохимического фона [75], однако деградативные процессы в до-

нецких агрочернозёмах за период военных событий не вызывают сомнений у специалистов [76, 77]. Реализованная фитокавалитетрия факторов антропогенеза в Донбассе [14, 19, 22, 24] во многом касается и получения сведений о состоянии механического нарушения [13, 23, 25] или специфического загрязнения именно почвенных горизонтов [34, 78, 79].

Одной из наиболее интенсивно развивающихся научных тематик в донецком регионе является дендроиндикационная: способы и методы проведения вибрационно-акустических экспертиз [80], в том числе для ретроспективного анализа [81, 82] и определения механической устойчивости макрообъектов ландшафтной архитектуры в городской среде [83, 84]. В этой же связи получены интегральные сведения о локальных факторах микроклимата [85] и экологической пластичности фанерофитов [86, 87]. В ранневесенний период дендроэкологический мониторинг [88] тесно сопряжён с палинологическими исследованиями [27, 62, 63].

Индикационная ботаника [13] неотъемлемым образом формируется в рамках этноэкологического контура [89] и традиционных представлений о краеведении. При этом важную ценность представляют собой архивы природных артефактов, позволяющие проводить сравнительный анализ и оценивать таксономическое богатство. Наиболее распространённым примером наглядной комплектации и хранения натуральных данных является гербаризация [90, 91], способы использования которой являются базой для экологического мониторинга. Подтверждённый структурный консерватизм семенного материала [41, 92] может быть полезен в диагностических целях проводимой оценки состояния экотопов в условиях антропогенной трансформации [14, 21, 25]. Для всех указанных способов получения сведений о состоянии природно-территориальных комплексов посредством фитомониторинговых программ целесообразным является внедрение результатов в образовательный процесс [17, 93] как методический и дидактический ресурс при подготовке специалистов в области оценки окружающей среды и нормирования антропогенных воздействий.

Фитоиндикация факторов полевостресса

Антропогенная трансформация природных сред неизбежно обуславливает про-

явление их генотоксичности [94] и повышает уровень канцерогенного риска в первую очередь на урбанизированных территориях [95]. Доказано значительное увеличение мутагенных эффектов для участников Первой мировой войны [96], что не исключает прямых и отдалённых последствий для человеческой популяции в будущем. Растения, отличающиеся морфогенетической пластичностью в контексте индикаторной значимости [23, 33], испытывают факторы специфического и неспецифического стресса при возникновении неопатогенных участков [18, 19]. При таких обстоятельствах в Донбассе разработана методика идентификации, регистрации и учёта тератоморф (фитопатологий, аномалий) [97, 98] в сопряжении с установленными фактами, вызывающими дисбаланс в экосистемах [97, 99]. Первые пространственно-территориальные закономерности были обозначены по тератологическим эффектам в пылевых зёрнах индикаторных видов растений [24, 97, 98, 100].

Подход к диагностической процедуре по факту воздействия стрессовых условий [101, 102] является универсальным. Его интерпретация в эволюционных преобразованиях [103] и эпигенетических векторах [104] выводит проведение экологических исследований в специфических условиях на уровень открытых экспериментальных площадок резких структурно-функциональных преобразований [105], в том числе в связи с глобальными процессами трансформации климата [106]. Для корректного описания ситуации за основу был взят термин «полемохоры» [107, 108]. Появляющиеся новые признаки состояния растений-индикаторов [22] в неконфликтных зонах предложено называть «полемострессовыми» [18]. Высказано предположение, что в условиях полемостресса [19] на территории Центрального Донбасса [109] стратегии выживания видов [110] на разных структурных уровнях организации материи могут приобретать новые адаптационные возможности [33, 111], – это обеспечивает интенсификацию микроэволюционных процессов у видов с широкой экологической амплитудой. В качестве ориентации на методы и способы определения стратегий выживания видов были взяты примеры из экологической географии растений [112, 113].

Необходимость введения в научно-практический оборот термина «полемостресс» (для отличия от общего понятия «стресс») обусловлена эмпирически [19]. Доказано, что в местах непосредственных военных событий

растения-индикаторы проявляют такой уровень и специфику атипичного полиморфизма [22], которые не были зарегистрированы в предшествующие 20 лет наблюдений в условиях интенсивной индустриализации Донбасса. Характер структурных деградативных процессов в тест-организмах при воздействии факторов техногенеза затрагивает в первую очередь барьерные ткани и точки роста в межфазных переходах «окружающая среда – растение», при этом опытным путём выстраивается грация степени выраженности гетерогенности для формирования равноинтервальных экологических шкал [78]. В то же время, регистрируемые случаи терат в местах полемостресса [18, 19, 93] констатируют резкий качественный переход в конформации эмбриональных структур (в частности, семязачатков и семядольного аппарата) к элиминации отдельных групп клеток или тканей, что полностью парализует полноценное развитие семенного материала. Этот факт свидетельствует о появлении в последние годы таких факторов, природа которых до 2014 г. не проявлялась на территории Центрального Донбасса.

Большое количество табличных значений по характеристикам экотопов и показателям функционального статуса индикаторных растений [26], геофизическим и геохимическим параметрам [30, 33], пройдя первичные процедуры определения достоверности в своих численных выражениях, было подвергнуто обработке методами вторичной математической статистики: корреляционному и кластерному анализу [23, 30, 34, 98], методу главных компонент [114], способам восстановления пропущенных данных [115] и многофункциональному картографическому анализу [18, 20, 22] геоинформационного поля [21, 24] при выявлении информативных критериев диагностики. Для формирования аддитивных экологических шкал [78] и последующего корреляционного анализа [27, 30, 32] реализована процедура фитоквантификации – специального перерасчёта в том числе всех качественных структурно-функциональных признаков диагностики в их численные эквиваленты.

