

---

## АНАТОМИЯ И МОРФОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ

---

УДК 581.2 : 581.3 : 581.52 (470.60)

### АНОМАЛИИ ЭМБРИОНАЛЬНЫХ СТРУКТУР РАСТЕНИЙ-ИНДИКАТОРОВ ДОНБАССА

© А. И. Сафонов  
A. I. Safonov

#### Abnormalities of embryo structures in Donbass indicator plants

ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», кафедра ботаники и экологии  
283050, Россия, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, ул. Щорса, д. 46. Тел.: +7 (949) 321-77-45, e-mail: a.safonov@donnu.ru

Аннотация. Выделены примеры атипичного строения эмбрионального аппарата растений-индикаторов в Донбассе. Многолетний опыт проведения фитоиндикационного эксперимента (1998–2022 гг.) позволил выявить учётные площадки с контрастными геохимическими характеристиками и монодоминантным ингредиентным загрязнением. Регистрируемые аномалии рассмотрены как варианты крайнего структурного полиморфизма растений природной флоры в условиях специфического стресса техногенной среды. Для фитотестеров *Amaranthus retroflexus* L., *Atriplex patula* L., *Capsella bursa-pastoris* (L.) Medik., *Diploaxis muralis* (L.) DC., *Polygonum aviculare* L., *Reseda lutea* L. и *Senecio vulgaris* L. рассчитаны интегральные показатели состояния генеративных систем (2019–2021 гг.) по строению пыльцы, частоте встречаемости тератологических проявлений в эмбриональном аппарате и успешности прорастания семенного материала. Приведены примеры специфического проявления деградаций и новообразований в структурах эмбриональных тканей растений. Морфологический эксперимент реализован в констатации контрастных уровней доминантных загрязнителей, что позволяет рекомендовать специфические признаки строения растений в качестве маркеров для экологического мониторинга природных сред. Сделано предположение о влиянии отдельных тканевых трансформаций в зародышевых структурах на качество семенного материала в целом и способы формирования адаптационной гетероспермии.

Ключевые слова: эмбриология растений, фитоиндикация, фитопатология, экологический мониторинг, Донбасс.

Abstract. Examples of atypical structure of the embryonic apparatus of indicator plants in the Donbas are highlighted. Many years of experience in conducting phytoindication experiments (1998–2022) made it possible to identify accounting sites with contrasting geochemical characteristics and monodominant ingredient pollution. Registered abnormalities are considered as variants of extreme structural polymorphism of plants of natural flora under conditions of specific stress of the technogenic environment. For phytotesters *Amaranthus retroflexus* L., *Atriplex patula* L., *Capsella bursa-pastoris* (L.) Medik., *Diploaxis muralis* (L.) DC., *Polygonum aviculare* L., *Reseda lutea* L. and *Senecio vulgaris* L. integral indicators of the state of generative systems (2019–2021) were calculated according to the structure of pollen, the frequency of occurrence of teratological manifestations in the embryonic apparatus and successful seed germination. Examples of specific manifestations of degradation and neoplasms in the structures of plant embryonic tissues are given. The morphological experiment was implemented in the ascertainment of contrasting levels of dominant pollutants, which makes it possible to recommend specific features of plant structure as markers for ecological monitoring of natural environments. An assumption about the influence of individual tissue transformations in germinal structures on the quality of seed material in general and on the methods of formation of adaptive heterospermia was made.

Keywords: plant embryology, phytoindication, phytopathology, ecological monitoring, Donbass.

DOI: 10.22281/2686-9713-2022-3-5-18

### Введение

Структурная гетерогенность растений в контрастных средах является естественным фундаментальным процессом адаптационного характера (Sultan, 1995; Callaway et al., 2003; Cherednichenko et al., 2022; Raduła et al., 2022;). Фитоиндикация как один из прикладных аспектов эколого-ботанических разработок является объектом изучения многих научных школ

и исследовательских коллективов (Bulokhov, 2004; Neverova, 2009; Mandra, 2010; Gusev, 2016). Для регионов с повышенными антропогенными рисками актуальной является информация об уровнях негативных воздействий на природные компоненты и специфике возможного загрязнения экотопов (Suntsova et al., 2011; Yeprintsev et al., 2013; Parmar et al., 2016; Pozolotina et al., 2017; Khondhodjaeva et al., 2018; Terekhina, Ufimtseva, 2020; Madheshiya et al., 2022). Такие данные реализуются в существующих программах по экологическому мониторингу в донецком регионе (Safonov, 2020 b, c; Safonov, Glukhov, 2021 a, b).

