

**ДИНАМИКА ФИТОМОНИТОРИНГОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
АНТРОПОТЕХНОГЕНЕЗА В ДОНБАССЕ (2000–2019 гг.)***ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»**283050, г. Донецк, ул. Щорса, 46; e-mail: andrey_safonov@mail.ru*

Сафонов А. И. Динамика фитомониторинговых показателей антропогенеза в Донбассе (2000–2019 гг.). – Выделены временные тренды состояния фитосистем Донбасса по индикационным критериям. За период с 2000 по 2019 гг. установлены колебания значений фитоиндикационных параметров, что доказывает их фенотипическую природу проявления. В основу положен способ фитоиндикации по структурным трансформациям на аутоэкологическом уровне организации фитосистем с широким диапазоном выносливости к факторам антропогенеза.

Ключевые слова: фитоиндикация, Донбасс, экологический мониторинг.

Введение

Фитоиндикационный мониторинг является многофункциональным научным направлением в регионах с благополучной экологической обстановкой [13, 17–19] и на территориях повышенной опасности для биоты [2, 6, 7, 14, 15, 20]. Растительные организмы, как часть планетарного эволюционного преобразования [3, 4, 17, 21], постоянно испытывают воздействия внешних факторов среды [6, 8, 16, 19] и по своему структурно-функциональному состоянию являются отражениями общих [5, 11, 14, 18, 21] и частных (локальных) тенденций [1, 3, 10, 13, 20] трансформации и динамики диагностируемых экосистем [9, 12, 16, 18]. В рамках доступных для анализа и технической реализации программ в Донбассе [1, 5, 11, 12] растительные объекты представляют собой необъемлемую часть экологических исследований для оценки и обеспечения информацией о состоянии экотопов, что особо актуально и востребовано в годы интенсификации антропогенного вмешательства как в химико-токсическом аспекте, так и при механическом нарушении эволюционно сформированных связей в компонентах биогеоценозов. Выявляемая закономерность в динамике изменений показателей функциональной полноценности природных конструкций может создавать предпосылки для построения прогнозных моделей состояния систем или корректировки балансовых процессов для недопущения катастрофических явлений (необратимого сбоя, деградационных процессов).

Цель работы – на основании ретроспективного 20-летнего анализа показателей фитоиндикационной значимости в экологическом мониторинге Донбасса выделить специфику временных трендов состояния дифференцируемых по антропогенной эксплуатации экотопов.

Материал и методы исследования

Временные тренды были составлены на основании данных независимой от экономических показателей фитоиндикационной экспертизы, основные методологические аспекты проведения которой представлены в публикациях [5, 9–13]. Преимущества фитоиндикационного эксперимента заключается в прикрепленном образе жизни растений и возможности проведения активного мониторинга как аналога биотестирования в открытых полевых системах. За последние 20 лет были сформированы информационные базы о диагностических показателях и индексах [12] как основы фитоквантификации в Донецком экономическом регионе [11]. Для достижения поставленной цели были выбраны места произрастания проверенных ранее растений-индикаторов в шести категориях экотопической принадлежности: 1) промплощадки металлургических предприятий; 2) коксохимических и химических предприятий; 3) отвалы угольных шахт (срединная часть северной экспозиции терриконигов); 4) селитебные экотопы, преимущественно в спальных районах городов; 5) экотопы путей сообщений в зонах импакта (придорожные полосы не более 20 м от

проезжей части); 6) парковые зоны городов рекреационного назначения в зонах тихого отдыха (данные по категориям представлены в табл. 1, 2). Предварительное сравнение разницы в фитоиндикационных показателях внутри категории одного экотопа подтвердило отсутствие статистически достоверного значения, поэтому было принято решение в рамках представленной целевой программы не проводить геолокальную привязку к конкретному предприятию или населенному пункту. Суммарные показатели экологической нагрузки (при условии максимума в 100 баллов) были разделены на три структурно и функционально разные группы: 1) индексы фитоиндикационной значимости в вегетативной сфере (IVeg); 2) индексы в строении генеративных органов растений (IGen); 3) показатели общей габитуальной трансформации при полевой диагностике в сумме с показателями визуального морфологического тератообразования у растений (GabT). Для каждой категории экотопов были подсчитаны все данные, влияющие на общий суммационный балл, при подсчете которого использовали способ интеллектуального взаимодополняющегося альтернативными значениями выбора преимущественно важных интервальных диапазонов (от 8 до 10 пунктов) по видам: *Cichorium intybus* L., *Plantago major* L., *Berteroa incana* (L.) DC., *Echium vulgare* L., *Tripleurospermum inodorum* (L.) Sch. Bip., *Tragopogon major* Jacq., *Reseda lutea* L., *Tanacetum vulgare* L. (указаны в порядке востребованности).