Выполняемые учёными Донбасса научные темы по ресурсным оценкам природной флоры региона [116, 117] существенным образом обеспечивают на практике локальные оптимизационные эффекты при озеленении мест высоких техногенных трансформаций [88, 109, 118]. При этом тематика фиторемедиационных способов восстановления нарушенных

Таблица / Table

Реализованные проекты биодиагностики экосистем Донбасса с использованием растений
Implemented projects of Donbass ecosystems biodiagnostics using plants

Апробированные способы, методические приёмы Proven methods and methodological techniques	Масштаб апробации / Scale of testing		
	начальная стадия разработки initial stage of development	единичные эксперименты single experiments	полномасштабное внедрение full-scale implementation
Выявление индикационной структурной пластичности растений / Detection of indicative structural plasticity of plants	[14, 22, 25, 98]	[11, 18, 33, 78, 81, 86, 109]	[20, 30, 97, 121]
Технология фитоквантификации на примере шкалообразования / Phytoquantification technology using scale formation as an example	[13, 14, 25, 85, 97, 114]	[12, 20, 30, 100]	[24, 78, 121]
Корреляционный анализ индикационной значимости / Correlation analysis of indication significance	[19, 30, 33, 121]	[22, 26, 27, 115]	[23, 34, 114]
Картографические методы, ГИС / Cartographic methods, GIS	[11, 21]	[20, 23, 30]	[18, 22, 121]
Идентификация новых геопатогенных зон (биогеохимические критерии) / New geopathogenic zones identification (biogeochemical criteria)	[12, 19, 32, 99]	[18, 26, 30, 34, 75]	[22, 23, 121]
Анализ геопатогенных зон (акустические критерии) / Geopathogenic zones analysis (acoustic criteria)	[81, 83]	[85]	[80]
Определение генотоксичности природных сред, тератология / Determination of genotoxicity of natural environments, teratology	[18, 24, 93, 111]	[22, 26, 33, 99, 121]	[30, 34, 97, 98]
Оценка качества воздуха (палинологические критерии) / Air quality assessment (palynological criteria)	[13, 21, 25, 30, 81]	[12, 23, 26, 33, 63]	[27, 62, 100, 121]
Оценка качества водной среды (альгологические критерии) / Assessment of the aquatic environment quality (algological criteria)	[67]	[68, 121]	[69]
Оценка фитотоксичности эдафических субстратов / Assessment of edaphic substrates phytotoxicity	[13, 21, 25, 75, 79]	[11, 23, 26, 76, 77]	[34, 121]
Способы рекультивации и озеленения / Methods of reclamation and landscaping	[12, 25, 81]	[34, 76, 77, 121]	–
Дендрохронология и механическая устойчивость фанерофитов / Dendrochronology and phanerophytes mechanical stability	[27, 63, 80, 111]	[81, 85, 87]	[83, 84, 88]
Установление микrokлиматических тенденций / Establishment of microclimatic trends	[26, 27, 63, 121]	[13, 69, 99]	[85, 87]
Ретроспективный анализ / Retrospective analysis	[12, 30, 88, 109]	[18, 80, 85, 121]	[22, 23, 24]
Дидактическая функция, введение в образовательный процесс / Didactic function and introduction to the educational process	[17, 90]	[99]	[93, 121]
Фундаментальные вопросы (механизмы адаптации, эволюция видов) / Fundamental questions (mechanisms of adaptation and evolution of species)	[12, 32, 78, 82]	[19, 33, 34, 84, 98, 110, 121]	[109, 111]
Ландшафтный дизайн и территориальное планирование / Landscape design and territorial planning	[14, 81]	[13, 118, 121]	[116, 117]

Примечание: прочерк обозначает, что полномасштабных работ по этому критерию проведено не было.
Note: a dash indicates that no full-scale work has been carried out on this criterion.

экотопов является ключевой для мировых научных экологических школ [71, 79, 119, 120].

Аспекты фитоиндикационного мониторинга, проводимого в Донбассе за последние 30 лет, были иллюстративно представлены в отдельном издании [121], что также интегрирует многие научно-технические задачи по оценке и возможной коррекции экологической ситуации в регионе.

На основании накопленного эмпирического материала и реализованных исследовательских программ была составлена итоговая таблица (табл.) с дифференциацией по уровню внедрения отдельных методических подходов в систему фитоиндикационной оценки экотопов.

Период целенаправленных фитоиндикационных исследований в Донбассе 1995–2002 гг. условно можно рассматривать как стартовый. С 2003 г. по 2013 г. – время накопления опыта по выявлению фактов высокого и недопустимого уровней техногенной нагрузки. С 2014 г. по настоящее время – период изучения полевострессовых проявлений для многоаспектного экологического мониторинга.

Наиболее значимыми в фитоиндикации выделены группы признаков морфологического тератогенеза [22, 97, 98], которые в отдельности при проведении экспресс-анализа или в комплексе с другими признаками физиологического статуса растений [32, 109] указывают на неблагоприятную ситуацию в конкретном геолокалитете [114, 121]. При этом рассматривались структурные аномалии общей архитектоники побегообразования [22, 24, 78, 97], трихом и устьичного аппарата [14, 24, 25, 78], пыльцевых зёрен [21, 62, 63, 98, 100], строения цветков и соцветий [18, 20, 78, 97, 99], семян и плодов [14, 21, 22, 26, 98] индикаторных видов растений. Большинство исследований довоенного периода относится к способу пассивного экологического мониторинга [11, 13, 93], при котором используются уже произрастающие на разных учётных площадках виды. Накопленные к 2014 г. сведения создали возможность для более детального проведения диагностических процедур методом активного мониторинга [12, 19, 23, 115] – наблюдения за развитием в разных учётных площадках тест-организмов [22, 30, 109], имеющих изначально единую ценопопуляционную принадлежность. Сбор для дальнейшего распространения элементов диссеминации во все узловые точки мониторинга осуществлялся в одном локалитете условного контроля [23, 32, 33, 121]. Это позволило нивелировать субпопуляционную

гетерогенность отдельных видов растений [32, 98, 121]. Специальные наблюдения за формированием индикаторных признаков в первом и последующих поколениях позволяют констатировать фенотипическую природу описанных структурных аномалий [33, 109]. Для идентификации возможного наследуемого мутационного процесса требуется более продолжительное наблюдение и специальное высокоточное оборудование.

Обнаружение геопатогенных территорий [23, 121] в полевых условиях сначала осуществляется благодаря регистрации нетипичных проявлений в структурах индикаторных видов растений. Следующим этапом является камеральная обработка материала и статистический учёт частоты встречаемости конкретного признака. Радикальным образом изменилась общая доказательная база полученных сведений, когда учёт большинства признаков был визуализирован в картографическом эквиваленте [18, 26, 100] с коррелирующими закономерностями локализации процессов техногенеза [22, 30] и антропогенной трансформации экотопов в целом [24, 121].

Обобщив данные о состоянии экотопов [12, 19, 22, 23, 30, 34, 93, 98, 109, 121], можно констатировать, что более 85% территории Центрального Донбасса находятся в деградированном состоянии, из них более 40% – в критически трансформированном. Хозяйственно полезным направлением неотложной восстановительной работы целесообразно считать фиторемедиационные технологии с учётом успешных практик и мирового опыта [1, 4, 16, 39, 52, 118, 119, 122–124]. Важным элементом перспективных исследований является анализ механизмов адаптации растений, в том числе на основании сведений о меняющихся стратегиях выживания видов в условиях неспецифического стресса [125].