Цель работы – обобщив многолетний опыт фитомониторингового назначения в Донбассе (1998–2022 гг.), выделить отдельные случаи отклонений от структурной нормы по эмбриональным признакам растений-индикаторов из числа природной флоры Северного Приазовья в корреляции с возможными факторами ингредиентного токсического действия.

Представленные в работе данные являются продолжением фитоиндикационных исследований целевого мониторингового назначения по критериям анатомо-морфологической атипичности растений (Safonov, 2019, 2022; Safonov, Glukhov, 2021), в частности, в аспекте строения генеративных органов растений (Safonov, 2017, 2020 a, 2021 b; Safonov, Mirnenko, 2019) для техногенных и урбанизированных систем в Донбассе.

### **Методы и материалы исследований**

Экспериментальная площадка натурального наблюдения объединена узлами локализации мониторинговой сети Центрального Донбасса (113 постоянных стационаров по всей территории и 120 точек – в черте г. Донецк). Результаты, представленные в настоящей работе, являются вторично подтверждёнными после идентификации атипичных строений растений в эмбриональном и целостно семенном материале (с неразрывным морфогенетическим влиянием структур плода).

В 2017 г. были выбраны 10 учётных площадок для территории г. Донецк и 12 – по всей территории мониторинговой сети с различными характеристиками контрастного загрязнения в установленных специфических условиях моноингредиентного доминирования конкретного загрязнителя в корнеобитаемом слое почвы. Для установления возможных причинно-следственных связей отдельных элементов-загрязнителей предположительно техногенного характера поступления в окружающую среду контрольные образцы семенного материала также были проанализированы по содержанию искомым элементов. Все подтверждённые предположения о связи в системе «индикатор – индикат» за период сборов 2019–2021 гг. представлены в табличных результатах сводках.

Особенности терминологии и способы установления ботанико-структурной организации на эмбриональном уровне согласованы по данным литературы (Mandak, 1997; Embriologia..., 1994, 1997, 2000; Obschchaia..., 2010; Spitsyn, 2011; Yudakova et al., 2012; Shamrov, 2015; Ramírez et al., 2022) с добавлениями дефиниций по гетеросперматологии (Makrushin, 1989) и отдельными морфологическими характеристиками типичных таксонов (Bremer, 1994; Sukhorukov et al., 2015; Zaika et al., 2020) для исследуемой местности. Показатель реального качества ризоидальной части зародышевых структур устанавливали по методике Т. И. Кравсун (Kravsun, 2020).

Содержание элементов по приоритетному списку загрязнителей определено методом атомно-абсорбционного анализа в аттестованной лаборатории на кафедре аналитической химии Донецкого национального университета и методом нейтронно-активационного анализа в лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка Объединённого института ядерных исследований (г. Дубна, Россия). Ландшафтно-экологические методы использованы в рекомендациях по организации мониторинговых программ для промышленных регионов (Tscharntke et al., 2005; Pogányová et al., 2017; Bekuzarova et al., 2018; Kumar, 2018; Plekhanova et al., 2019; Yeprintsev et al., 2019; Erdős et al., 2022). Обоснование геохимического контраста среды в обследованных локалитетах (табл. 1) было проведено нами ранее (Safonov, Glukhov, 2022).

В работе использованы три интегральных показателя (2019–2021 гг.): 1) РМ – пыльцевой метод по проценту дефектных пыльцевых зёрен при использовании красителя метиленового синего; 2) ЕЕ – эмбриотоксический эффект с определением по частоте встречаемости aberrантных семязачатков и тератологической схизокотилии видов-индикаторов; 3) RRP – показатель реализации репродуктивного потенциала, установлен по критерию всхожести семенного материала. Указанные интегральные показатели рассчитаны в совокупности для условия наличия в мониторинговой точке следующих семи видов *Amaranthus retroflexus* L., *Atriplex patula* L., *Capsella bursa-pastoris* (L.) Medik., *Diploaxis muralis* (L.) DC., *Polygonum aviculare* L., *Reseda lutea* L. и *Senecio vulgaris* L. Если в мониторинговой точке были зарегистрированы атипичные эмбриотоксические эффекты для других видов растений, в таблицах они указаны отдельно. Изучены признаки морфологической пластичности растений фенотипической природы, по методическому принципу перепроверки ненаследуемости в следующих поколениях (Safonov, 2019). Все учётные площадки по ландшафтным характеристикам выбраны как типично степные.

