

DOI 10.54596/2958-0048-2024-4-66-72

УДК 58.084.1

МРНТИ 34.31.15

**ТЕРАТОГЕНЕЗ ЦВЕТКОВ И СОЦВЕТИЙ
В ИНДИКАЦИИ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ****Сафонов А.И.^{1*}**^{1*}ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», Донецк, Россия*Автор для корреспонденции: andrey_safonov@mail.ru**Аннотация**

В общей системе экологического мониторинга Донбасса выделены признаки индикационной значимости по строению растений – на уровне макромаркеров *Verbascum lychnitis* L. в строении цветка и соцветий типичных видов природных и техногенных экотопов.

Установлено, что с увеличением антропогенной трансформации экосистем в растениях природной флоры возникают структурно-функциональные нарушения, степень выраженности которых является индикатором неблагоприятных факторов воздействия. Такие структурные преобразования рассмотрены как общие и частные случаи патологий (аномалий) – тератогенеза генеративной сферы, отражающегося на габитуальном уровне всей архитектоники растения, так и в строении частей цветка и их взаимном расположении.

Ключевые слова: Донбасс, экологический мониторинг, тератогенез растений, строение цветка, уровень антропогенной нагрузки, загрязнение окружающей среды.

**ГҮЛДЕР МЕН ГҮЛШОҒЫРЛАРДЫҢ ТЕРАТОГЕНЕЗИ АНТРОПОГЕНДІК
ЖҮКТЕМЕНІ ИНДИКАЦИЯЛАУДА****Сафонов А.И.^{1*}**^{1*}«Донецк мемлекеттік университеті» ФМББМ, Донецк, Ресей*Хат-хабар үшін автор: andrey_safonov@mail.ru**Аңдатпа**

Донбасстың экологиялық мониторингінің жалпы жүйесінде өсімдіктердің құрылымы бойынша индикативті маңыздылық белгілері – *verbascum lychnitis* I макромаркер деңгейінде. табиғи және техногендік экотоптардың типтік түрлерінің гүлдері мен гүлшоғырларының құрылымында. Табиғи флора өсімдіктерінде экожүйелердің антропогендік трансформациясының жоғарылауымен құрылымдық-функционалдық бұзылулар пайда болатыны анықталды, олардың ауырлығы қолайсыз әсер ету факторларының көрсеткіші болып табылады. Мұндай құрылымдық өзгерістер патологияның (ауытқулардың) жалпы және ерекше жағдайлары ретінде қарастырылады – генеративті сфераның тератогенезі, ол өсімдіктің барлық архитектоникасының әдеттегі деңгейінде, сондай-ақ гүл бөліктерінің құрылымында және олардың өзара орналасуында көрінеді.

Кілт сөздер: Донбасс, экологиялық мониторинг, өсімдіктердің тератогенезі, гүл құрылымы, антропогендік жүктеме деңгейі, қоршаған ортаның ластануы.

TERATOGENESIS OF FLOWERS AND INFLORESCENCES
IN THE INDICATION OF ANTHROPOGENIC LOAD

Safonov Andrey^{1*}

^{1*}Donetsk State University, Donetsk, Russia

*Corresponding author: andrey_safonov@mail.ru

Abstract

In the general environmental monitoring system of Donbass, signs of indicative significance in plant structure have been identified – at the level of macromarkers *Verbascum lychnitis* L. in the structure of flowers and inflorescences of typical species of natural and man-made ecotopes.

It has been established that with an increase in anthropogenic transformation of ecosystems, structural and functional disorders arise in plants of the natural flora, the severity of which is an indicator of unfavorable factors of influence. Such structural transformations are considered as general and special cases of pathologies (anomalies) – teratogenesis of the generative sphere, reflected at the habitual level of the entire architectonics of the plant, as well as in the structure of the parts of the flower and their mutual arrangement.

Keywords: Donbass, ecological monitoring, plant teratogenesis, flower structure, level of anthropogenic load, environmental pollution.

Введение

Вопросы оценки антропогенной нагрузки в густонаселенных регионах являются актуальными в рамках проводимого экологического мониторинга, социально-гигиенических практик, установления норм при эксплуатации территории и использовании ресурсов [1]. Особую роль в этом аспекте занимает токсикологическая квантификация среды [2, 3], что важно в антропогенно напряженном регионе Центрального Донбасса [4, 5].

При проведении экологического мониторинга на территории затяжного социально-политического конфликта использование высокоточных датчиков и средств сбора наземной информации ограничены, тем более, что каждое из таких устройств может рассматриваться как объект дистанционной передачи актуальной информации о состоянии инфраструктуры, что опасно для населения и полностью запрещено в целях сохранности имущества. В таких обстоятельствах (полевых ограничений и отсутствия специализированной диагностической техники) растительные организмы, ведущие прикрепленный образ жизни и проявляющие индикаторную структурно-функциональную пластичность, являются уникальными биомониторами, использование которых позволяет проводить широкомасштабные полноценные эксперименты по установлению экологического состояния в локальных экотопах техногенной области [6].

Цель работы – на примере модельного вида природной флоры Донбасса *Verbascum* (тератогенеза) в условиях антропогенных трансформаций среды, сравнить данные с общим фитотератогенезом на всей территории мониторинговой сети в Центральном Донбассе.

Материалы и методы исследования

Опорной разработкой по тератогенезу растений в Приазовье является издание 2005 года в Донецком ботаническом саду под руководством профессора А.З. Глухова и соавторов А.И. Хархоты, А.С. Назаренко и А.Ф. Лиханова, где указаны терминологические особенности и причинно-следственные связи возникновения атипичного морфогенеза (в патологии), если на фоне естественных причин (коаций) велик уровень техногенного загрязнения и(или) механической трансформации

экосистем. В продолжении к этой работе обзорная обобщающая информация о спектрах тератогенных проявлений содержится в публикациях научных сотрудников кафедры ботаники и экологии Донецкого государственного университета [7].

Биоиндикация на основе тератогенеза считается приоритетным направлением в экологической диагностике. Данные об индикаторных видах широко представлены на региональных и общенациональных выставках.

При обнаружении геохимических контрастов и новых ингредиентных аномалий в окружающей среде использовали методы атомно-абсорбционного и нейтронно-активационного анализа, опубликованные в предыдущих публикациях [6–8]. ГИС-технологии и элементы математической обработки результатов проведены в программах картографического моделирования, стандартных пакетов статистики с использованием метода главных компонент. Система предусматривает сбор информации в узлах локализации мониторинговой сети на всей доступной для анализа территории Центрального Донбасса и на основании индикаторных особенностей растений, выявленных по шкалам структурного морфогенеза отдельных органов и тканей растений природной флоры. В сезон сборов 2024 г. апробирован подход аутидикационного метода на основании диагностической роли отдельного вида растений с широкой экологической амплитудой.

Результаты исследования

Установлено, что из 250 анализируемых типичных растений природной флоры Донбасса генеративная сфера *Verbascum lychnitis* по структуре цветков и соцветий проявляет существенный полиморфизм, что также подробно с формулами цветков и схемами трансформации было отмечено и в обобщающей сводке по тератогенезу в Донецком ботаническом саду. Однако сведения по габитуальной морфотипичности, то есть архитектонике соцветий, а также графическому изображению структуры цветка по его типичной диаграмме использованы в данной работе впервые.

В диапазоне морфологической типификации *V. lychnitis* (Рис. 1) представлены побеги и система побегообразования преимущественно генеративной части растения.



Рисунок 1. Габитуальная представленность *Verbascum lychnitis* L. в природных и антропогенно трансформированных экотопах Донбасса

Для объектов техногенной инфраструктуры – металлургического комплекса, например, характерны следующие тератогенные преобразования: 1) фасциации стебля (до 9%); 2) скученность побегов (до 7%) регистрируемых особей; 3) асимметрия

формирования соцветия как следствие нарушения роста механических тканей стебля (до 5%), 4) скученность междоузлий отдельных частей побега (до 4%); 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 3% регистрируемых особей). Это признаки, диагностируемые в полевых условиях при экспресс-диагностике среды.

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 андроеца, гинецея, при установлении явления дистопии, полимеризации и олигомеризации частей цветка, также если наблюдалась пролификация одного цветка в другой на верхушечных почках цветоноса.

Выделено два вектора устойчивых тенденций по причине загрязнения в результате факторов техногенеза по равноприближению к источникам загрязнения металлургических комбинатов – линия Ft, а также в тренде непосредственного воздействия полемостресса, зоны которого определены ранее для территории Донбасса периода 2023–2024 гг. – вектор Fw (Рис. 2).

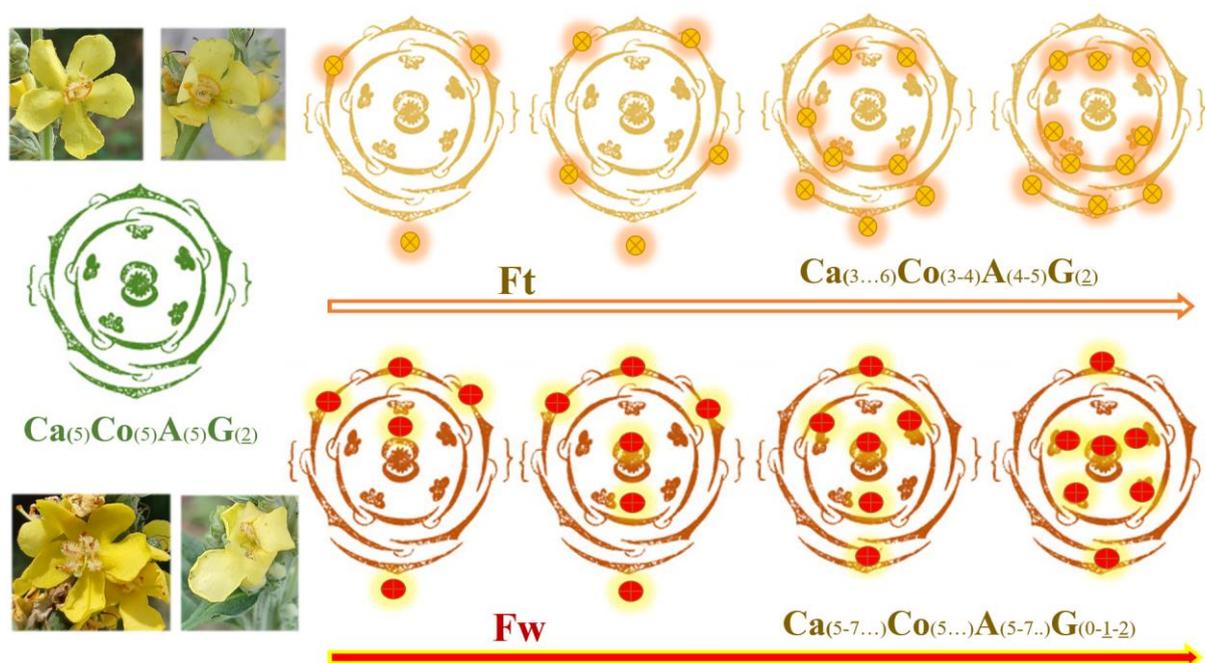


Рисунок 2. Тенденции тератогенеза цветка *Verbascum lychnitis* L. в тренде техногенной нагрузки (Ft) и фактора полемостресса (Fw)

В наглядном примере (Рис. 2) показаны диаграммы в норме и патологии (фотографии и схематическое изображение локусов структурной трансформации) по

мере усиления факторов воздействия. Основным принципиальным отличием возникновения патологий и нео-преобразований зоны техногенного загрязнения является сфера повреждения поверхностной части цветка (чашечка, венчик, пыльники, тычиночные нити), тогда как поражения в результате разрушительных воздействий факторов милитаризации существенным образом влияют на женскую генеративную сферу, что резко (до 85%) снижает качество семенного материала и является существенной угрозой для возможного семенного возобновления 1-2-летних растений в аборигенных популяциях. Также отмечен высокий тератогенез и низкий уровень качества пыльцевых зёрен модельного вида растения. Поэтому на конкретном примере сделано предположение о генотоксичности фактора полевостресса в условиях нестабильной социально-политической ситуации в регионе.

Составлен перечень тератных проявлений по частоте встречаемости на уровне численных показателей частей цветка *V. lychnitis* в порядке убывания: дистопия частей чашечки, появление подчашия и фасциация его с наружным кругом околоцветника, недоразвитие 1-2-3-4 тычинок, петализация тычиночных нитей, срастание чашелистиков до середины длины их отгиба, пролификация цветков, изменение окраски отгиба венчика (позеленение или альбинизм), гипергенезия одного или двух лепестков, деструкция плодолистика, деструкция или недоразвитие семязачатков, гипогенезия пыльников. В базе сравнительного анализа такие нео-адаптационные механизмы рассматриваются как реакция на факторы неблагоприятной среды и расцениваются как микроэволюционные преобразования. Такие результаты нуждаются в долгосрочном эксперименте по наблюдению за возможным наследованием приобретенных признаков в следующих поколениях. При любых результатах обнаруженной системы наследования за 30 лет целенаправленного мониторинга растений-индикаторов, в том числе описываемого модельного вида отмечены общие тенденции ксерофитизации и пайноморфности на фоне меняющейся макроклиматической ситуации в степной зоне Восточной Европы, а также при интенсификации антропогенных нарушений в природных экосистемах регионального уровня.

Разница в количественном отношении двух устойчивых тенденций тератогенеза заключается в тяготении к олигомеризации частей цветка в условиях техногенного загрязнения (по формулам на рис. 2) и более частому проявлению полимеризации характера расщепления частей цветка во всех проанализированных кругах цветочных макроструктур. Учитывая быстрое увядание соцветия после сборов, диагностика по указанным критериям также производится в полевом экспресс-режиме на витальных образцах в первой половине дня экспедиционного выезда.

Данные о структурах цветка *V. lychnitis* были сопоставлены с общей картой тератологических проявлений в Центральном Донбассе по 9-диапазонной шкале в процентном соотношении признаков в норме и патологии (Рис. 3).

Шкалы были сопоставлены таким образом, что коэффициент корреляции численных значений в 113 точках сбора образцов за последних два вегетационных сезона составил +0,97 и +0,98 соответственно, что указывает на плотное сопряжение процессов тератогенеза тест-вида и позволяет считать его модельным объектом проводимой фитоиндикации на структурном уровне организации цветка и соцветий в условиях как квазиприродных популяций, так и глубоких антропогенных трансформаций.

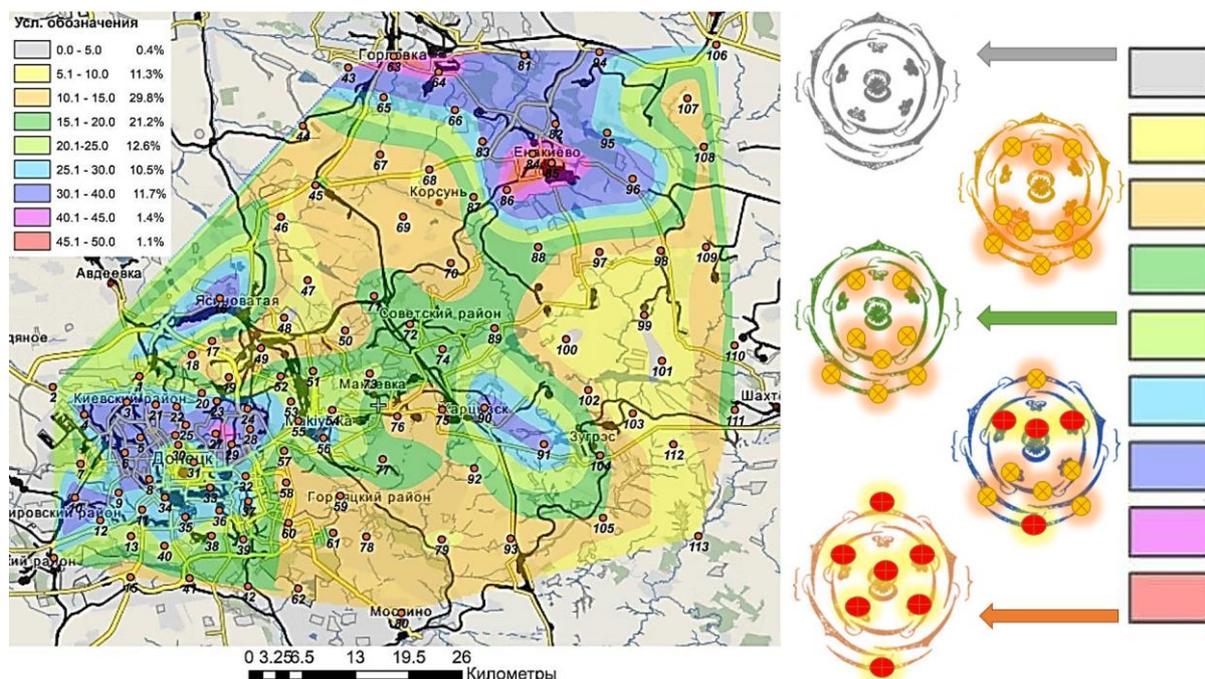


Рисунок 3. Картографическая модель общего тератогенеза растений в системе мониторинговой сети Донбасса и соответствие единой шкалы уровню тератогенеза цветка *Verbascum lychnitis* L. в антропогенных экотопах Донбасса

Картографирование признаков выявило территориально-пространственную континуальность в зонах невысокого техногенного воздействия и резкие переходы из одного диапазона в другой (Рис. 3) при констатации антропогенного контраста, связанного, как правило, с геохимическими и геофизическими нарушениями в миграционных и колебательных процессах на уровне локальных природных комплексов техногенно напряженного региона.

Важность получения картографической модели заключается в возможности цифровой аналитики, если рассматривать всю мониторинговую сеть в качестве информационного поля с более 4 млн. точками – переходными значениями между экстремальными показателями (минимума и максимума) в значении тератогенности. Но такие закономерности можно экстраполировать в случае проверенных критических точек значения индикационного показателя. Вопрос о наследовании выявленных признаков остается открытым, семенной материал будет изучен при прорастании и возможном проявлении индикационных фенов в следующих поколениях в системе реализации активного мониторинга в Донбассе.

Обсуждение и заключение

На основании полученных результатов по структуре цветка и соцветий *Verbascum* преобразованиях в растениях-индикаторах на территории индустриально развитого региона – Донбасса. Указанный вид по своей структурной организации отражает общие тенденции тератогенеза исследуемой местности, отмеченной ранее для других видов травянистых растений в рамках многокомпонентной сети экологического мониторинга. Отмечена принципиальная разница проявления патологий в условиях токсичного воздействия промышленных предприятий металлургического комплекса по сравнению с

участками жёсткого полемостресса на линии активной милитаризации в донецком экономическом регионе.

Фундаментальный аспект в изучении тератогенеза может быть выделен в рамках выявленных ответных физиологических и сопряженных с ними структурных реакций на комплексный или индивидуальный фактор стресса в условиях антропогенно трансформированной среды в разном происхождении и генезисе таких преобразований.

Дальнейшие исследования перспективны в рамках фитотестирования в более детальном территориальном аспекте, а также при разработке программы восстановления нарушенных экосистем с помощью растений-ремедиантов преимущественно почвопокровного и противозерозионного функционала.

Финансирование Донецкого государственного университета: тема № ПТНИ 1023110700153-4-1.6.19;1.6.11;1.6.12; № госучета 124051400023-4.

References:

1. Yeprintsev S., Kurolap S., Klepikov O., Shekoyan S. Assessment of the impact of technogenic air pollution on the social processes of large urbanized regions // E3S Web of Conferences. – Vol. 215. – EDP Sciences, 2020. – P. 03009. – <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021503009>
2. Minnikova T.V., Kolesnikov S.I., Kuzina A.A., Trufanov D.A., Khrapay E., Trushkov A.V. Enzymatic diagnostics of soil health of the European part of Russia with lead contamination // Soil Systems. – 2024. – Vol. 8, No. 3. – <https://doi.org/10.3390/soilsystems8030076>
3. Ermakov V., Gulyaeva U., Tyutikov S., Safonov V., Danilova V., Bech J., 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 // Environmental Geochemistry and Health. – 2020. – Vol. 42, No. 1. – P. 159-171. – <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00323-5>
4. 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. – <https://doi.org/10.1134/S1995425522070150>
5. Kharchenko N.N., Kalaev V.N., Korniyenko V.O. Mechanical resistance of *Quercus robur* L. at the environmental boundary of the species distribution in the steppe // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – P. 12049. – <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012049>
6. Nespinyi V., Safonov A. The importance of principal component analysis for environmental biodiagnostics of Donbass // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 555. – P. 01007. – <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455501007>
7. Safonov A.I., Alemasova A.S., Zinivovskaia I.I., Vergel K.N., Yushin N.S., Kravtsova A.V., Chaligava O. Morphogenetic abnormalities of bryobionts in geochemically contrasting conditions of Donbass // Geochemistry International. – 2023. – Vol. 61, No. 10. – P. 1036-1047. – <https://doi.org/10.1134/s0016702923100117>
8. Zinivovskaia 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 // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2024. – Vol. 21, No. 2. – P. 186-200. – <https://doi.org/10.1134/S1547477124020158>

Information about the author:

Safonov A.I. – corresponding author, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Botany and Ecology, Donetsk State University, Donetsk, DPR, Russian Federation.; e-mail: andrey_safonov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9701-8711>, ResearcherID: IXN-8945-2023, Scopus Author ID: 57210835692.