Понимая проблему ландшафтной индикации изнутри (табл.) и подводя промежуточные итоги проведённых исследований, наиболее перспективными и желательными для реализации в будущем при комплексном подходе квантификации необходимо считать следующие направления разработок: 1) оценка актуального таксономического разнообразия антропогенно изменённых экотопов (с особым вниманием к эдификаторам и ремедиантам), разработка созологических механизмов сохранения природных ресурсов; 2) вовлечение в исследования большего количества таксонов, включая объекты микро-

биологического анализа; 3) необходимость детализации установленных тенденций организации живой материи в изменённых экосистемах на субклеточном и молекулярном уровнях, проведения учёта специфики наследования фитоиндикационных признаков; 4) цифровизация получаемого иллюстративного материала (макро- и микроструктур), в том числе патологических проявлений, тератных форм, гербарных образцов при обеспечении условий их сохранности; 5) рассмотрение всего пула значимых критериев в единой информационно-аналитической системе с возможностью визуализации и моделирования при включении в территориально сопряжённые естественно-климатические программы наблюдений и оценки хозяйственной деятельности человека на глобальном уровне.

Заключение

К настоящему времени в Донбассе сформировано научно-практическое направление по использованию растительных организмов для диагностики неблагоприятных факторов окружающей среды. За 30-летний период в лабораториях Донецкого государственного университета в тесном сотрудничестве с учёными Донецкого ботанического сада, Объединённого института ядерных исследований и Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН были разработаны десятки методических подходов и способов оценки антропогенно напряжённых геосистем Северного Приазовья. За этот период несколько раз радикально менялась концепция и стратегия хозяйственного функционирования региона, поскольку в разные годы наблюдался как существенный рост экологизации промышленности, так и беспрецедентная стагнация всего горнодобывающего и металлургического комплексов.

В качестве основных принципиально важных достижений фитоиндикационного содержания отмечены следующие: 1) на всей доступной для анализа территории созданы 113 мониторинговых точек (учётных площадок), позволяющих в совокупности своих локалитетов создать геодезию цифрового поля с более чем 3 млн узловых значений в каждом слое; 2) получены ежегодные сведения о статусе и ингредиентном составе индикаторных групп растений для возможного выявления динамики изменения экотопов, проведения ретроспективного анализа и организации

краткосрочных прогнозных сценариев; 3) регионально адаптированы методы структурно-функциональной ботаники для сбора информации мониторингового значения: цитопалинологические, эмбрио-карпологические, а также методов онтогенетических и архитектурных экспертиз для 176 видов цветковых растений и 56 видов мохообразных; 4) внедрены методы математической статистики для установления достоверности первичных данных и определения корреляций между массивами параметрических сведений в результате квантификационных манипуляций, что даёт возможность оперативно обрабатывать имеющуюся цифровую информацию и определять устойчивые тенденции изменений состояния экотопов. В системе визуализации всей исследуемой территории получено более 400 картографических изображений, большинство из которых опубликовано в специализированной научной литературе и представлено в органы исполнительной власти экологического профиля.

По результатам детального мониторинга в Центральном Донбассе необходимо констатировать высокий уровень контрастности геопатогенных локалитетов (включая многочисленные результаты накопленного вреда) на фоне стремящейся к самосохранению и восстановлению дикой природы – в объектах природно-заповедного фонда. Эталонные участки природно-территориальных комплексов, сохранившие в первую очередь естественный растительный покров, выступают своего рода рефугиумами не только для проведения сравнительных оценочных заключений, но и как ресурсный запас прочности для восстановительных и оптимизационных работ в глубоко нарушенных экотопах.

Работа подготовлена в рамках научной темы «Диагностика и механизмы адаптации природных и антропогенно-трансформированных экосистем Донбасса». № ПТНИ 1023110700153-4-1.6.19;1.6.11;1.6.12; № гос. учёта 124051400023-4.

References

1. Ashikhmina T. Ya., Domracheva L.I., Pogorelsky I.P., Leschenko A.A., Mironina A. Yu., Lobastov V.S., Senkin A.V. Bioremediation of technogenically degraded lands after the completion of a special military operation on the territory of new subjects of the Russian Federation // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 2. P. 209–217 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-2-209-217