### Результаты исследований

В настоящей работе к категориям аномалий эмбриональных структур растений отнесены единичные случаи крайнего (сверхнормативного) строения частей зародышевого (семенного) аппарата, которые в 10-балльных шкалах варьирования признака, как правило, обозначены индексом 10 и представляют собой пороговое состояние между нормой и необратимой патологией (уродством, чаще связанным с нежизнеспособностью и генными нарушениями).

В соответствии с поставленной целью были установлены эндемичные аномалии с конкретным геолокалитетом (координатными данными) и в привязке к фактору доминирующего загрязнения. Проведённый эксперимент обусловлен невозможностью воспроизведения (получения индуцируемых аномалий в эмбриональном аппарате) в монофакторных лабораторных исследованиях, поэтому потребовалась трёхлетняя повторность данных в ландшафтном опыте открытого типа (2019–2021 гг.).

Для регистрации аномалий было сформировано рабочее требование: встречаемость не меньше, чем у трёх особей в одном локалитете и повторение в каждом вегетационном сезоне с 2019 по 2021 гг., поэтому в сложившихся обстоятельствах аномалии предположительно рассмотрены как эндемичные сверхструктурные проявления специфического воздействия доминирующего фактора геохимической природы в техногенных условиях промышленного региона.

Табл. 1 (экотопы г. Донецк) и 2 (для экотопов Центрального Донбасса) структурированы по указанию в них:

- координат учётных площадок, в которых зарегистрированы локально детерминированные высокие уровни содержания доминирующего загрязнителя (превышающие ПДК более чем в 7 раз);
- видов растений из группового фитотестирования для расчёта некоторых интегральных показателей репродуктивной сферы, значения этих показателей;
- видов с единичной регистрацией их наличия на учётной площадке, но с устойчивой формой выявленных атипичных строений в эмбриональном аппарате;
- локализаций аномалий (гистоструктурные или органогенные);
- установленного доминирующего загрязнителя, наличие которого подтверждено в накопительных концентрациях также и для семенного материала (преимущественно экологичный показатель, но с указанием видоспецифичности при выявлении таковой).

В системе учётных площадок (табл. 2) на территории Центрального Донбасса с выявленными сверхвысокими монодоминантными концентрациями отдельных элементов-загрязнителей были задействованы экотопы городских агломераций Донецка, Макеевки, Ясиноватой, Зуевки, Зугрэса, Тореза и Снежного.