Результаты и обсуждение

На основании специфики динамических процессов, по уровню воздействия на природные системы с неблагоприятным эффектом состояния фитообъектов, были выделены временные тренды (t) в обозначенных категориях антропогенных экотопов: техногенного характера (табл. 1) и социо-культурного, бытового назначения (табл. 2).

Таблица 1

Временные тренды состояния фитосистем Донбасса по индикационным критериям (на примере техногенных экотопов)

Год	Категории экотопической приуроченности											
	Металлургический комплекс				Коксохимические и химические предприятия				Отвалы угольных шахт (терриконики)			
	IVeg	IGen	GabT	t	IVeg	IGen	GabT	t	IVeg	IGen	GabT	t
2000	74	86	83		80	76	82		85	77	83	
2001	75	86	83		80	77	84		87	77	84	
2002	76	87	84		81	78	84		88	79	84	
2003	77	89	84		83	78	85		91	81	85	↓
2004	78	90	86		83	79	86		91	80	85	↑
2005	80	91	88	↓	84	80	89	↓	87	76	83	↑
2006	81	91	89	↑	85	80	90	↓	85	75	79	↑
2007	80	92	87	↑	85	81	90	↑	85	75	79	↓
2008	80	90	87	↑	84	78	88	↑	86	78	82	↓
2009	80	88	84	↑	79	76	87	↑	90	80	84	↓
2010	81	86	83	↑	78	75	87	↑	90	80	84	↑
2011	80	87	82	↑	75	71	86	↑	89	78	83	↑
2012	80	86	82	↑	74	68	85	↑	88	76	82	↑
2013	80	85	82	↓	73	67	84	↓	85	75	81	↑
2014	82	91	91	↓	72	66	83	↓	84	74	80	↑
2015	82	92	91	↑	71	66	83	↓	83	73	80	↓
2016	82	91	89	↑	71	64	82	↓	84	79	82	↓
2017	80	90	87	↑	70	63	81	↓	89	80	83	↑
2018	78	89	85	↑	70	63	81	↓	90	81	83	↑
2019	78	88	86	↑	72	65	84	↓	88	80	81	↑

Примечание. IVeg, IGen, GabT, t – пояснения в тексте.

Таблица 2

**Временные тренды состояния фитосистем Донбасса по индикационным критериям
(на примере селитебных, транспортных и рекреационных урбосистем)**

Год	Категории экотопической приуроченности											
	селитебные экотопы				экотопы путей сообщений в зонах импакта				парковые зоны городов			
	IVeg	IGen	GabT	t	IVeg	IGen	GabT	t	IVeg	IGen	GabT	t
2000	58	65	63	↑	57	52	66	↓	26	23	30	↓
2001	60	63	62	↑	58	53	67	↓	27	24	31	↓
2002	60	59	60	↑	5	54	67	↓	27	25	32	↓
2003	59	59	60	↓	59	53	67	↓	28	26	33	↓
2004	65	64	62	↓	59	53	68	↓	29	26	33	↑
2005	68	66	63	↓	60	54	68	↓	28	26	29	↑
2006	67	66	63	↑	61	55	69	↓	28	25	28	↑
2007	65	60	61	↑	61	55	69	↑	27	25	28	↓
2008	60	53	59	↑	59	54	68	↑	27	26	31	↓
2009	60	53	58	↓	58	53	68	↑	29	26	34	↓
2010	64	59	59	↓	57	52	67	↑	29	27	33	↑
2011	67	65	62	↓	57	52	67	↓	28	26	32	↑
2012	69	68	64	↓	60	54	66	↓	27	26	30	↑
2013	70	68	65	↑	62	55	66	↓	26	25	29	↓
2014	67	59	63	↑	61	55	67	↑	26	25	29	↓
2015	64	55	59	↓	61	54	67	↑	27	26	35	↓
2016	64	55	59	↓	61	52	66	↓	27	26	38	↓
2017	65	59	60	↓	60	51	65	↓	28	27	42	↓
2018	65	64	61	↓	59	51	65	↓	28	27	41	↑
2019	66	69	62	↓	62	52	68	↓	27	25	40	↑

Примечание. IVeg, IGen, GabT, t – пояснения в тексте.