2. Sorrentino M.C., Giordano S., Spagnuolo V. Phytomonitoring and phytoremediation of environmental pollutants // *Plants*. 2024. V. 13. No. 3. Article No. 366. doi: 10.3390/plants13030366
3. Vantarová K.H., Bartha S., Biurrun I., Šibik J., Valachovič M. Plant communities in changing environment // *Biologia*. 2024. V. 79. No. 4. P. 1075–1079. doi: 10.1007/s11756-024-01661-1
4. Ivanisova N.V., Kurinskaya L.V., Kolesnikov S.I. Invasion processes in plant communities in the aspect of the landscape anthropogenization // *Proceedings of the 19th International Scientific GeoConference – SGEM 2019*. Vienna: STEF92 Technology LLC, 2019. P. 373–380. doi: 10.5593/sgem2019V/1.4/S03.046
5. Rozenberg G.S., Zinchenko T.D., Rozenberg A.G. Hierarchy of ecological homeostasis as a principle of systemology // *Biol. Bull. Russ. Acad. Sci.* 2023. V. 50. No. S1. P. S109–S117. doi: 10.1134/s1062359023601271
6. Belyakov A.M., Koshelev A.V. Manifestation of degradation processes in agricultural landscapes of the dry-steppe zone in Volgograd oblast // *Arid Ecosyst.* 2023. V. 13. No. 1. P. 105–114. doi: 10.1134/S207909612301002X
7. Zakharov V.M., Trofimov I.E. Homeostatic mechanisms of biological systems: prolegomena // *Biol. Bull. Russ. Acad. Sci.* 2023. V. 50. No. S1. P. S1–S6. doi: 10.1134/s1062359023601192
8. Shirokikh I.G., Bokov N.A., Dabakh E.V., Kondakova L.V., Shirokikh A.A., Ashikhmina T.Ya. Prokaryotic communities during the self-overgrowing of a chemical industry waste storage facility // *Contemp. Probl. Ecol.* 2024. V. 17. No. 2. P. 303–313. doi: 10.1134/S1995425524020112
9. Yeprintsev S., Kurolap S., Klepikov O., Vinogradov P. Remote monitoring of factors determining the environmental safety of urban areas // *E3S Web of Conferences*. 2023. V. 389. Article No. 03030. doi: 10.1051/e3sconf/202338903030
10. Zagornaya T.O., Treshchevsky Yu.I., Dolbnya N.V. Institutional support for the development of the Donbas: a retrospective analysis performed upon the inclusion of the region into the Russian Federation // *Proceedings of Voronezh State University. Series: Economics and Management*. 2023. No. 4. P. 46–59. doi: 10.17308/econ.2023.4/11685
11. Glukhov A.Z., Safonov A.I. The perspective of conducting phytomonitoring of technogenically transformed ecotopes // *Industrial Botany*. 2002. V. 2. P. 7–14 (in Russian).
12. Glukhov A.Z., Safonov A.I. Phytomonitoring concept for anthropogenically disturbed regions // *Scientific research of the SCO countries: synergy and integration: proceedings of the International conference. Part 1*. Beijing: Scientific publishing house Infinity, 2024. P. 96–104. doi: 10.34660/INF.2024.87.72.160
13. Safonov A., Glukhov A. Phytomonitoring of an anthropogenically altered environment: formalization of terminology and implementation in practice // *Bulletin of Donetsk National University. Series A. Natural Sciences*. 2023. No. 3. P. 62–70 (in Russian).
14. Safonov A.I. Phyto-qualitymetry of toxic pressure and the degree of ecotopes transformation in Donetsk region // *Problems of Ecology and Nature Protection of Technogenic Region*. 2013. No. 1. P. 52–59.
15. Świsłowski P., Waclawek S., Antos V., Zinicovskaia I., Rajfur M., Waclawek M. One year of active moss biomonitoring in the identification of PAHs in an urbanized area – prospects and implications // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2024. V. 31. P. 38416–38427. doi: 10.1007/s11356-024-33831-8
16. Bezel' V.S., Zhuikova T.V., Gordeeva V.A., Goloushkina E.V. Biogeochemistry of impact regions: the role of edaphic and phytocoenotic environmental factors // *Geochem. Int.* 2020. V. 58. No. 10. P. 1135–1144. doi: 10.1134/S0016702920100043
17. Avraimova T.V., Safonov A.I. Ecological developments in Donbass: Bibliographic control and promotion of research // *Scientific and Technical Libraries*. 2023. No. 3. P. 30–42 (in Russian). doi: 10.33186/1027-3689-2023-3-30-42
18. Germonova E.A., Safonov A.I. Detailing the results of phytomonitoring of polemostress in Donbass using GIS technologies // *Problems of ecology and nature protection of technogenic region*. 2024. No. 1. P. 8–14 (in Russian).
19. Safonov A.I. Plants under industrial and military stress (polemostress) // *Practice Oriented Science: UAE – RUSSIA – INDIA: proceedings of the International University Scientific Forum. Part 2*. UAE: Scientific publishing house Infinity, 2023. P. 64–72. doi: 10.34660/INF.2023.25.85.227
20. Safonov A.I., Germonova E.A. Macromarkers of landscape transformations in Donbass: analysis of cartographic material // *Bulletin of Donetsk National University. Series A. Natural Sciences*. 2023. No. 4. P. 68–75 (in Russian).
21. Safonov A., Glukhov A. Ecological phytomonitoring in Donbass using geoinformational analysis // *BIO Web Conf.* 2021. V. 31. Article No. 00020. doi: 10.1051/bioconf/20213100020
22. Safonov A. Assessing landscape disturbance in Donbass using phytomonitoring data // *BIO Web Conf.* 2024. V. 126. Article No. 01031. doi: 10.1051/bioconf/202412601031
23. Zinicovskaia I.I., Safonov A.I., Yushin N.S., Nespirnyi V.N., Germonova E.A. Phytomonitoring in Donbass for identifying new geochemical anomalies // *Russ. J. Gen. Chem.* 2024. V. 94. No. 13. P. 3472–3482. doi: 10.1134/S1070363224130048
24. Safonov A.I., Germonova E.A. Dynamics of phytomonitoring indicators based on cartographic data in Donbass (2013–2023) // *Problems of ecology and nature protection of technogenic region*. 2023. No. 4. P. 6–17 (in Russian).