Таблица 1

Аномалии эмбриональных структур в растениях-индикаторах экотопов г. Донецк

Table 1

Abnormalities of embryonic structures in indicator plants of ecotopes in Donetsk

Координаты	Виды	Признаки			DP
		PM	EE	RRP	
48°01'10,2"N; 37°47'26,3"E	<i>Amaranthus retroflexus</i> L.	22,4	10,1	92,8	гипофункция гиалиновой оболочки
	<i>Atriplex patula</i> L.				прозенхимная деградация дерматогена
	<i>Capsella bursa-pastoris</i> (L.) Medik.				гипофункция гиалиновой оболочки
	<i>Diploaxis muralis</i> (L.) DC.				прозенхимная деградация дерматогена
	<i>Polygonum aviculare</i> L.				аберрантные семязачатки
	<i>Reseda lutea</i> L.				дистопия базального тела
	<i>Senecio vulgaris</i> L.				прозенхимная деградация дерматогена
	<i>Dactylis glomerata</i> L.				гипофункция гиалиновой оболочки
	<i>Dactylis glomerata</i> L.				деформация семенной кожуры
48°01'22,1"N; 37°48'03,1"E	<i>A. retroflexus</i>	33,0	12,4	95,4	деградация внешнего эндосперма
	<i>A. patula</i>				элиминация слоя экзотесты
	<i>C. bursa-pastoris</i>				гипергенезия гиалиновой оболочки
	<i>D. muralis</i>				деградация внешнего эндосперма
	<i>P. aviculare</i>				гипергенезия гиалиновой оболочки
	<i>R. lutea</i>				деградация внешнего эндосперма
	<i>S. vulgaris</i>				фасциации фертильных плодolistиков
	<i>Berteroa incana</i> (L.) DC.				гипергенезия мезотесты
	<i>Berteroa incana</i> (L.) DC.				гипергенезия гиалиновой оболочки
48°01'22,9"N; 37°48'50,3"E	<i>Echium vulgare</i> L.	32,1	13,6	95,3	элиминация слоя экзотесты
	<i>A. retroflexus</i>				деградация эндосперма
	<i>A. patula</i>				асимметричность семядолей
	<i>C. bursa-pastoris</i>				деградация эндосперма
	<i>D. muralis</i>				деградация экзо- и мезотесты
	<i>P. aviculare</i>				асимметричность семядолей
	<i>R. lutea</i>				деградация эндосперма
	<i>S. vulgaris</i>				расщепление (хориза) фуникулюса
	<i>S. vulgaris</i>				асимметричность семядолей
48°00'34,2"N; 37°47'22,4"E	<i>S. vulgaris</i>	18,5	8,2	94,4	деградация экзо- и мезотесты
	<i>Tripleurospermum inodorum</i> (L.) Sch. Bip.				полимеризация перисперма
	<i>A. retroflexus</i>				деградация структур микропиле
	<i>A. retroflexus</i>				гипофункция гиалиновой оболочки
	<i>A. patula</i>				прозенхимная деградация дерматогена
	<i>C. bursa-pastoris</i>				гипофункция гиалиновой оболочки
	<i>D. muralis</i>				деградация эндосперма
	<i>P. aviculare</i>				гипофункция гиалиновой оболочки
	<i>P. aviculare</i>				аберрантные семязачатки
48°00'35,7"N; 37°48'00,1"E	<i>R. lutea</i>	44,5	13,6	91,3	прозенхимная деградация дерматогена
	<i>S. vulgaris</i>				фасциации стерильных плодolistиков
	<i>Plantago lanceolata</i> L.				полимеризация перисперма
	<i>Sisymbrium polymorphum</i> (Murray) Roth				аберрантные семязачатки
	<i>A. retroflexus</i>				элиминация семенного эпителия
	<i>A. patula</i>				деградация дерматогена
	<i>C. bursa-pastoris</i>				аберрантные семязачатки
	<i>D. muralis</i>				элиминация семенного эпителия
	<i>P. aviculare</i>				аберрантные семязачатки
<i>P. aviculare</i>	деградация дерматогена				
<i>P. aviculare</i>	элиминация семенного эпителия				

Координаты	Виды	Признаки			DP			
		PM	EE	RRP		Локализация аномалии		
	<i>R. lutea</i>							
	<i>S. vulgaris</i>				деградация дерматогена аберранные семязачатки			
	<i>Tripleurospermum inodorum</i> (L.) Sch. Bip.				элиминация семенного эпителия			
48°00'35,5"N; 37°48'56,2"E	<i>A. retroflexus</i>	41,8	13,9	95,2	деградация внешнего эндосперма			
	<i>A. patula</i>				элиминация слоя экзотесты			
	<i>C. bursa-pastoris</i>				деградация эндосперма			
	<i>D. muralis</i>				деградация эндосперма			
	<i>P. aviculare</i>				деградация внешнего эндосперма			
	<i>R. lutea</i>				гипергенезия гиалиновой оболочки			
	<i>S. vulgaris</i>				деградация внешнего эндосперма			
	<i>Tripleurospermum inodorum</i> (L.) Sch. Bip.					полимеризация перисперма		
	<i>Berteroa incana</i> (L.) DC.					деградация структур микропиле		
						элиминация слоя экзотесты		
48°00'10,3"N; 37°47'34,0"E	<i>A. retroflexus</i>	32,1	12,4	94,9	полимеризация стерильных плодolistиков			
	<i>A. patula</i>				аберранные семязачатки			
	<i>C. bursa-pastoris</i>				полимеризация стерильных плодolistиков			
	<i>D. muralis</i>				аберранные семязачатки			
	<i>P. aviculare</i>				гипогенезия базального тела			
	<i>R. lutea</i>				полимеризация стерильных плодolistиков			
	<i>S. vulgaris</i>				аберранные семязачатки			
	<i>Sisymbrium polymorphum</i> (Murray) Roth					дистопия семязачатка		
47°59'49,2"N; 37°47'52,4"E	<i>A. retroflexus</i>	30,8	15,8	93,4	пролификация проводящего пучка			
	<i>A. patula</i>				аберранные семязачатки			
	<i>C. bursa-pastoris</i>				элиминация протодермы вокруг зародыша			
	<i>D. muralis</i>				аберранные семязачатки			
	<i>P. aviculare</i>				элиминация протодермы вокруг зародыша			
	<i>R. lutea</i>				дистопия базального тела			
	<i>S. vulgaris</i>				пролификация проводящего пучка			
						элиминация протодермы вокруг зародыша		
						аберранные семязачатки		
<i>Dactylis glomerata</i> L.				деформация семенной кожуры				
<i>Centaurea diffusa</i> Lam.				элиминация протодермы вокруг зародыша				
47°59'47,1"N; 37°48'32,0"E	<i>A. retroflexus</i>	28,6	16,2	96,3	полиэмбриония стерильных плодolistиков			
	<i>A. patula</i>				пролификация гипостазы			
	<i>C. bursa-pastoris</i>				аберранные семязачатки			
	<i>D. muralis</i>				дистопия плаценти-халазы			
					хориза интегументального тапетума			
	<i>P. aviculare</i>				полиэмбриония стерильных плодolistиков			
	<i>R. lutea</i>				пролификация гипостазы			
	<i>S. vulgaris</i>				аберранные семязачатки			
						полиэмбриония стерильных плодolistиков		
<i>Plantago lanceolata</i> L.				полимеризация перисперма				
47°59'32,8"N; 37°47'46,6"E	<i>A. retroflexus</i>	26,1	17,0	94,1	дистопия семядолей			
	<i>A. patula</i>				элиминация микропиле			
	<i>C. bursa-pastoris</i>				дистопия семядолей			
	<i>D. muralis</i>				аберранные семязачатки			
	<i>P. aviculare</i>				фасциация проводящих пучков			
	<i>R. lutea</i>				гипогенезия семязачатка			
	<i>S. vulgaris</i>				элиминация микропиле			
	<i>Tripleurospermum inodorum</i> (L.) Sch. Bip.					дистопия семядолей		
				аберранные семязачатки				
<i>Echium vulgare</i> L.				гипогенезия микропиле				

Примечание: PM, EE и RRP – пояснения в тексте, DP – доминирующий поллютант.

Принципиальной разницы в частоте встречаемости аномалий эмбриотоксичной диагностической значимости между экотопами г. Донецка и всей территорией Центрального Донбасса (сравнение данных табл. 1 и 2) не обнаружено. В сопряжённых случаях при анализе по загрязнению цинком, железом, медью, никелем, кадмием, кобальтом и ртутью тенденции встречаемости морфоструктурных отклонений сохраняются. Для случаев с наиболее общими структурными трансформациями, когда локализацию гистоструктурной атипичности выявить не представлялось возможным, то в таблицах использована запись по наличию aberrantных семязачатков (по интенсивности окрашивания и общей структурной деградации семени, не способного образовать проросток).

Таблица 2

Аномалии эмбриональных структур в растениях-индикаторах экотопов Центрального Донбасса

Table 2

Abnormalities of embryonic structures in indicator plants of ecotopes of the Central Donbass

Координаты	Виды	Признаки			DP		
		PM	EE	RRP			
48°01'55,3"N; 37°53'45,7"E	<i>Amaranthus retroflexus</i> L.	25,4	16,7	92,1	полимеризация стерильных плодolistиков	Ni	
					аберрантные семязачатки		
	<i>Atriplex patula</i> L.				гипогенезия базального тела		
	<i>Capsella bursa-pastoris</i> (L.) Medik.				полимеризация стерильных плодolistиков		
	<i>Diploaxis muralis</i> (L.) DC.				аберрантные семязачатки		
					полимеризация стерильных плодolistиков		
	<i>Polygonum aviculare</i> L.				смещение интегументального тапетума		
					аберрантные семязачатки		
	<i>Reseda lutea</i> L.				полимеризация стерильных плодolistиков		
	<i>Senecio vulgaris</i> L.				гипогенезия зародышевого мешка		Sm
	полимеризация стерильных плодolistиков	Ni					
	<i>Dactylis glomerata</i> L.				аберрантные семязачатки		
47°59'56,1"N; 37°58'25,5"E	<i>A. retroflexus</i>	42,2	15,6	89,6	гипергенезия эндосперма	Cs	
					аберрантные семязачатки		
	<i>A. patula</i>				элиминация слоя экзотесты		
	<i>C. bursa-pastoris</i>				деградация эндосперма		
					деградация эндосперма		
	<i>D. muralis</i>				деградация внешнего эндосперма		Zn
	<i>P. aviculare</i>				гипергенезия гиалиновой оболочки		
					деградация внешнего эндосперма		
	<i>R. lutea</i>				деградация эндосперма		
	<i>S. vulgaris</i>				гипергенезия гиалиновой оболочки		
	<i>Echium vulgare</i> L.				гипогенезия микропиле	Ce	
	<i>Plantago lanceolata</i> L.				полимеризация перисперма	Zr	
	<i>Sisymbrium polymorphum</i> (Murray) Roth				деградация внешнего эндосперма	Zn	
48°04'27,9"N; 37°58'27,6"E	<i>A. retroflexus</i>	41,7	10,5	91,0	пролификация проводящего пучка	Co	
					аберрантные семязачатки		
	<i>A. patula</i>				элиминация протодермы вокруг зародыша		
	<i>C. bursa-pastoris</i>				пролификация проводящего пучка		
	<i>D. muralis</i>				деформация гипостазы		Ti
					дистопия базального тела		Sb
	<i>P. aviculare</i>				пролификация проводящего пучка		
	<i>R. lutea</i>						Co
<i>S. vulgaris</i>	аберрантные семязачатки						
	<i>Tripleurospermum inodorum</i> (L.) Sch. Bip.				пролификация проводящего пучка		
48°02'28,5"N; 38°06'53,0"E	<i>A. retroflexus</i>	29,1	9,6	93,2	гипергенезия эндосперма	Cs	
					аберрантные семязачатки		
	<i>A. patula</i>				элиминация протодермы вокруг зародыша		
	<i>C. bursa-pastoris</i>						
	<i>D. muralis</i>				аберрантные семязачатки	Fe	

Координаты	Виды	Признаки			DP
		PM	EE	RRP	
	<i>P. aviculare</i>				деградация внешнего эндосперма
	<i>R. lutea</i>				элиминация протодермы вокруг зародыша
	<i>S. vulgaris</i>				аберрантные семязачатки
	<i>Cichorium intybus</i> L.				
	<i>Tanacetum vulgare</i> L.				
48°03'00,7"N; 38°09'56,1"E	<i>A. retroflexus</i>	28,3	8,8	88,9	пролификация проводящего пучка
	<i>A. patula</i>				элиминация протодермы вокруг зародыша
	<i>C. bursa-pastoris</i>				дистопия плаценти-халазы
	<i>D. muralis</i>				хориза интегументального тапетума
	<i>P. aviculare</i>				пролификация проводящего пучка
	<i>R. lutea</i>				аберрантные семязачатки
	<i>S. vulgaris</i>				элиминация протодермы вокруг зародыша
	<i>Dactylis glomerata</i> L.				элиминация протодермы вокруг зародыша
	<i>Tanacetum vulgare</i> L.				аберрантные семязачатки
48°01'24,0"N; 38°10'15,8"E	<i>A. retroflexus</i>	20,2	7,8	85,3	прозенхимная деградация дерматогена
	<i>A. patula</i>				дистопия внутреннего интегумента
	<i>C. bursa-pastoris</i>				гипергенезия экзотесты
	<i>D. muralis</i>				прозенхимная деградация дерматогена
	<i>P. aviculare</i>				гипергенезия экзотесты
	<i>R. lutea</i>				прозенхимная деградация дерматогена
	<i>S. vulgaris</i>				гипергенезия экзотесты
	<i>Plantago lanceolata</i> L.				гипергенезия зародышевого мешка
	<i>Tripleurospermum inodorum</i> (L.) Sch. Bip.				прозенхимная деградация дерматогена
48°04'05,9"N; 38°15'09,1"E	<i>A. retroflexus</i>	14,3	5,3	95,2	полиэмбриония стерильных плодолистиков
	<i>A. patula</i>				пролификация гипостазы
	<i>C. bursa-pastoris</i>				аберрантные семязачатки
	<i>D. muralis</i>				полиэмбриония стерильных плодолистиков
	<i>P. aviculare</i>				дистопия базального тела
	<i>R. lutea</i>				полиэмбриония стерильных плодолистиков
	<i>S. vulgaris</i>				аберрантные семязачатки
	<i>Tanacetum vulgare</i> L.				полиэмбриония стерильных плодолистиков
48°01'36,2"N; 38°15'39,7"E	<i>A. retroflexus</i>	16,4	10,2	90,6	аберрантные семязачатки
	<i>A. patula</i>				деградация эндосперма
	<i>C. bursa-pastoris</i>				асимметричность семядолей
	<i>D. muralis</i>				деградация эндосперма
	<i>P. aviculare</i>				деградация экзо- и мезотесты
	<i>R. lutea</i>				асимметричность семядолей
	<i>S. vulgaris</i>				асимметричность семядолей
	<i>Cichorium intybus</i> L.				пролификация проводящего пучка
	<i>Centaurea diffusa</i> Lam.				фасциация проводящих пучков
48°00'49,5"N; 38°16'15,8"E	<i>A. retroflexus</i>	16,8	9,9	96,0	деградация эндосперма
	<i>A. patula</i>				асимметричность семядолей
	<i>C. bursa-pastoris</i>				деградация экзо- и мезотесты
	<i>D. muralis</i>				асимметричность семядолей
	<i>P. aviculare</i>				аберрантные семязачатки
	<i>R. lutea</i>				аберрантные семязачатки
	<i>S. vulgaris</i>				полимеризация стерильных плодолистиков
<i>Cichorium intybus</i> L.	аберрантные семязачатки				

Координаты	Виды	Признаки			DP				
		PM	EE	RRP					
48°02'56,6"N; 38°28'28,8"E				Локализация аномалии					
				гиперфункция гиалиновой оболочки					
	<i>Dactylis glomerata</i> L.				аберрантные семязачатки				
	<i>A. retroflexus</i>	19,9	9,4	91,1	аберрантные семязачатки	Fe			
	<i>A. patula</i>				дистопия наружного интегумента	Hf			
	<i>C. bursa-pastoris</i>				гипергенезия гиалиновой оболочки				
	<i>D. muralis</i>				аберрантные семязачатки				
	<i>P. aviculare</i>				гипергенезия гиалиновой оболочки				
	<i>R. lutea</i>				элиминация экзотесты	Fe			
	<i>S. vulgaris</i>				аберрантные семязачатки				
<i>Echium vulgare</i> L.									
<i>Tanacetum vulgare</i> L.									
<i>Tripleurospermum inodorum</i> (L.) Sch. Bip.									
48°01'17,0"N; 38°38'29,2"E	<i>A. retroflexus</i>	18,3	8,5	90,0	прозенхимная деградация дерматогена	Cu			
	<i>A. patula</i>								
	<i>C. bursa-pastoris</i>				гипергенезия экзотесты				
	<i>D. muralis</i>				прозенхимная деградация дерматогена				
	<i>P. aviculare</i>				фасциация проводящих пучков	Yb			
	<i>R. lutea</i>				прозенхимная деградация дерматогена				
	<i>S. vulgaris</i>				гипергенезия экзотесты	Cu			
					прозенхимная деградация дерматогена				
<i>Centaurea diffusa</i> Lam.				прозенхимная деградация дерматогена					
48°02'18,9"N; 38°46'02,3"E	<i>A. retroflexus</i>	16,4	7,7	88,2	полиэмбриония стерильных плодolistиков	Hg			
	<i>A. patula</i>				аберрантные семязачатки				
	<i>C. bursa-pastoris</i>				олигомеризация внутреннего интегумента	Sc			
	<i>D. muralis</i>				полиэмбриония стерильных плодolistиков				
	<i>P. aviculare</i>				пролиферация гипостазы				
					аберрантные семязачатки				
	<i>R. lutea</i>				полиэмбриония стерильных плодolistиков	Hg			
	<i>S. vulgaris</i>				пролиферация гипостазы				
	<i>Cichorium intybus</i> L.							полиэмбриония стерильных плодolistиков	
								аберрантные семязачатки	
<i>Dactylis glomerata</i> L.				пролиферация гипостазы					
<i>Plantago lanceolata</i> L.				полимеризация перисперма	Zr				

Примечание: PM, EE и RRP – пояснения в тексте, DP – доминирующий поллютант.

В контексте использования результатов вычисления интегральных характеристик (по PM, EE и RRP) в связи с идентифицируемыми локальными аномалиями и данными о фитохимически контрастных накоплениях загрязнителя можно провести качественную привязку (высоких значений изменения структур мужской генеративной сферы и общей частоты встречаемости некачественных для прорастания семязачатков в сумме с тератологической схиохолитией) с территориальным тяготением используемых экотопов к зонам промышленного воздействия преимущественно металлургического производства.

Важным звеном в анализе полученных данных является выявление признаков, которые совместимы с дальнейшим полноценным выживанием особи и возможностью выполнения функций репродукции. К таким характеристикам относятся: гипергенезия эндосперма; деградация внешнего эндосперма; полимеризация стерильных плодolistиков; гипергенезия экзотесты; гипергенезия гиалиновой оболочки; прозенхимная деградация дерматогена; олигомеризация внутреннего интегумента; фасциации стерильных плодolistиков; деформация семенной кожуры. Указанные признаки являются примером адаптивной полиморфности растительного организма как ответной реакции на факторы промышленного загрязнения.



Типичны для техногенных экотопов Донбасса варианты локального и суммарного загрязнения Zn (1330 мг/кг), Fe (109000), Cu (507), Ni (150), Cd (9,2), Co (14), Hg (2,7), Al (39000), Pb (560), что частично представлено нами в предыдущих публикациях (Safonov, 2019, 2020 b, 2022; Safonov, Glukhov, 2021 a, b, 2022) – эти металлы в совокупности составляют основной фон антропогенной нагрузки на природные системы. Отдельно выделены единично-специфичные аномалии в условиях накопления растениями преимущественно малораспространённых элементов: Ce (66,0 мг/кг) – гипогенезия микропиле *Echium vulgare*; Cs (4,5) – гипергенезия эндосперма *Amaranthus retroflexus*; Dy (3,6) – пролификация проводящего пучка *Diplotaxis muralis*; Eu (0,99) – дистопия плацентохалазы и хориза интегументального тапетума *Capsella bursa-pastoris*; Hf (6,7) – дистопия наружного интегумента *Atriplex patula*; La (32,5) – деформация семенной кожуры *Dactylis glomerata*; Nd (31,0) – фасциации стерильных плодolistиков *Senecio vulgaris*; Rb (89,0) – фасциации фертильных плодolistиков *Reseda lutea*; Sb (22,0) – дистопия базального тела *Polygonum aviculare*; Sc (8,1) – олигомеризация внутреннего интегумента *Capsella bursa-pastoris*; Sm (5,5) – гипогенезия зародышевого мешка *Reseda lutea*; Sr (215,0) – дистопия внутреннего интегумента *Atriplex patula*; Ta (1,3) – дистопия семязачатка *Sisymbrium polymorphum*; Tb (0,6) – расщепление (хориза) фуникулюса *Polygonum aviculare*; Th (16,1) – гипогенезия семязачатка *Reseda lutea*; Ti (2380,0) – деформация гипостазы *Diplotaxis muralis*; U (3,5) – полимеризация перисперма и деградация структур микропиле *Tripleurospermum inodorum*; W (9,1) – гипергенезия зародышевого мешка *Plantago lanceolata*; