УДК 581.15:581.52:502.175(477.62) DOI: 10.5281/zenodo.14227649 EDN: SDSJHS

АТИПИЧНЫЙ МОРФОГЕНЕЗ ФИТОИНДИКАТОРОВ В ЭКОЛОГИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ ДОНЕЦКА

© 2024. ***А. И. Сафонов***

В работе приведены и численно проанализированы примеры встречаемости (регистрации) тератных форм у видов растений, проявляющих индикаторную структурную пластичность в зависимости от уровня антропогенного воздействия на природные системы. Скрининг был осуществлён в 2023 и 2024 годы. – в периоды существенной трансформации придорожных экотопов Донецка, что являлось возможностью частой регистрации индикаторных видов, а также высокого уровня структурного полиморфизма, выходящего по своим диапазонам значений за пределы ожидаемой нормы. Предоставлены сведения о строении цветков, соцветий и особенностях архитектоники в общем габитусе для натурализированных в Донбассе видов сорно-рудеральной фракции флоры: *Verbascum lychnitis* L. и *Erigeron canadensis* L. Индикаторно значимыми показателями тератоморфности являются численно подтвержденные повторения, превышающие порог 5 % от общего ценопопуляционного пула диагностических признаков. Отмеченные изменения описаны по визуальным моделям, формулам и диаграммам цветков.

Ключевые слова: тератология, фитопатология, экологический мониторинг, структурная ботаника, строение цветка, фитоиндикация, Донбасс, антропогенная нагрузка.

Введение. Системы и программы индикационного назначения по оценке состояния природных и природно-техногенных экотопов являются неотъемлемой частью целевой эксплуатации человеком естественных геокомплексов [1, 2], организации экологического мониторинга с помощью растений [3, 4]. Безусловно, в основе информационного отклика на факторы внешней среды лежит генетическая предрасположенность тест-систем [5], что используется для функционального зонирования, например, урбанизированных ландшафтов [6], а также может быть частью фундаментальных разработок по толерантной консервативности биосистем [7]. На таких примерах структурная пластичность растений в сравнительном аспекте «норма – патология» рассматривается в разделах тератологии [8, 9], что представляет собой в частных случаях прикладную задачу (диагностики, оптимизации), а при обобщении полученных данных – базовую теорию изменчивости организмов в условиях стремительно меняющейся среды.

Цель работы – определить численные закономерности проявления атипичного морфогенеза растений в локальных экосистемах города Донецка на примере типичных натурализированных видов *Verbascum lychnitis* L. и *Erigeron canadensis* L. по общему габитусу и архитектонике, строению их цветков и соцветий.

Материал и методика исследования. В качестве опорной и хрестоматийной разработки по тератологии растений рассматривали монографическую работу [10] с некоторыми дополнениями на современном этапе проведения ботанико-структурных изысканий [11, 12] и целевых работ по фитотератологии в условиях промышленно развитой среды [13, 14]. Экотопы Донецка на сегодня являются частью общей мониторинговой сети Донбасса [15] и объектами исследования коллектива кафедры ботаники и экологии Донецкого государственного университета [16, 17].

Условия геохимического контраста [18, 19] и открытого токсикологического эксперимента [20, 21] формируют возможность целевой идентификации факторов стресса [22, 23], что важно для организации таких исследований в урбанизированных

ландшафтах Донбасса [24–26] с учетом существующего опыта на сопредельных территориях в Центральном Черноземье [27, 28].

В реализуемой работе мониторинговой точкой – учетной площадкой – является локалитет с количеством особей 1-2-летних травянистых растений не менее 20 шт. (рис. 1), чтобы иметь возможность провести достоверный статистический учет количественных признаков и частоты встречаемости диагностируемых характеристик. По результатам анализа ценопопуляций *Verbascum lychnitis* L. было выявлено 38 таких пробных площадок, а для *Erigeron canadensis* L. – 32 в г. Донецке в 2023 и 2024 гг. Также зафиксировано более 100 случаев единичных локалитетов тест-видов.



