

## СТРУКТУРНАЯ РАЗНОКАЧЕСТВЕННОСТЬ ЭМБРИОНАЛЬНЫХ СТРУКТУР ФИТОИНДИКАТОРОВ В ДОНБАССЕ

ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»

283050, г. Донецк, ул. Щорса, 46; e-mail: andrey\_safonov@mail.ru

**Сафонов А. И.** Структурная разнокачественность эмбриональных структур фитоиндикаторов в Донбассе. – Рассмотрен вопрос информативности эмбрионального аппарата растений для экологического мониторинга промышленного региона. Используются показатели матриальной разнокачественности семян. Даны методические рекомендации по сбору семян и плодов для проведения экологической экспертизы в техногенно нагруженном регионе.

*Ключевые слова:* экологический мониторинг, эмбриональный аппарат растений, Донбасс.

### Введение

В условиях повышенного техногенеза растительные организмы проявляют различные механизмы адаптации в совокупности структурно-функциональных приспособлений. Ученые различных областей ботанических знаний рассматривают эти механизмы с позиций своих научных направлений и традиций.

Экотоксикологические программы актуальны для мировых научных школ по изучению загрязнения почв и стоянию растений на территориях промышленных стационаров и коммуникаций [9], по биологическому анализу растительных организмов при проведении токсикологического мониторинга [10], по использованию биоиндикаторов для оценки загрязнения среды при проведении натуральных экспериментов [14], по оцениванию цитотоксических, генотоксических и мутагенных эффектов в растениях после проведенных экспериментов по оптимизации загрязненных сред, субстратов и почвогрунтов различными методами биорекультивации [21].

В ботаническом научном пространстве существенными и важными для экологического мониторинга являются достижения отечественных фундаментальных школ по эмбриологии, карпологии и филогенетической систематике растений [1, 5–8, 20]. Зарубежные научные школы выделяют роль проявляющегося гетероморфизма семенного материала в различных природных и искусственных средах эксперимента, предлагают методики по оценке этого явления для разных таксоноспецифических групп, что в результате сопряжено с особенностями влияния внешних факторов среды [11–13] и указывает на необходимость использования классических методик работы с карполого-эмбриологическими структурами [6–8, 13] в прикладном аспекте проведения оценочных работ по фитомониторингу, индикации, экспертизе и квантификации регионов с повышенным уровнем гетерогенности среды и проявлении механизмов адаптации растений в условиях этих трансформаций.

В традиционном для Донбасса понимании экологический фитомониторинг сложился на базе экологической экспертизы, фитоиндикационной оценки состояния растений в различных промышленных экотопах, которая принципиально отражает основы современной фитоквантификации промышленного региона. В работах сотрудников Донецкой научной школы подчеркнута индикаторная роль растений в системе муниципальных служб населенных пунктов с повышенным уровнем антропоического воздействия [2], проведены скрининговые программы по анализу элементов диссеминации фитоиндикаторов техногенных нагрузок на эдафотопы Донбасса [3, 17], рассмотрены возможности проведения диагностики приземного слоя атмосферы в г. Донецке по спектру скульптур поверхности пыльцевых зерен доминирующих сорно-рудеральных видов растений [4], были предложены и опубликованы принципиально новые диагностические критерии и индексы для проведения комплексной фитоиндикационной оценки в Донбассе [15], на основании экспериментальных данных проведена фитоквалиметрия антропогенного прессинга и степени механотоксикологической трансформации экотопов в Донецком регионе [16], апробирован

механизм использования фитоиндикационного компонента для экосистемной стандартизации в государственных программах принципов экосистемного нормирования [18], обобщены некоторые данные по фитоиндикационному мониторингу в г. Донецке [19].

Такое разнообразие многоцелевого использования растений дает основание рассматривать научно-исследовательское направление по биоиндикации и фитомониторингу в разных актуальных аспектах, одним из которых является оценка репродуктивных стратегий реализации растений-индикаторов в гетерогенных условиях токсической нагрузки и антропогенной трансформации экотопов Донбасса.