В результате формирования сводных таблиц было установлено, что наибольшей сопряженностью к трендам угнетения и восстановления фитосистем характеризуется комплексный суммационный показатель габитуальной деструкции в совокупности со значением тератогенности, поэтому в табл. 1 и 2 обозначены направления роста или уменьшения значений в виде стрелки трендов рядом со значениями третьего блока анализа. Этот критерий визуализируется по результатам полевых морфоструктурных наблюдений на 80–90% от всех получаемых значений. Только показатели микроструктуры пыльцевых зерен и конформационных тканей эмбрионального аппарата требуют микроскопирования в камеральных условиях. Такое обстоятельство приближает исследования по диагностике промышленных или селитебных зон к возможности реализации информативных полевых наблюдений в экспресс-оценке антропогенной нагрузки.

При анализе данных по пробным участкам в зонах воздействия металлургического производства максимальные пики угнетения зарегистрированы в 2005–2006 и 2014–2015 гг., тогда как работа условно сопутствующих предприятий коксохимического характера имеет только один максимальный пик значения на год позже первого пика, установленного для металлургических предприятий. С 2015 по 2019 гг. наблюдается уменьшение воздействия металлургического комплекса, а с 2018 г. отмечен достоверный рост угнетения фитосистем на химических предприятиях, что косвенно указывает на интенсификацию работы промышленности в этом направлении. Колебания индикационных значений на пробных площадках отвалов угольных шахт наиболее частые (по 3–4 года), без существенных скачков значений, что обусловлено консервативным состоянием такого типа ландшафта, подверженного колебаниям фоновых значений геохимической активности. При анализе

этого варианта экотопа не принимали во внимание склоны, находящиеся под ежегодной искусственной механической трансформацией, переформированием или целенаправленной рекультивацией. Важно, что параметры, полученные в результате анализа строения вегетативных органов, имеют значения, максимально приближающиеся к верхнему установленным по 100-балльной суммационной шкале. Индексы тератообразования в большинстве случаев для категорий техногенных экотопов занимают промежуточное значение между уровнем трансформации вегетативной и генеративной сферы растений-индикаторов, хотя для пробных участков металлургического характера воздействия зафиксирован феномен достоверно больших значений в генеративной сфере (существенный вклад вносят показатели деформированного или несформированного зародыша, элиминации интегументарных структур и поверхностных тканей околоплодника, выше и значения по неполноценности палинологического материала).

В парном сравнении экотопов селитебного и коммуникационно-транспортного назначения увеличенным уровнем нагрузки на фитосреду характеризуются автомагистрали, пики максимальных значений для которых установлены в 2006–2007 и 2013–2014 гг., такие же тенденции наблюдались в селитебных экотопах на год раньше в обоих случаях. Сопряжены ли факт минимальных значений индексов угнетения растений в селитебных зонах в 2002–2003, 2008–2009 и 2015–2016 гг. с численно меньшим значением непосредственного антропогенного вмешательства в развитие локальной биоты, – требует дополнительного изучения. Парковые зоны городов рассмотрены в качестве условного контроля благополучия в формировании растительных организмов с широкой экологической амплитудой. Существенной разницы между показателями генеративных и вегетативных структур в этом блоке эксперимента не установлено. Преимущественно во все годы общий индекс габитуальной трансформации и тератообразования был численно выше остальных показателей, что предположительно связано с особенностями механического воздействия на растительные организмы в этих точках отбора проб. Судя по полученным данным, парковые зоны Центрального Донбасса находились в состоянии максимального антропогенного воздействия в 2004–2005, 2009–2010 и 2017–2018 гг., а минимального – в 2006–2007, 2013–2014 гг. В каждом частном случае может наблюдаться разница, однако только в случае использования механизма расчета суммационных критериев можно выделить тенденционные тренды динамики антропогенной нагрузки на природные системы по фитоиндикационным критериям (см. табл. 2).

Таким образом, при проведении дифференциального экотопического подхода, можно установить временные тренды состояния информативных индикаторов. Выделить при этом годы максимального экологического неблагополучия по всем категориям исследуемых территорий не представляется достоверно возможным, поэтому диагностические заключения экспертного содержания логичнее формировать в привязке к конкретному типу производства или характеру геохимической активности ландшафта. Полученные данные нуждаются в дальнейшей геостратегической обработке с последующей наглядной картографической визуализацией установленных процессов в динамике.

В последние два вегетационных периода были установлены фитоиндикационные значения по всем доступным структурным показателям для дополнительных видов при расширении ассортимента фитоиндикаторов: *Nigella arvensis* L., *Glaucium corniculatum* (L.) Rudolph, *Fumaria schleicheri* Soy.-Willem, *Portulaca oleracea* L., *Alsine media* L., *Dianthus campestris* M. Bieb., *Gypsophila paniculata* L., *Moehringia trinervia* (L.) Clairv., *Sagina procumbens* L., *Stellaria subulata* Boeber ex Schlecht. и *Atriplex mircantha* C. A. Mey. – виды полевой анатомо-морфологической диагностики, а также виды, подходящие по своим онтогенетическим и экологическим характеристикам к внедрению в процесс лабораторного биотестирования природных сред: *Amaranthus albus* L., *Atriplex tatarica* L., *Beta vulgaris* L., *Chenopodium hybridum* L., *Fagopyrum esculentum* Mill., *Persicaria hydropiper* Mill., *Polygonum euxinum* Chrtek, *Polygonum maritimum* L., *Echinocystis lobata* (Michx.) Torr. & Gray, *Alyssum*

hirsutum M. Bieb., *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh., *Barbarea stricta* Andr., *Brassica campestris* L., *Capsella orientalis* Klokov.

Выводы

Технология фитоиндикационной экспертизы на основании квантификационных методов позволила провести ретроспективный 20-летний анализ динамики и тенденций изменения показателей состояния индикаторных фитосистем территорий Донецкого экономического региона. Выделенные временные тренды отражают направленность процессов угнетения или восстановления природных систем под меняющимся воздействием антропогенного фактора.

Установлено, что наиболее геохимически консервативны участки, находящиеся в непосредственной близости к предприятиям коксохимического и химического производства (один пик максимума), а также к заводам металлургического комплекса (два диапазонных максимума) в Донбассе за последние 20 лет; минимальной отличительной межгодовой вариацией характеризуются пробные участки на северных склонах террикоников; парковые зоны рекреации по функциональному зонированию в местах тихого отдыха имеют минимальное значение угнетения фитосистем и в предложенном ассортименте экотопов являются условно контрольными для доказательства значимости на 95%-ном доверительном интервале.

Результаты работы могут представлять интерес для органов местного самоуправления в регионе: исполнительных комитетов, экологических ведомств и служб, осуществляющих контроль за состоянием среды и планирующих реализацию государственного менеджмента в территориальных системах, находящихся в зоне максимальной выносливости растительных индикаторных организмов.

Работа выполнена в рамках инициативной научной темы «Функциональная ботаника: экологический мониторинг, ресурсные технологии, фитодизайн» № 0117D000192 на кафедре ботаники и экологии ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет».

Список литературы

1. Алемасова А. С., Пенькова Ю. И., Пивоварова А. С., Остапенко Р. В. Влияние военных действий на содержание некоторых металлов в почве Саур-Могилы, Донбасс // Теоретическая и прикладная экология. 2018. № 3. С. 33–39.
2. Антонова Е. В., Позолотина В. Н., Каримуллина Э. М. Изменчивость костреца безостого в условиях хронического облучения в зоне Восточно-Уральского радиоактивного следа // Экология. 2014. № 6. С. 459–468.
3. Безель В. С., Жуйкова Т. В., Дуля О. В., Балыбердина Н. С. Внутривидовая изменчивость металлоустойчивости семенного потомства *Taraxacum officinale* Wigg. s.l. : анализ на основе зависимостей «доза – эффект» // Экология. 2019. № 4. С. 263–269.
4. Васильев А. Г. Эволюционная экология в XXI веке : новые концепции и перспективы развития // Экология. 2019. № 2. С. 88–100.
5. Глухов А. З., Сафонов А. И. Перспективы проведения фитоиндикационного мониторинга техногенно трансформированных экотопов // Промышленная ботаника. 2002. Т. 2. С. 7–14.
6. Жуйкова Т. В., Безель В. С., Позолотина В. Н., Северюхина О. А. Репродуктивные возможности растений в градиенте химического загрязнения среды // Экология. 2002. № 6. С. 431–436.
7. Зыкова Ю. Н., Скугорева С. Г., Товстик Е. В., Ашихмина Т. Я. Подходы к оценке состояния городских почв методами биотестирования с использованием организмов различной систематической принадлежности и данных химического анализа // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 3. С. 38–46.
8. Лянгузова И. В. Динамические тренды содержания тяжелых металлов в растениях и почвах при разном режиме аэротехногенной нагрузки // Экология. 2017. № 4. С. 250–260.

9. Сафонов А. И. Стратегическая потенциализация фитоиндикаторов техногенных загрязнений // Аграрная Россия. 2009. № 51. С. 58–59.
10. Сафонов А. И. Индикаторная роль растений в системе управления городом в промышленном регионе // Экологическая ситуация в Донбассе. М. : Изд-во МНЭПУ, 2016. Т. 1. С. 288–293.
11. Сафонов А. И. Фитоквантификация как информационный ресурс экологического мониторинга Донбасса // Донецкие чтения 2018 : Образование, наука, инновации, культура и вызовы современности : матер. III Междунар. науч. конф. (Донецк, 25 октября 2018 г.). Т. 2. Хим.-биол. науки. Донецк : Изд-во ДонНУ, 2018. С. 216–217.
12. Сафонов А. И. Фронтальный спектр фитодиагностики в Донбассе (2018–2019 гг.) // Донецкие чтения 2019 : Образование, наука, инновации, культура и вызовы современности : матер. IV Междунар. науч. конф. (Донецк, 31 октября 2019 г.). Т. 2: Хим.-биол. науки. Донецк : Изд-во ДонНУ, 2019. С. 270–271.
13. Скугорева С. Г., Кутявина Т. И., Огородникова С. Ю., Кондакова Л. В., Симакова В. С., Блинова А. Л., Зыкова Ю. Н., Домрачева Л. И., Ашихмина Т. Я. Комплексный подход в оценке экологического состояния городских почв // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 3. С. 57–65.
14. Тамахина А. Я., Ахкубекова А. А. Мониторинг состава растительных сообществ на отвалах из отходов обогащения цветных металлов // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 2. С. 61–67.
15. Трифонова Т. А., Подолец А. А., Селиванов О. Г., Марцев А. А. Оценка загрязнения почв рекреационных территорий промышленного города соединениями тяжелых металлов и мышьяка // Теоретическая и прикладная экология. 2018. № 2. С. 94–101.
16. Шималина Н. С., Позолотина В. Н., Орехова Н. А., Антонова Е. В. Оценка биологических эффектов у семенного потомства *Plantago major* L. в зоне действия медеплавильного производства // Экология. 2017. № 6. С. 420–430.
17. Burggren W. Epigenetic inheritance and its role in evolutionary biology : re-evaluation and new perspectives // Biology. 2016. Vol. 5, N 24. P. 2–22.
18. Ernst W. H. O. Evolution of metal tolerance in higher plants // For. Snow Landsc. Res. 2006. Vol. 80, N 3. P. 251–274.
19. Panidi E., Trofimetz L., Sokolova J. Application of phyto-indication and radiocesium indicative methods for microrelief mapping // IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science. 2016. N 34. P. 12–29.
20. Pozolotina V. N., Antonova E. V. Temporal variability of the quality of *Taraxacum officinale* seed progeny from the East-Ural radioactive trace : is there an interaction between low level radiation and weather conditions? // Intern. J. of Radiation Biology. 2017. Vol. 93, N 3. P. 330–339. <http://dx.doi.org/10.1080/09553002.2016.1254835>
21. White P. J., Brown P. H. Plant nutrition for sustainable development and global health // Annals of Botany. 2010. Vol. 105. P. 1073–1080.

Safonov A. I. Dynamics of phytomonitoring indicators of anthropotechnogenesis in the Donbass (2000–2019). – The time trends of the state of Donbass phytosystems according to indicator criteria have been identified. During the period from 2000 to 2019, fluctuations in the values of phytoindication parameters were established, which proves their phenotypic nature of manifestation. It is based on the method of phytoindication of structural transformations at the autecological level of organization of phytosystems with a wide range of endurance in the factors of anthropotechnogenesis.

Key words: phytoindication, Donbass, environmental monitoring.