25. Safonov A.I. Phytointicational monitoring in Donetsk // World Ecology Journal. 2016. V. 6. No. 4. P. 59–71.
26. Safonov A.I. Dynamics of phytomonitoring indicators of anthropotechnogenesis in the Donbass (2000–2019) // Problems of ecology and nature protection of technogenic region. 2020. No. 1–2. P. 31–36 (in Russian).
27. Alemasova A.S., Safonov A.I. Heavy metals in phytosubstrates as indicators of anthropogenic air pollution in industrial region // Forestry Bulletin. 2022. V. 26. No. 6. P. 5–13 (in Russian). doi: 10.18698/2542-1468-2022-6-5-13
28. Alemasova A.S., Shevchuk I.A., Shchepina N.D., Moreva V.V. Complex-forming modifiers in atomic-absorption determination of heavy metals in table waters // Zavodskaya Laboratoriya. 1996. V. 62. No. 12. P. 21–23 (In Russian).
29. Lugovyy K.S., Buhay O.M., Alemasova A.S. Lead and cadmium atomic absorption determination in solid carbonized food samples using flame-furnace atomizer // Cent. Eur. J. Chem. 2014. V. 12. No. 3. P. 386–390. doi: 10.2478/s11532-013-0381-6
30. Zinicovscaia I., Safonov A., Kravtsova A., Chaligava O., Germonova E. Neutron activation analysis of rare earth elements (Sc, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Dy, Yb) in the diagnosis of ecosystems of Donbass // Phys. Part. Nuclei Lett. 2024. V. 21. No. 2. P. 186–200. doi: 10.1134/S1547477124020158
31. Turdiev S., Zinicovscaia I., Vergel K., Yushin N., Chaligava O., Grozdov D. Determination of elemental composition of soils collected near waste incineration plants in Moscow using neutron activation analysis // Phys. Part. Nuclei Lett. 2024. V. 21. No. 1. P. 73–78. doi: 10.1134/S1547477124010126
32. Zinicovscaia I.I., Vergel K.N., Safonov A.I., Yushin N.S., Kravtsova A.V., Chaligava O. Using moss *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid for assessing the technogenic pollution (Ni, Zn, Mn, Al, Se, Cs, La, and Sm) of transformed ecotopes of Donbass // Ecosystem Transformation. 2023. V. 6. No. 3. P. 22–38. doi: 10.23859/estr-220726
33. Safonov A.I., Alemasova A.S., Zinicovscaia I.I., Vergel K.N., Yushin N.S., Kravtsova A.V., Chaligava O. Morphogenetic abnormalities of bryobionts in geochemically contrasting conditions of Donbass // Geochem. Int. 2023. V. 61. No. 10. P. 1036–1047. doi: 10.1134/s0016702923100117
34. Safonov A.I., Dogadkin D.N., Nesporny V.N. Phytogeochemical features of some coal mine dumps in the Donbass // Bulletin of Donetsk National University. Series A. Natural Sciences. 2024. No. 3. P. 86–99 (in Russian). doi: 10.5281/zenodo.13758560
35. Panidi E., Sokolova J., Trofimetz L. Application of phyto-indication and radiocesium indicative methods for microrelief mapping // Earth and Environmental Science: proceedings of the 9th symposium of the international society for digital earth. Halifax, NS, 2016. Article No. 012024. doi: 10.1088/1755-1315/34/1/012024
36. Yeprintsev S.A., Klepikov O.V., Shekoyan S.V., Zhigulina E.V. Study of the impact of social and environmental factors on the spread of coronavirus infection in Russian regions // Ecology and safety in the technosphere: current problems and solutions: proceedings of the All-Russian research-to-practice conference. IOP Publishing Ltd., 2021. V. 688. Article No. 012007. doi: 10.1088/1755-1315/688/1/012007
37. Wu J. Landscape sustainability science (II): core questions and key approaches // Landscape Ecol. 2021. V. 36. P. 2453–2485. doi: 10.1007/s10980-021-01245-3
38. Ermakov V., Bech J., Gulyaeva U., Tyutikov S., Safonov V., Danilova V., Roca N. Relationship of the mobile forms of calcium and strontium in soils with their accumulation in meadow plants in the area of Kashin-Beck endemia // Environ. Geochem. Health. 2020. V. 42. No. 1. P. 159–171. doi: 10.1007/s10653-019-00323-5
39. 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. 2020. V. 58. No. 3. P. 332–341. doi: 10.1134/S0016702920030040
40. Opekunov A.Y., Opekunova M.G., Janson S.Y., Bychinskii V.A., Somov V.V., Kukushkin S.Y., Papyan E.E. Mineral and geochemical characteristics of soils and bottom sediments in the area affected by mining dumps (a case study of the Sibay ore deposit) // Earth and Environmental Science: proceedings of the 9th International Symposium on Steppes of Northern Eurasia. Orenburg, 2021. Article No. 012078. doi: 10.1088/1755-1315/817/1/012078
41. Logofet D.O., Kazantseva E.S., Onipchenko V.G. Seed bank as a persistent problem in matrix population models: From uncertainty to certain bounds // Ecological Modelling. 2020. V. 438. Article No. 109284. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2020.109284
42. Kupreev V.E., Semenishchenkov Yu.A. The survey of the psammophylous grass vegetation syntaxa in the Southern Nechernozemye of Russia // Vegetation of Russia. 2022. No. 45. P. 39–73 (in Russian). doi: 10.31111/vegrus/2022.45.39
43. Grigorjevskaya A.Y., Vladimirov D.R., Podobed E.A., Subbotin A.S., Miroshnikova A.A. Perspective steppe protected areas of the Central Chernozem region of Russia (a case study of Voronezh oblast) // Earth and Environmental Science: proceedings of the 9th International Symposium on Steppes of Northern Eurasia. Orenburg, 2021. Article No. 012038. doi: 10.1088/1755-1315/817/1/012038
44. Ruseva A., Minnikova T.V., Kolesnikov S.I., Revina S.V., Trushkov A. Ecological state of Haplic Chernozem after pollution by oil at different levels and remediation by biochar // Sustainability. 2023. V. 15. No. 18. Article No. 13375. doi: 10.3390/su151813375
45. Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Val'kov V.F., Ponomareva S.V. Ranking of chemical elements according to their ecological hazard for soil // Russ. Agricult. Sci. 2010. V. 36. No. 1. P. 32–34. doi: 10.3103/S1068367410010106

46. Zhao F., Meng Z., Ren X., Dang X., Shi S., Li P., Ding H., Guo J. Changes in plant-soil synergistic patterns along grassland degradation gradients in northern China // *Front. Environ. Sci.* 2024. V. 12. Article No. 1398726. doi: 10.3389/fenvs.2024.1398726
47. Adamovich T.A., Domnina E.A., Timonov A.S., Rutman V.V., Ashikhmina T.Ya. Methodological techniques for identifying plant communities based on Earth remote sensing data and field research // *Theoretical and Applied Ecology.* 2019. No. 2. P. 39–43. doi: 10.25750/1995-4301-2019-2-039-043
48. Kut'yavina T.I., Rutman V.V., Ashikhmina T.Ya. Using digital maps to identify areas of mass development of phytoplankton in small freshwater reservoirs // *Theoretical and Applied Ecology.* 2022. No. 2. P. 35–41. doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-035-041
49. Vergel K., Zinicovscaia I., Yushin N., Gundorina S. Assessment of atmospheric deposition in Central Russia using moss biomonitors, neutron activation analysis and GIS technologies // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2020. V. 325. No. 3. P. 807–816. doi: 10.1007/s10967-020-07234-1
50. Kolesnikov S.I., Minnikova T.V., Tsepina N.I., Evstegneeva N.A., Timoshenko A.N. Assessment of the ecotoxicity of Ag, Bi, Te and Tl according to the biological indicators of Haplic Chernozem // *Appl. Sci.* 2022. V. 12. No. 24. Article No. 12854. doi: 10.3390/app122412854
51. Yu L., Chen S., Wang J., Qin L., Sun X., Zhang X., Wang M. Environmental risk thresholds and prediction models of Cd in Chinese agricultural soils // *Sci. Total Environ.* 2024. V. 906. Article No. 167773. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.167773
52. Opekunova M.G., Somov V.V., Opekunov A.Ju., Mitrofanova E.S. Environmental geochemistry of mining landscapes on sibajskij chalcopryrite deposits (southern Urals) // *Ecology, economics, education and legislation: proceedings of the 16th international multidisciplinary scientific GeoConference.* Sofia: STEF92 Technology Ltd., 2016. V. 2. P. 303–310. doi: 10.5593/SGEM2016/B52/S20.039
53. Xie H., Shi Y., Wang L., Yan H., Ci M., Wang Z., Chen Y. Source and risk assessment of heavy metals in mining-affected areas in Jiangxi Province, China, based on Monte Carlo simulation // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2024. V. 31. No. 14. P. 21765–21780. doi: 10.1007/s11356-024-32554-0
54. Ermakov V., Safonov V., Dogadkin D. Characteristic features of molybdenum, copper, tungsten and rhenium accumulation in the environment // *Innov. Infrastruct. Solut.* 2021. V. 6. No. 2. Article No. 104. doi: 10.1007/s41062-021-00481-5
55. Ashikhmina T.Ya., Kantor G.Ya., Timonov A.S., Domnina E.A., Dabakh E.V., Syrchina N.V., Kondakova L.V., Kut'yavina T.I., Skugoreva S.G., Ogorodnikova S.Yu., Rutman V.V., Kuznetsov D.A. Atmospheric air monitoring in the area of enterprises for the disposal of hazardous industrial waste // *Theoretical and Applied Ecology.* 2023. No. 1. P. 38–46 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-1-038-046
56. Nurkassimova M., Omarova N., Zinicovscaia I., Yushin N., Chaligava O. Mosses as bioindicators of air pollution with potentially toxic elements in the Burabay State National Natural Park, Kazakhstan // *Environ. Monit. Assess.* 2024. V. 196. Article No. 442. doi: 10.1007/s10661-024-12602-5
57. Zinicovscaia I., Narmandakh Ja., Yushin N., Peshkova A., Chaligava O., Tsendsuren T.O., Tserendorj B., Tsogbadrakh T. Assessment of air pollution in Ulaanbaatar using the moss bag technique // *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 2024. V. 86. No. 2. P. 152–164. doi: 10.1007/s00244-024-01050-4
58. Vasilevskaya N. Pollution of the environment and pollen: a review // *Stresses.* 2022. V. 2. No. 4. P. 515–530. doi: 10.3390/stresses2040035
59. Nosova M.B., Lisitsyna O.V., Volkova O.A., Severova E.E. Variations in pollen deposition of the main taxa forming the land cover along a NW–SE transect in European Russia: results of a ten year Tauber trap monitoring period // *Veget. Hist. Archaeobot.* 2020. V. 29. No. 6. P. 699–716. doi: 10.1007/s00334-020-00775-1
60. Volkova O., Severova E. A comparison of modern pollen rain collected by Hirst type and Tauber traps in Moscow, Russia // *Ecol. Quest.* 2017. V. 26. P. 15–17. doi: 10.12775/EQ.2017.010
61. Krinitsina A.A., Omelchenko D.O., Kasianov A.S., Karaseva V.S., Selezneva Yu.M., Chesnokova O.V., Shirobokov V.A., Polevova S.V., Severova E.E. Aerobiological monitoring and metabarcoding of grass pollen // *Plants.* 2023. V. 12. No. 12. Article No. 2351. doi: 10.3390/plants12122351
62. Mirnenko N.S., Safonov A.I. Pollen as a test system for the identification of an unfavorable urban environment (on the example of Donetsk) // *Problems of Ecology and Nature Protection of Technogenic Region.* 2023. No. 3. P. 12–17 (in Russian).
63. Mirnenko N.S. Pollen viability of some woody plants species in Donetsk agglomeration // *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin.* 2022. V. 26. No. 6. P. 55–61. doi: 10.18698/2542-1468-2022-6-55-61
64. Vagapov B., Ibragimova K., Arhipova N. Assessment of palynological spectrum of air in Kazan // *E3S Web of Conferences.* 2023. V. 407. Article No. 04004. doi: 10.1051/e3sconf/202340704004
65. Borics G., Naselli-Flores L., Padisák J., B-Béres V. Preface: Trait-based approaches in micro-algal ecology // *Hydrobiologia.* 2024. V. 851. No. 4. P. 709–711. doi: 10.1007/s10750-023-05462-6
66. Lan J., Liu P., Hu Xi., Zhu S. Harmful algal blooms in eutrophic marine environments: causes, monitoring, and treatment // *Water.* 2024. V. 16. No. 17. Article No. 2525. doi: 10.3390/w16172525
67. Bepalova S.V., Romanchuk S.M., Chufitskiy S.V., Perebeinos V.V., Gotin B.A. Fluorimetric analysis of