Цель работы – представить результаты по идентификации проявления матрикальности в карполого-эмбриональных структурах растений при проведении экологического фитомониторинга в естественных и трансформированных экотопах Донбасса.

### Материал и методика исследования

Анализировали плоды *Cichorium intybus* L., *Tripleurospermum inodorum* (L.) Sch. Bip. и *Tanacetum vulgare* L., произрастающие в непосредственной близости от промышленных предприятий и на удаленных территориях для условного контроля: 1) Енакиевский металлургический завод; 2) Макеевский металлургический комбинат; 3) Донецкий металлургический завод; 4) Зуевская ТЭС; 5) Старобешевская ТЭС; 6) Енакиевский коксохимзавод; 7) Макеевский коксохимзавод; 8) буферная территория ООПТ «Донецкий Кряж»; 9) парк Ленинского комсомола (г. Донецк); 10) территория дендрария ГУ «Донецкий ботанический сад».

Для изучения морфологии плодов использовали метод косо́го освещения. Для метрических исследований получали объем выборки не менее 300 повторностей по каждому показателю. Диапазон значения факторов подвергали процессу 10-балльного шкалообразования с дальнейшим проведением фитоиндикационного анализа.

Под матрикальностью в этой серии эксперимента подразумевали степень вариабельности плодов и семян в зависимости от их расположения в соцветии. Матрикальность проявляется вследствие различного местонахождения семязачатков на материнском организме. Это определяет разный режим питания и разное влияние материнского организма даже при идентичности экологических и генетических факторов, что отражается в разнообразии структур зародышевого и околоплодного аппаратов и качества семенного материала.

В стабильных и естественных условиях произрастания видов-индикаторов матрикальность может иметь информативность об обеспеченности отдельных особей минеральными и органическими веществами, тогда как возрастающий показатель разнокачественности семян при токсической нагрузке имеет информативно-индикаторное значение. Особое место в матрикальной гетероспермии имеют симметрия и асимметрия в развитии растений, плодов и семян. Дисимметрический полиморфизм наблюдается в том случае, если качественно одинаковые объекты имеют различные формы дисимметрии.

Индукцированная гетероспермия проявляется в первую очередь в размерах семени, при этом порознь могут изменяться размеры семядолей, зародыша, эндосперма и других эмбриональных структур. Исходя из положения, что цитогенетические и физиолого-биохимические отклонения, которые наблюдаются в развитии растения, вследствие влияния разных факторов обуславливают определенную изменчивость морфо-анатомических конструкций отдельных органов, в этой серии экспериментов для констатирования степени гетерокарпии и гетероспермии использовали абсолютные размеры плодов и структуры, соответствующие семенному аппарату. Для этого дифференцировали такие показатели: m-1 – средняя длина плодов всех особей, m-2 – средняя длина плодов одного сформированного соцветия, m-3 – средняя длина семян всех особей, m-4 – средняя длина семян одного сформированного соцветия. Эти метрические показатели были положены в основу создания специфических индексов (МГК, ГК, МГС и ГС).

Для установления причинной связи возникновения или стимулирования появления гетероструктурных элементов должен быть разработан определенный статистический или модельный аппарат. Для этого определяли четыре показателя: МГК – индекс матрикальной гетерокарпии в широком понимании, ГК – индекс матрикальной гетерокарпии в узком понимании, МГС – индекс матрикальной гетероспермии в широком понимании, ГС – индекс матрикальной гетероспермии в узком понимании. При установлении индексов МГК, ГК, МГС и ГС использовали данные статистической обработки, а именно коэффициент вариации (CV), значения которого указывают на степень вариабельности признаков, в данном случае – длины плодов и семян. Поэтому 10-балльная индикаторная шкала была сформирована по диапазону варьирования показателей коэффициента вариации, которые и указывали на значения индексов степени карполого-эмбриологической матрикальности.