Рис. 1. Пример модельной пробной площадки для фитоиндикационного мониторинга по атипичному морфогенезу с использованием *Verbascum lychnitis* L. (бул. Шахтостроителей, г. Донецк, 2024 г.)

Визуализация данных по структурному морфогенезу индикаторных видов растений [29] основывается на сравнительных критериях численной и стереометрической нормы растений в квазиприродных экосистемах по отношению к морфологии фокусных признаков в условиях антропогенных трансформаций [30]. Целевой проект на примере ценопопуляций одуванчика лекарственного в экотопах города Донецка был реализован в 2024 году [31].

По признакам структурной организации растений были взяты за основу обзорные работы [32] и частные примеры, опубликованные ранее [13, 14]. Основной метод идентификации атипичного морфогенеза реализован как морфологическая экспресс-диагностика витальных объектов – прижизненное наблюдение без изъятия из природной среды.

Анализ результатов. Предполагаемая структурная разнокачественность индикаторных видов растений в условиях антропогенных трансформаций подтвердилась в результате целевых сборов *Verbascum lychnitis* L. и *Erigeron canadensis* L. в 2023 и 2024 годах. Вывести дробный морфологический учет позволили сборы данных не менее 400 линейных характеристик в каждой учётной площадке. Поскольку в данном случае были использованы субпопуляционные структуры, которые спонтанно были сформированы в Донецке (а не в результате целевого распространения, как метода активного мониторинга, реализуемого на примере других видов астровых, мятликовых, капустных, а также отдельных видов мохообразных в условиях мониторинговой сети Центрального Донбасса), то провести доказательную базу «индикатор – индикат» представляется возможным только в качественном описании,

для выявления опорных признаков и дальнейшей дифференциации при выполнении узколокальных задач мониторинга. Результаты антологического (по структуре цветка) и габитуального анализа *V. lychnitis* представлены на рисунках 2–4: по визуальным моделям проведено ограничение самыми типичными морфологическими показателями.



Рис. 2. Габитуальный полиморфизм *Verbascum lychnitis* L., строение цветка в норме и патологии (идентификация по формулам, диаграмме с локусами тератогенеза, и внешнему виду цветка)



Рис. 3. Двух-трех-полицентричные модели побегообразования *Verbascum lychnitis* L., питизация строения цветка в градиенте антропогенной нагрузки (цветовая шкала зелёного, оранжевого и красного маркера)

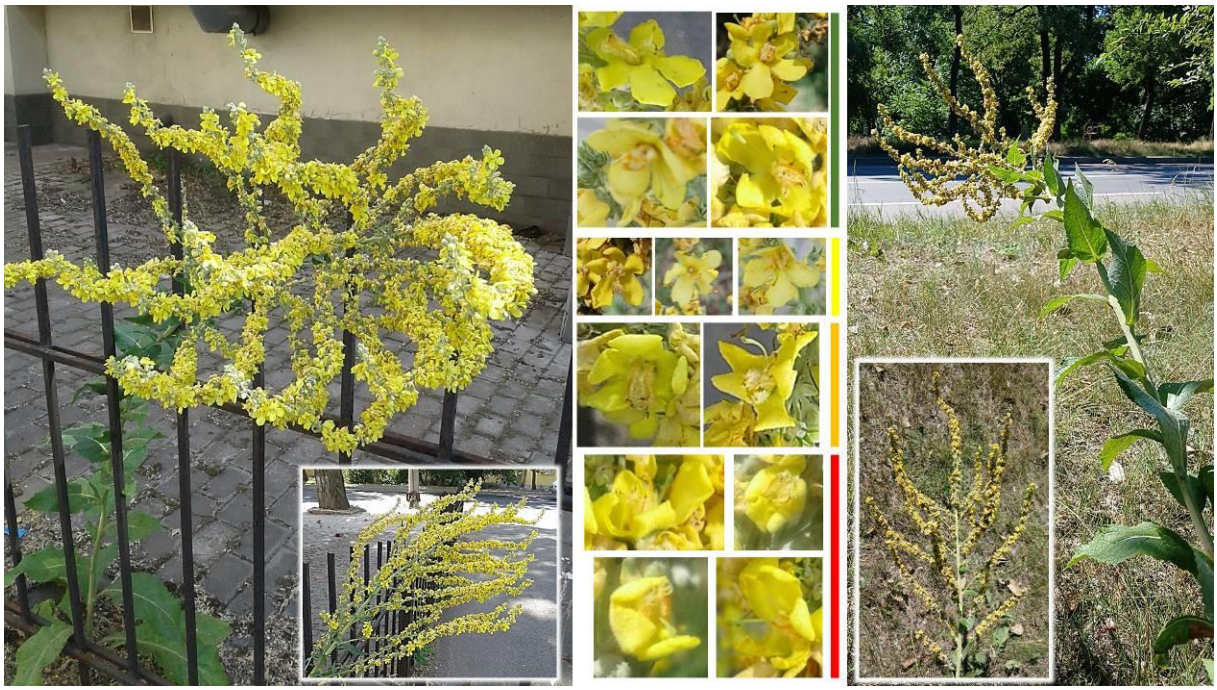


Рис. 4. Единичные примеры анализа соцветий *Verbascum lychnitis* L., питизация строения цветка по матрикальности в соцветии одной особи (шкала зелёного, жёлтого и оранжевого и красного маркера)

Установлено, что в местах непосредственного импакта объектов техногенной инфраструктуры – металлургического комплекса, например, характерны следующие тератные варианты для территории Донецкой агломерации:

1) фасциации стебля, а также в системе ветвления общего соцветия (до 7–10 %);

2) скученность побегов, дистопия (до 9–12 %) регистрируемых особей;

3) асимметрия формирования соцветия как последствие нарушения роста механических тканей стебля (до 8 %) в условиях антропогенных трансформаций;

4) скученность междоузлий отдельных частей побега (до 8–10 %);

5) дихотомия побега от корневой шейки как следствие схизокотилии при прорастании семенного материала в первом поколении проведения активного экологического мониторинга из общей точки сбора элементов диссеминации (до 6 % регистрируемых особей), если сбор дикорастущих экземпляров – более 8 %.

Это признаки, диагностируемые в полевых условиях при экспресс-диагностике среды, имеют схожие результаты, полученные для всей мониторинговой сети в Центральном Донбассе [33].

Отдельного внимания заслуживает явление пролификации соцветий в условиях загрязнения почв тяжелыми металлами, что, по-видимому, является следствием двойного воздействия при ингибировании верхушечных меристем и стимулировании ростовых процессов при высокой минерализации ризоэдафосферы. Однако такое явление не отражается в статистической достоверности (на ценопопуляционном уровне), поэтому в общую систему мониторинга пока не было включено по причине отсутствия устойчивых закономерностей своего проявления.

Анализ строения цветка был организован по определению закономерных преобразований в конкретных локализациях изменений: в кругах венчика, строении андроцея, гинецея, при установлении явления дистопии, полимеризации и олигомеризации частей цветка, также если наблюдалась пролификация одного цветка в

другой на верхушечных почках цветоноса. Эти закономерности изображены на соответствующих рисунках 2–4.

В рассматриваемых результатах численных значений структур цветка отмечена тенденция общей олигомеризации частей (син-тератогенных проявлений) в результате срастания отдельных элементов между собой. Наиболее общим способом это отражается в количественных показателях формулы цветка *V. lychnitis* (рис. 2) – в сравнении нормы и патологических проявлений.

Визуальная модель *E. canadensis* по габитуальным отличиям впервые была получена на уровне региона для тератологического анализа (рис. 5).



Рис. 5. Габитуальная разнокачественность *Erigeron canadensis L.* в экотопах Донецка: по наличию нижней формации листовых пластинок, общего размера в архитектонике и тератности цветков

Крайние позиции в строении по внешнему виду *E. canadensis* и локализациях тератных проявлений в цветке (рис. 5) свидетельствуют о наличии морфологической разницы, что может быть обусловлено с точки зрения стратегий выживания конкретных особей в сложных условиях в большей степени за базовые ресурсы (в первую очередь фактор увлажнения) в условиях селитебной застройки, урбанизации и факторов техногенеза. Градация может прослеживаться в условиях заселения мест с минимальным субстратным ресурсом (линии застроек, в трещинах дорожных коммуникаций, тротуарных плиток и пр.).

В условиях экстремумов стрессового фактора особи редуцируют прикорневую розетку листьев, – весь запас синтезированных в процессе весенне-летней вегетации элементов переходит для поддержания эксплерентной стратегии и продукции большого количества семенного материала. Аттаригирующими центрами в таком случае выступают плоды. Всхожесть семенного материала тем не менее сохраняется на уровне не менее 98 %, что указывает на высокую генеративную толерантность вида в условиях урбанизированной среды. В цветке (см. диаграммы на рис. 5) наиболее уязвимы наружный круг околоцветника и в особо напряженных случаях выпадает 1–2 элемента андроцея путем срастания пыльников или редукции тычиночных нитей.

Выводы.

1. На примере *Verbascum lychnitis* L. и *Erigeron canadensis* L. в условиях Донецкой агломерации рассмотрено и доказано большее участие тератных форм при реализации системы выживания видов при разной антропогенной нагрузке.

2. Территориальное совмещение уровня селитебных воздействий с факторами техногенеза и(или) иных причин загрязнений и трансформации являются причиной формирования большего количества патологических форм, что рассмотрено на примере габитуса тест-видов, атипичного морфогенеза соцветий, деталей и общего строения цветков у представителей сорно-рудеральной фракции региональной флоры.

3. Установленные тератные преобразования являются следствием повышенного и неравномерно распределенного фактора антропотехногенеза, требует детализации при химико-аналитическом контроле для рассмотренных экотопов. Высокие уровни тератогенеза, диагностируемые экспресс-методом витальной экспертизы, являются прямым индикатором локальных нарушений в балансовых процессах жизнедеятельности и сигналом для проведения обязательного экологического расследования на местности с установлением причин таких состояний и нарушений.

Исследование выполнено в рамках молодежной лаборатории «Диагностика и механизмы адаптации природных и антропогенно-трансформированных экосистем Донбасса» (номер госрегистрации 124051400023-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биоиндикация в технологиях, проектах, решениях, как сигнальная система биосферы / Д.А. Маркелов, Н. Я. Минеева, А. П. Акользин [и др.] // Проблемы региональной экологии. – 2022. – № 2. – С. 49–54. – DOI: 10.24412/1728-323X-2022-2-49-54. – EDN: JGNNSB.
2. Биомониторинг тератологический: концепция, проекты, фотобанк / Д.А. Маркелов, А.В. Маркелов, Н.Я. Минеева [и др.] // Проблемы региональной экологии. – 2019. – № 5. – С. 53–58. – DOI: 10.24411/1728-323X-2019-17053. – EDN: CMWEJI.
3. Khondhodjaeva N.B., Ismillaeva K.B., Ruzimbayeva N.T.K. Bioindication and its importance in the conducting of ecological monitoring // European Science. – 2018. – No. 4(36). – P. 68–70. – EDN: XNFJSH.
4. Environmental pollution assessment using tree species indication / T.U. Rakhimov, R.A. Eshonkulov, I.N. Yusupov, Sh.E. Chorshanbiev // Вестник науки и образования. – 2021. – No. 9-2(112). – P. 8–12. – EDN: ZVLPWU.
5. Баранов С.Г. Соотношение генотип-фенотип, определяемое геометрической морфометрией // Journal of Bioinformatics and Genomics. – 2023. – № 2(20). – DOI: 10.18454/jbg.2023.20.2.003. – EDN: KXRNZD.
6. Ecotoxicity of dust from different functional zones of Moscow / O.V. Nikolaeva, S.A. Kulachkova, A.A. Astaykina [et al.] // Eurasian Soil Science. – 2024. – Vol. 57, No. 2. – P. 337–348. – DOI: 10.1134/S1064229323602779. – EDN: WIPNSE.
7. Zakharov V.M., Trofimov I.E. Homeostatic mechanisms of biological systems: prolegomena // Biology Bulletin. – 2023. – Vol. 50, No. S1. – P. S1–S6. – DOI: 10.1134/s1062359023601192. – EDN: JHXMBS.
8. Buchner L., Eisen A.K., Jochner-Oette S. Effects of ash dieback on leaf physiology and leaf morphology of Fraxinus excelsior L // Trees. – 2024. – DOI: 10.1007/s00468-024-02546-1. – EDN: OIMNRL.
9. Ильминских Н.Г., Красноперова С.А. Тератоморфы сосудистых растений в спонтанной флоре арктических и субарктических районов Тюменской области // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. – 2022. – Т. 8, № 4. – С. 72–81. – EDN: FXUEZM.
10. Тератогенез растений на юго-востоке Украины / А.З. Глухов, А.И. Хархота, А.С. Назаренко, А.Ф. Лиханов. – Донецк: Донецкий ботанический сад, 2005. – 179 с.
11. Glukhov A.Z. Adaptive mechanisms in plants under conditions of anthropogenic transformation of the environment // Science. Education. Practice. – Delhi: Scientific publishing house Infinity, 2024. – P. 108–115. – DOI: 10.34660/INF.2024.63.35.069. – EDN: AZWMYE.
12. Glukhov A.Z. Phytomonitoring concept for anthropogenically disturbed regions // Scientific research of the SCO countries: synergy and integration. – Beijing. – P. 96-104. – DOI: 10.34660/INF.2024.87.72.160. – EDN: WLKXRD.

13. Сафонов А.И. Тератогенез растений-индикаторов промышленного Донбасса // Разнообразие растительного мира. – 2019. – № 1(1). – С. 4-16. – DOI: 10.22281/2686-9713-2019-1-4-16. – EDN: IJNXJE.
14. Сафонов А.И. Аномалии эмбриональных структур растений-индикаторов Донбасса // Разнообразие растительного мира. – 2022. – № 3(14). – С. 5-18. – DOI: 10.22281/2686-9713-2022-3-5-18. – EDN: GQUFYH.
15. Safonov A., Glukhov A. Ecological phytomonitoring in Donbass using geoinformational analysis // BIO Web of Conferences. – 2021. – Vol. 31. – P. 00020. – DOI: 10.1051/bioconf/20213100020. – EDN: XYLEQZ.
16. Калинина А.В. Изменчивость морфометрических параметров *Oenothera depressa* Greene в ценопопуляциях трансформированных экотопов г. Макеевки // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2022. – № 3–4. – С. 16–20. – EDN: DEKIUI.
17. Мирненко Н.С. Тератоморфы пыльцевых зёрен *Ambrosia artemisiifolia* L. селитебных территорий г. Донецка // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2017. – № 1-2. – С. 26–31. – EDN: YPPBQU.
18. Ермаков В.В., Тютиков С.Ф., Сафонов В.А. Биогеохимическая индикация микроэлементозов. – Москва: РАН, 2018. – 386 с. – ISBN 978-5-906906-91-5. – EDN: YNHZUT.
19. Ермаков В.В. Современное развитие биогеохимических идей В.И. Вернадского // Геохимия. – 2023. – Т. 68, № 10. – С. 995–1008. – DOI: 10.31857/S0016752523100047. – EDN: YHRINA.
20. Колесников С.И. Сравнительная оценка экотоксичности химических элементов // Почвы и окружающая среда. – Новосибирск: Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения Российской академии наук, 2023. – С. 635–637. – EDN: HBTZNV.
21. Фрунзе О.В. Сорбционная способность декоративных травянистых растений в условиях загрязнения почвы ионами хрома // Экосистемы. – 2023. – № 33. – С. 152–159. – EDN: DMWIJH.
22. 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 // Contemporary Problems of Ecology. – 2022. – Vol. 15, No. 7. – P. 806-816. – DOI: 10.1134/s1995425522070150. – EDN: EUVZMY.
23. Калинина А.В., Жуков С.П. Терриконы Донбасса как объект экологического туризма // Экологические проблемы использования горных лесов. – Краснодар: Кубанский государственный университет, 2023. – С. 204–208. – EDN: UBEYUX.
24. Корниенко В.О. Ретроспективный анализ антропогенного загрязнения города Донецка. Вибрационно-акустическое зашумление // Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки. – 2024. – № 1. – С. 93–100. – DOI: 10.5281/zenodo.12532574. – EDN: TSWEOI.
25. Корниенко В.О., Калаев В.Н. Жизнеспособность дуба черешчатого в условиях города Донецка // Сибирский лесной журнал. – 2024. – № 4. – С. 95–106. – DOI: 10.15372/SJFS20240409. – EDN: SPLUNB.
26. Гермонова Е.А. Геоинформационная визуализация данных по атипичному морфогенезу растений экотопов Донбасса // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2023. – № 1–2. – С. 13–22. – EDN: QECLTU.
27. Урбоэкодиагностика промышленных городов Центрального Черноземья / С.А. Куролап, О.В. Клепиков, Т.И. Прожорина [и др.]. – Воронеж: Цифровая полиграфия, 2022. – 255 с. – ISBN 978-5-907669-06-2. – EDN: HEQQGA.
28. Remote monitoring of factors determining the environmental safety of urban areas / S. Yeprintsev, S. Kurolap, O. Klepikov, P. Vinogradov // E3S Web of Conferences. – Vol. 389. EDP Sciences, 2023. – P. 03030. – DOI 10.1051/e3sconf/202338903030. – EDN: WPFKSG.
29. Сафонов А.И. Пространственные модели цветков в градиенте антропогенной нагрузки // Донецкие чтения 2023: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности. – Том 3: Биологические и медицинские науки, экология. – Донецк: Донецкий государственный университет, 2023. – С. 121–123. – EDN: EELESC.
30. Safonov A. Assessing landscape disturbance in Donbass using phytomonitoring data // BIO Web of Conferences. – 2024. – Vol. 126. – P. 01031. – DOI: 10.1051/bioconf/202412601031. – EDN: EMSANF.
31. Сафонов А.И., Калинина Ю.С., Палагута А.П. Тератогенные эффекты как индикаторные свойства цветковых растений урбанизированных территорий Донецкой агломерации // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2024. – № 2. – С. 20–30. – DOI: 10.5281/zenodo.13949289. – EDN: CZPYKY.
32. Цаценко Л.В., Дмитрова Е.С. Явление фасциации – феномен в развитии у растений // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2023. – № 190. – С. 117–127. – DOI: 10.21515/1990-4665-190-015. – EDN: FASZNX.

33. Сафонов А.И. Тератогенез цветков и соцветий в индикации антропогенной нагрузки // Вестник Северо-Казахстанского университета им. М. Козыбаева. – 2024. – № 4(630). – С. 30–39.

Поступила в редакцию 14.11.2024 г.

ATYPICAL MORPHOGENESIS OF PHYTOINDICATORS IN THE ENVIRONMENTAL MONITORING OF DONETSK

A. I. Safonov

The paper presents and numerically analyzes examples of the occurrence (registration) of terate forms in plant species exhibiting indicator structural plasticity depending on the level of anthropogenic impact on natural systems. Screening was carried out in 2023 and 2024. – during periods of significant transformation of the roadside ecotopes of Donetsk, which was the possibility of frequent registration of indicator species, as well as a high level of structural polymorphism, exceeding the expected norm in its ranges of values. Information is provided on the structure of flowers, inflorescences and features of architectonics in the general habitus for species of the weed-ruderal fraction of flora naturalized in Donbass: *Verbascum lychnitis* L. and *Erigeron canadensis* L. Indicator-significant indicators of teratomorphism are numerically confirmed repetitions exceeding the threshold of 5 % of the total cenopopulation pool of diagnostic signs. The noted changes are described by visual models, formulas and diagrams of flowers.

Keywords: teratology, phytopathology, environmental monitoring, structural botany, flower structure, phytoindication, Donbass, anthropogenic load.

Сафонов Андрей Иванович
кандидат биологических наук, доцент;
заведующий кафедрой ботаники и экологии
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: andrey_safonov@mail.ru
ORCID : 0000-0002-9701-8711
AuthorID : 957581

Safonov Andrey
candidate of biological sciences, docent;
head of the department of Botany and Ecology,
Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.