the impact of coal sludge pollution on phytoplankton // Biophysics. 2020. V. 65. No. 5. P. 850–857. doi: 10.1134/S0006350920050024

68. Mirnenko E.I. Taxonomic diversity of phytoplankton of the Kalmius River and its reservoirs // Ecosystem Transformation. 2022. V. 5. No. 2. P. 3–13. doi: 10.23859/estr-220204

69. Mirnenko E. Ecological monitoring of water bodies: Bioindication, microalgae biodiversity indices // Relevant issues of ecology and environmental management: E3S Web Conf. EDP Sciences, 2024. V. 555. Article No. 02008. doi: 10.1051/e3sconf/202455502008

70. Kolesnikov S.I., Kuzina A.A., Minnikova T.V., Akimenko Yu.V., Nevedomaya E.N., Ter-Misakyants T.A., Kazeev K.Sh. Approaches to the development of environmental standards for the content of petroleum hydrocarbons and Pb, Cr, Cu, Ni in soils of Greatest Caucasus // Sains Tanah. 2022. V. 19. No. 2. P. 192–204. doi: 10.20961/stjssa.v19i2.60119

71. Kolesnikov S., Kuzina A., Minnikova T., Ter-Misakyants T., Nevedomaya E., Akimenko Yu., Trufanov D., Kazeev K., Burachevskaya M., Minkina T., Shende S., Barakhov A. Biodiagnostics of resistance to the copper (Cu) pollution of forest soils at the dry and humid subtropics in the Greater Caucasus region // Forests. 2022. V. 13. No. 10. Article No. 1720. doi: 10.3390/f13101720

72. Opekunova M., Opekunov A., Somov V., Kukushkin S., Papyan E. Transformation of metals migration and biogeochemical cycling under the influence of copper mining production (the Southern Urals) // Catena. 2020. V. 189. Article No. 104512. doi: 10.1016/j.catena.2020.104512

73. Suleymanov R., Suleymanov A., Zaitsev G., Adelmurzina I., Galiakhmetova G., Abakumov E., Shagaliev R. Assessment and spatial modelling of agrochernozem properties for reclamation // Appl. Sci. 2023. V. 13. No. 9. Article No. 5249. doi: 10.3390/app13095249

74. Kolesnikov S.I., Zubkov D.A., Zharkova M.G., Kazeev K.Sh., Akimenko Yu.V. Influence of oil and lead contamination of ordinary chernozem on growth and development of spring barley // Russ. Agricult. Sci. 2019. V. 45. No. 1. P. 57–60. doi: 10.3103/S1068367419010075

75. Alesmasova A.S., Penkova Y.I., Pivovarova A.S., Ostapenko R.V. Military activity influence on some metals content in the Saur-Mogila soil, Donbas // Theoretical and Applied Ecology. 2018. No. 3. P. 33–39 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-3-033-039

76. Syshchykov D.V., Agurova I.V. Changes in the absorptive capacity of soils of Donbass degraded agroecosystems // Dokuchaev Soil Bulletin. 2023. No. 117. P. 101–117 (in Russian). doi: 10.19047/0136-1694-2023-117-101-117

77. Agurova I.V., Syshchykov D.V. Acidity of degraded soils of agricultural lands in the Donetsk People's Republic // Moscow Univ. Soil Sci. Bull. 2023. V. 78. No. 3. P. 301–306. doi: 10.3103/s014768742303002x

78. Safonov A. Ecological scales of indicator plants in an industrial region // Vavilov Readings–2021: proceedings of the International scientific and practical conference: BIO Web Conf. EDP Sciences, 2022. V. 43. Article No. 03002. doi: 10.1051/bioconf/20224303002

79. Frunze O. Sorption capacity of ornamental herbaceous plants under conditions of soil contamination with lead // Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East: proceedings of the International scientific and practical conference: E3S Web Conf. EDP Sciences, 2023. V. 462. Article No. 02004. doi: 10.1051/e3sconf/202346202004

80. Kornienko V.O. A retrospective analysis of anthropogenic pollution of the city of Donetsk. Vibration and acoustic noise // Bulletin of Donetsk National University. Series A. Natural sciences. 2024. No. 1. P. 93–100 (in Russian). doi: 10.5281/zenodo.12532574

81. Kornienko V.O., Kalaev V.N. Viability of pedunculate oak in the conditions of the city of Donetsk // Sib. J. For. Sci. 2024. No. 4. P. 95–106 (in Russian). doi: 10.15372/SJFS20240409

82. Vinogradova N.A., Glukhov A.Z. Ecological valence of *Rosa corymbifera* Borkh. to conditions of the technogenic environment // Contemp. Probl. Ecol. 2022. V. 15. No. 5. P. 521–527. doi: 10.1134/s1995425522050122

83. Kharchenko N.N., Kalaev V.N., Kornienko V.O. Mechanical resistance of *Quercus robur* L. at the environmental boundary of the species distribution in the steppe // Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions: proceedings of international forestry forum. Voronezh, 2021. Article No. 12049. doi: 10.1088/1755-1315/875/1/012049

84. Kornienko V.O., Kalaev V.N. Mechanical stability of *Virginian juniper* trees in steppe zone of the Eastern-European Plain // Lesovedenie. (For. Sci.). 2024. No. 1. P. 70–78 (in Russian). doi: 10.31857/S0024114824010084

85. Korniyenko V.O., Kalaev V.N. Impact of natural climate factors on mechanical stability and failure rate in silver birch trees in the city of Donetsk // Contemp. Probl. Ecol. 2022. V. 15. No. 7. P. 806–816. doi: 10.1134/s1995425522070150

86. Glukhov A.Z., Shtirts Yu.A. Characteristics of the shape asymmetry of leaf tip and base in *Populus nigra* L. under industrial dump conditions // Applied Ecology and Environmental Research. 2015. V. 13. No. 3. P. 819–831. doi: 10.15666/aeer/1303_819831

87. Glukhov A.Z., Strelnikov I.I. Lamina shape variability in species of the genus *Ficus* L. in different ecological conditions // Contemp. Probl. Ecol. 2014. V. 7. No. 2. P. 210–220. doi: 10.1134/S1995425514020048

88. Kornienko V.O. Influence of the natural and climatic factors on variation in a crown shape, mechanical resistance and an accident rate of woody plants on the example of *Juniperus virginiana* L. // Bulletin of the State Nikitsky Botanical Gardens. 2020. No. 134. P. 93–100 (in Russian). doi: 10.36305/0513-1634-2020-134-93-100

89. Trushkova I.Yu., Ashikhmina T.Ya., Kondakova L.V. Ethnoecology of the Slavic World: application significance on the Eurasian space // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 1. P. 111–115. doi: 10.25750/1995-4301-2019-1-111-115
90. Demyanenko T.V., Vityaz E.M. Prospects for the creation of an electronic herbarium at Donetsk State University // *Bulletin of Donetsk National University. Series A. Natural Sciences*. 2023. No. 1. P. 91–97 (in Russian).
91. Domracheva L.I., Kovina A.L., Korotkikh A.I., Skugoreva S.G., Ashikhmina T.Ya. Herbariums as custodians of biodiversity and their use (review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2023. No. 3. P. 6–20 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-3-006-020
92. Xu F., Asghar M.A. Editorial: Seed-environment interactions // *Front. Plant Sci*. 2023. V. 14. Article No. 1201047. doi: 10.3389/fpls.2023.1201047
93. Safonov A. Indicator plants of anthropogenic disturbances: Scientific approach, educational technologies // *Innovative technologies in environmental science and education (ITSE-2023): proceedings of the XI international scientific and practical conference. EDP Sciences*, 2023. V. 431. Article No. 01031. doi: 10.1051/e3sconf/202343101031
94. Gorbov S.N., Bezuglova O.S., Varduni T.V., Gorovtsov A.V., Tagiverdiev S.S., Hildebrant Yu.A. Genotoxicity and contamination of natural and anthropogenically transformed soils of the city of Rostov-on-Don with heavy metals // *Eurasian Soil Sc*. 2015. V. 48. No. 12. P. 1383–1392. doi: 10.1134/S106422931512008X
95. Klepikov O.V., Kurolap S.A., Prozhorina T.I. Carcinogenic risk to public health from air pollution in industrial cities of the central black earth region // *Proceedings of the II International conference on advances in materials, systems and technologies: AIP Conf. Proc. AIP Publishing*, 2022. V. 2467. Article No. 080019. doi: 10.1063/5.0093678
96. Albertini R.J., Vacek P.M., Carter E.W., Nicklas J.A., Squibb K.S., Gucer P.W., Engelhardt S.M., McDiarmid M.A. Mutagenicity monitoring following battlefield exposures: Longitudinal study of HPRT mutations in Gulf War I veterans exposed to depleted uranium // *Environ. Mol. Mutagen*. 2015. V. 56. No. 7. P. 581–593. doi: 10.1002/em.21955
97. Safonov A.I. Theratogenesis of indicator plants of industrial Donbass // *Diversity of plant world*. 2022. No. 1. P. 4–16 (in Russian). doi: 10.22281/2686-9713-2019-1-4-16
98. Safonov A.I. Abnormalities of embryo structures in Donbass indicator plants // *Diversity of plant world*. 2022. No. 3 (14). P. 5–18 (in Russian). doi: 10.22281/2686-9713-2022-3-5-18
99. Safonov A.I., Kalinina Yu.S., Palaguta A.P. Teratogenic effects as indicator properties of flowering plants in urbanized areas of the Donetsk agglomeration // *Problems of Ecology and nature protection of technogenic region*. 2024. No. 2. P. 20–30 (in Russian). doi: 10.5281/zenodo.13949289
100. Safonov A.I., Mirnenko N.S. Palynological screening in the monitoring program of Central Donbass // *Problems of ecology and nature protection of technogenic region*. 2019. No. 3–4. P. 43–48 (in Russian).
101. Wang Z., Wang S., Ma T., Liang Y., Huo Z., Yang F. Synthesis of zinc oxide nanoparticles and their applications in enhancing plant stress resistance: a review // *Agronomy*. 2023. V. 13. No. 12. Article No. 3060. doi: 10.3390/agronomy13123060
102. Zandalinas S.I., Casal J., Rouached H., Mittler R. Stress combination: from genes to ecosystems // *Plant J*. 2024. V. 117. No. 6. P. 1639–1641. doi: 10.1111/tpj.16681
103. Vasil'ev A.G. The role of econes as elementary population-coenotic groups in the integration of evolutionary and ecological processes // *Russ. J. Ecol*. 2023. V. 54. No. 3. P. 173–187. doi: 10.1134/s1067413623030074
104. Vogt G. Environmental adaptation of genetically uniform organisms with the help of epigenetic mechanisms – an insightful perspective on ecoepigenetics // *Epigenomes*. 2023. V. 7. No. 1. Article No. 1. doi: 10.3390/epigenomes7010001
105. Langford N., Fargeot L., Blanchet S. Spatial covariation between genetic and epigenetic diversity in wild plant and animal populations: a meta-analysis // *J. Exp. Biol*. 2024. V. 227. Suppl. 1. Article No. jeb246009. doi: 10.1242/jeb.246009
106. Zetzsche J., Fallet M. To live or let die? Epigenetic adaptations to climate change – a review // *Environ. Epigenet*. 2024. V. 10. No. 1. Article No. dvae009. doi: 10.1093/eep/dvae009
107. Notov A.A., Notov V.A., Ivanova S.A., Zueva L.V., Andreeva E.A. Polemochores in the ecosystems of military Pogoreloye Gorodishche operations area // *Bulletin of Tver State University. Series: Biology and Ecology*. 2023. No. 1 (69). P. 250–275 (in Russian). doi: 10.26456/vtbio300
108. Baranova O.G., Shcherbakov A.V., Senator S.A., Panasenko N.N., Sagalaev V.A., Saksonov S.V. The main terms and concepts used in the study of alien and synanthropic flora // *Phytodiversity of Eastern Europe*. 2018. V. 12. No. 4. P. 4–22 (in Russian). doi: 10.24411/2072-8816-2018-10031
109. Glukhov A.Z., Safonov A.I. Adaptive mechanisms in plants under conditions of anthropogenic transformation of the environment // *Science. Education. Practice: Proceedings of the International science conference. Delhi: Scientific publishing house “Infinity”, 2024. P. 108–115. doi: 10.34660/INF.2024.63.35.069*
110. Glukhov O.Z., Kharkhota G.I., Prokhorova S.I., Agurova I.V. Adaptive strategies of the halophyte populations // *Annali di Botanica*. 2014. V. 4. P. 115–124. doi: 10.4462/annbotrm-10268
111. Safonov A.I. Plant ecological strategies in the conditions of anthropogenic transformation of the Donbass landscapes // *Scientific research of the SCO countries: synergy and integration: proceedings of the International*

- conference. Beijing: Scientific publishing house "Infinity", 2023. P. 122–129. doi: 10.34660/INF.2023.87.16.122
112. Logofet D.O., Kazantseva E.S., Belova I.N., Onipchenko V.G. How long does a short-lived perennial live? A modeling approach // *Biol. Bull. Rev.* 2018. V. 8. No. 5. P. 406–420. doi: 10.1134/s2079086418050043
113. Onipchenko V.G., Dudova K.V., Akhmetzhanova A.A., Khomutovskiy M.I., Dzhatdueva T.M., Tekeev D.K., Elumeeva T.G. Which plant strategies are related to dominance in Alpine communities? // *Biol. Bull. Rev.* 2021. V. 11. No. 1. P. 76–85. doi: 10.1134/s2079086421010035
114. Nesporny V., Safonov A. The importance of principal component analysis for environmental biodiagnostics of Donbass // *Relevant issues of ecology and environmental management: E3S Web Conf.* 2024. V. 555. Article No. 01007. doi: 10.1051/e3sconf/202455501007
115. Nesporny V.N., Safonov A.I. An algorithm for recovering missing data in a sample of phytointication monitoring using the principal component analysis // *Problems of Ecology and Nature Protection of Technogenic Region.* 2024. No. 1. P. 15–26 (in Russian).
116. Pirko I.F., Kornienko V.O. Plant resources of the south of the East European Plain. Native types of cereals for landscaping of roadside territories of the Donetsk-Makeyevka agglomeration // *Bulletin of Donetsk National University. Series A. Natural sciences.* 2024. No. 3. P. 65–78 (in Russian). doi: 10.5281/zenodo.13758407
117. Pirko I.F., Kornienko V.O. Flora resources of the south of the East European Plain. Native species of the order Poales Small for landscaping the cities of the Donetsk-Makeyevka agglomeration // *Problems of Ecology and Nature Protection of Technogenic Region.* 2024. No. 3. P. 24–37 (in Russian). doi: 10.5281/zenodo.14532037
118. Kalinina A. The state of species of the genus *Oenothera* L. cenopopulations in transformed ecotopes of Donbass // *Forestry information.* 2022. No. 3. P. 135–144 (in Russian). doi: 10.24419/LHI.2304-3083.2022.3.12
119. Amin H., Ahmed Arain B., Jahangir T.M., Abbasi A.R., Abbasi M.S., Amin F. Comparative zinc tolerance and phytoremediation potential of four biofuel plant species // *Int. J. Phytoremediation.* 2023. V. 25. No. 8. P. 1014–1028. doi: 10.1080/15226514.2022.2125496
120. Antoniadis V., Shaheen S.M., Stärk H.J., Wernrich R., Levizou E., Merbach I., Rinklebe J. Phytoremediation potential of twelve wild plant species for toxic elements in a contaminated soil // *Environ. Int.* 2021. V. 146. Article No. 106233. doi: 10.1016/j.envint.2020.106233
121. Safonov A. Ecological phytomonitoring of anthropogenic transformations: monograph. Donetsk: Publishing house EDIT, 2024. 289 p. (in Russian).
122. Kumar A., Tripti, Raj D., Maiti S.K., Maleva M., Borisova G. Soil pollution and plant efficiency indices for phytoremediation of heavy metal(loid)s: two-decade study (2002–2021) // *Metals.* 2022. V. 12. No. 8. Article No. 1330. doi: 10.3390/met12081330
123. Mocek-Płóćiniak A., Mencil J., Zakrzewski W., Roszkowski S. Phytoremediation as an effective remedy for removing trace elements from ecosystems // *Plants.* 2023. V. 12. No. 8. Article No. 1653. doi: 10.3390/plants12081653
124. Rouhani A., Skousen J., Tack F.M.G. An overview of soil pollution and remediation strategies in coal mining regions // *Minerals.* 2023. V. 13. No. 8. Article No. 1064. doi: 10.3390/min13081064
125. Safonov A. Changes in plant CSR strategies under new anthropogenic transformations // *International Conference on Agritech and Water Management: E3S Web Conf. EDP Sciences,* 2025. V. 614. Article No. 04022. doi: 10.1051/e3sconf/202561404022