### Результаты и обсуждение

В случае с *Cichorium intybus*, *Tripleurospermum inodorum* и *Tanacetum vulgare* наблюдаемая разница в строении генеративных диаспор зафиксирована при эквивалентной гетерохолокарпии, когда односемянные плоды значительно отличаются по размерам, форме, анатомическому строению перикарпа, характером скульптурированности поверхности плода. Были детально рассмотрены основные показатели карпо-эмбриогенеза индикаторных видов. В норме семянки *C. intybus*, *T. inodorum* и *T. vulgare* образуются из нижней завязи. Срастание плодолистиков с цветочной трубкой в этом случае настолько плотное, что на протяжении всего периода развития стенки плода нельзя провести четкую границу между перикарпом и цветочной трубкой. Из внешнего эндосперма (дву-трехклеточный слой) формируется плотный слой. Оболочки клеток этой ткани сравнительно более утолщенные. Между эндоспермом и остатками интегумента (одноклеточный прерывистый слой) образуется гиалиновая оболочка, покрытая кутикулой, которая, в свою очередь, представлена кутикулой нуцеллуса и кутикулой интегумента. При полном созревании плода внешние слои стенки не разрушаются и формируют гомогенное покрытие семянки.

Для *C. intybus* и *T. inodorum* была экспериментально рассчитана унифицированная шкала (табл. 1), а показатели МГК, ГК, МГС и ГС для *T. vulgare* значительно отличались по диапазону варьирования, поэтому для этого вида была сформирована отдельная индикаторная шкала (табл. 2).

Таблица 1

### Шкала варьирования показателей структурной пластичности *Cichorium intybus* L. и *Tripleurospermum inodorum* (L.) Sch. Bip. по степени их карполого-эмбриологической матрикальности

№ интервала (индекс)	МГК, %	ГК, %	МГС, %	ГС, %
1	<5,00	<2,00	<5,00	<2,50
2	5,00-7,49	2,00-2,99	5,00-7,49	2,50-4,99
3	7,50-9,99	3,00-3,99	7,50-9,99	5,00-7,49
4	10,00-12,49	4,00-4,99	10,00-12,49	7,50-9,99
5	12,50-14,99	5,00-5,99	12,50-14,99	10,00-12,49
6	15,00-19,99	6,00-6,99	15,00-19,99	12,50-14,99
7	20,00-24,99	7,00-7,99	20,00-29,99	15,00-17,49
8	25,00-29,99	8,00-8,99	30,00-39,99	17,50-19,99
9	30,00-34,99	9,00-9,99	40,00-49,99	20,00-22,49
10	≥35,00	≥10,00	≥50,00	≥22,50

Примечание. МГК – индекс матрикальной гетерокарпии в широком понимании, ГК – индекс матрикальной гетерокарпии в узком понимании, МГС – индекс матрикальной гетероспермии в широком понимании, ГС – индекс матрикальной гетероспермии в узком понимании.

**Шкала варьирования показателей структурной пластичности *Tanacetum vulgare* L.  
по степени их карполого-эмбриологической матриальности**

№ интервала (индекс)	МГК, %	ГК, %	МГС, %	ГС, %
1	<5,00	<2,00	<5,00	<1,50
2	5,00-7,49	2,00-2,49	5,00-7,49	1,50-2,49
3	7,50-9,99	2,50-2,99	7,50-9,99	2,50-3,49
4	10,00-12,49	3,00-3,49	10,00-12,49	3,50-4,49
5	12,50-14,99	3,50-3,99	12,50-14,99	4,50-5,49
6	15,00-17,49	4,00-4,49	15,00-17,49	5,50-6,49
7	17,50-19,99	4,50-4,99	17,50-19,99	6,50-7,49
8	20,00-22,49	5,00-5,49	20,00-29,99	7,50-8,49
9	22,50-24,99	5,50-5,99	30,00-39,99	8,50-9,49
10	≥25,00	≥6,00	≥40,00	≥9,50

Примечание. МГК – индекс матриальной гетерокарпии в широком понимании, ГК – индекс матриальной гетерокарпии в узком понимании, МГС – индекс матриальной гетероспермии в широком понимании, ГС – индекс матриальной гетероспермии в узком понимании.

Разбросы интервальных значений показателей матриальности соответствовали теоретически ожидаемым: наибольшей вариабельностью характеризовались матриальная гетероспермия и гетерокарпия в широком понимании по коэффициенту вариации средней длины семян всех особей. Экспериментально была установлена сопряженность показателей МГК, ГК, МГС и ГС с одинаковыми тенденциями для трех опытных видов растений.

Значения индексов матриальности для *C. intybus* представлено по пробным площадям в табл. 3., для *T. inodorum* – в табл. 4 и *T. vulgare* – в табл. 5.

Таблица 3

**Карполого-эмбриологическая матриальность *Cichorium intybus* L.**

Пробная площадь	МГК	ГК	МГС	ГС
1	12,20	7,50	7,45	18,90
2	13,03	6,56	11,23	12,43
3	15,90	7,51	17,28	15,16
4	5,21	3,98	4,55	7,10
5	5,50	3,80	7,20	7,15
6	12,05	6,50	12,20	12,31
7	14,92	7,50	16,20	15,64
8	3,26	1,43	4,82	2,25
9	3,28	4,13	4,01	9,52
10	2,03	2,45	4,32	2,30

По установленному диапазону индекса матриальности для *C. intybus* выделяются отдельно территории металлургических заводов, теплоэлектростанций, коксохимических заводов и зон, условно соответствующих контролю. Индексы обеспечивают диапазоны шкалы от 1 до 8-9 преимущественно для территорий промышленных площадок с высоким уровнем токсической нагрузки. Минимальные индексы варьирования отмечены для территории дендрария Донецкого ботанического сада (по МГК) и буферной территории ООПТ Донецкий Краж (по ГК).

**Карполого-эмбриологическая матрикальность  
*Tripleurospermum inodorum* (L.) Sch. Bip.**

Пробная площадь	МГК	ГК	МГС	ГС
1	12,78	8,43	12,38	14,93
2	13,48	7,21	18,09	17,37
3	35,12	26,09	57,89	22,99
4	6,03	3,46	6,83	7,43
5	7,20	2,13	7,40	2,60
6	62,03	9,06	61,59	28,08
7	61,20	9,40	63,13	27,01
8	3,06	1,09	3,16	2,03
9	2,00	3,24	3,00	5,83
10	3,02	3,17	4,16	6,69

Из анализа варьирования индексов матрикальности для *T. inodorum* особо высокими показателями выделены территории коксохимических заводов в городах Макеевке и Енакиево и на территории промышленных площадок Донецкого металлургического завода. Для контрольных зон (согласно предложенным шкалам фитоиндикационной оценки) территории характеризуются значением показателя в пределах 1–3 баллов, что соответствует нормальному значению. Важен факт высоких значений МГС на пробных площадях 3, 6, 7 и относительно низких на площадях 1 и 2, что требует детального элементного анализа содержания отдельных токсических элементов с природных средах этих территорий.

Таблица 5

**Карполого-эмбриологическая матрикальность *Tanacetum vulgare* L.**

Пробная площадь	МГК	ГК	МГС	ГС
1	25,17	12,32	45,19	5,73
2	25,10	11,03	44,16	10,42
3	24,10	10,32	44,10	5,05
4	13,50	5,60	16,64	7,27
5	13,40	4,28	16,81	7,45
6	12,49	5,40	10,03	7,12
7	12,59	4,93	11,16	6,03
8	3,01	3,24	4,41	3,69
9	5,89	4,30	5,23	6,52
10	3,96	2,73	2,00	1,89

Вид *T. vulgare* в большей степени тяготеет к трансформации среды при повышенных уровнях загрязнения тяжелых металлов в металлургическом производстве. Так, самые высокие значения показателя МГС – более 10 баллов – зарегистрированы именно на территориях металлургических предприятий; территории теплоэлектростанций также формируют небольшие в пределах 4-7 баллов зоны загрязнения, которые, по-видимому, также связаны с разностью сезонных использований при загрязнении среды и повышении дальнейшего уровня полиморфизма изучаемых растений. Минимальные значения матрикальности для вида *T. vulgare* также тяготеют к зонам условного контроля при отдалении от непосредственного влияния выбросов промышленных предприятий.

Таким образом, гетерогенность условий произрастания растений, морфопластичных по своей природе, приводит к паратипической пластичности семян и плодов, что стимулирует возникновение и проявление гетеро(карпо)спермии, которая, вероятно, является информативным показателем степени загрязнения почв тяжелыми металлами и другими элементами и их соединениями, формирующими повышенный неблагоприятный токсический фон на этих территориях.

При установлении атипичной (существенно увеличенной) матриальности необходимо констатировать факт наличия дисимметричного полиморфизма, который может быть естественным и стимулировано-индуцированным в контрастных условиях антропогенно измененной среды. В зонах промышленного загрязнения для плодов и содержащихся в них семян *C. intybus*, *T. inodorum* и *T. vulgare* мы устанавливали различные формы дисимметрии и высокий уровень дисимметричного полиморфизма эмбриональных структур. Комплексный показатель асимметрии плодов *C. intybus*, *T. inodorum* и *T. vulgare* часто связан со многими гистологическими трансформациями: дисимметричность проявляется при атипичном строении таких анатомических структур, как дерматоген, корневой чехлик, протодермальные образования разных сторон зародыша, где формируются разные по количеству клеток ткани (ярусность) вследствие гетеротенденциозных периклинальных делений. Следовательно, при выяснении причин проявления матриальности и возможности использования этого показателя в экологическом мониторинге промышленного региона, необходимы также данные о гистоструктурных преобразованиях эмбриональных аппаратов уже используемых индикаторных видов растений.

### Выводы

Эмбриональные структуры растений формируют информативное пространство, которое при использовании в фитоиндикационном мониторинге имеет диагностические характеристики. Показатели матриальной разнокачественности *Cichorium intybus* L., *Tripleurospermum inodorum* (L.) Sch. Bip. и *Tanacetum vulgare* L. апробированы для некоторых территорий, что имеет достоверно важное экспертное значение для оценки состояния среды в техногенно нагруженном регионе.

### Список литературы

1. Макрушин Н. М. Основы гетеросперматологии / Н. М. Макрушин – М. : Агропромиздат, 1989. – 287 с.
2. Сафонов А. И. Индикаторная роль растений в системе управления городом в промышленном регионе / А. И. Сафонов // Экологическая ситуация в Донбассе : проблемы безопасности и рекультивации повреждённых территорий для их экономического возрождения. – М. : Изд-во МНЭПУ, 2016. – С. 288-294.
3. Сафонов А. И. Скрининг элементов диссеминации фитоиндикаторов техногенных нагрузок на эдафотопы Донбасса / А. И. Сафонов, А. З. Глухов // Материалы Междунар. конф., посвященной 90-летию со дня основания заповедника «Хомутовская степь». – Донецк : «Ноулидж» (Донецкое отделение), 2016. – С. 55-57.
4. Сафонов А. И. Диагностика воздуха в г. Донецке по спектру скульптур поверхности пыльцы сорно-рудеральных видов растений / А. И. Сафонов, Н. С. Захаренкова // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2016. – № 1–2. – С. 18-24.
5. Сухоруков А. П. Карпология семейства *Chenopodiaceae* в связи с проблемами филогении, систематики и диагностики его представителей / А. П. Сухоруков. – Тула : Гриф и К, 2014. – 400 с.
6. Эмбриология цветковых растений. Терминология и концепции / Под ред. Т. Б. Батыгиной. – Генеративные органы цветка. – С.-Пб. : Мир и семья, 1994. – Т. 1. – 320 с.
7. Эмбриология цветковых растений. Терминология и концепции / Под ред. Т. Б. Батыгиной. – Семя. – С.-Пб. : Мир и семья, 1997. – Т. 2. – 823 с.

8. Эмбриология цветковых растений. Терминология и концепции / Под ред. Т. Б. Батыгиной. – Системы репродукции. – С.-Пб. : Мир и семья, 2000. – Т. 3. – 640 с.
9. Cruz J. M. Phytotoxicity of soil contaminated with petroleum derivatives and biodiesel / J. M. Cruz, P. R. M. Lopes, R. N. Montagnolli, I. S. Tamada // *Ecotoxicol. environ. contam.* – 2013. – Vol. 8, N 1. – P. 49-54.
10. Iqbal M. Vicia faba bioassay for environmental toxicity monitoring : a review / M. Iqbal // *Chemosphere.* – 2016. – Vol. 144. – P. 785-802.
11. Mandak B. Seeds heteromorphysm and life cycle of plants : a literature review / B. Mandak // *Preslia.* – 1997. – N 69. – P. 129-159.
12. Mandak B. Is hybridization involved in the evolution of the *Chenopodium album* aggregate? An analysis based on chromosome counts and genome size estimation // B. Mandak, P. Travnicek, L. Pastova, D. Korinkova // *Flora.* – 2012. – Vol. 207. – P. 530-540.
13. Metcalfe C. R. Anatomy of the dicotyledons. II. Wood structure and conclusion of the general introduction / C. R. Metcalfe, L. Chalk. – Oxford : Clarendon Press, 1983. – 290 p.
14. Parmar T. K. Bioindicators : the natural indicator of environmental pollution / T. K. Parmar, D. Rawtani, Y. K. Agrawal // *Frontiers in life science.* – 2016. – Vol. 9, N 2. – P. 110-118.
15. Safonov A. I. New diagnostic criteria of complex phytoindication for approbation in Donbass / A. I. Safonov // *Problems of ecology and nature protection of technogenic region.* – 2008. – Vol. 8, N 1. – P. 91-96.
16. Safonov A. I. Phyto-qualimetry of toxic pressure and the degree of ecotopes transformation in Donetsk region / A. I. Safonov // *Problems of ecology and nature protection of technogenic region.* – 2013. – Vol. 13, N 1. – P. 52-59.
17. Safonov A. I. Initial screening of seed bank of phytoindicators of technogenic pressure on edaphotopes in Donbass / A. I. Safonov // *Problems of ecology and nature protection of technogenic region.* – 2010. – Vol. 10, N1. – P. 92-96.
18. Safonov A. I. Approbation of ecosystem standardization criteria according to phytoindication component / A. I. Safonov // *Problems of ecology and nature protection of technogenic region.* – 2012. – Vol. 12, N 1. – P. 108-114.
19. Safonov A. I. Phytoindicational monitoring in Donetsk / A. I. Safonov // *A science. Thought : Scientific journal.* – 2016. – N 4. – P. 58-70.
20. Sukhorukov A. P. One-seeded fruits in the core Caryophyllales: their origin and structural diversity / A. P. Sukhorukov, E. V. Mavrodiev, M. Struwig et al. // *Plos One.* – 2015. – Vol. 10, N 2. – P. 1-38.
21. Ventura-Camargo B. C. Assessment of the cytotoxic, genotoxic and mutagenic effects of the commercial black dye in *Allium cepa* cells before and after bacterial biodegradation treatment / B. C. Ventura-Camargo, D. F. Angelis, M. A. Marin-Morales // *Chemosphere.* – 2016. – Vol. 161. – P. 325-332.

**Safonov A. I. Diversity in the quality of embryonic structures of phytoindicators in Donbass.** – The problem of informative value of the embryonic apparatus of plants for environmental monitoring of an industrial region has been considered. Indices of matrilineal diversity of plants have been used. Methodical recommendations on seeds and fruits collection for environmental impact assessment in a technologically disturbed region have been given.

*Key words:* environmental monitoring, embryonic apparatus of plants, Donbass.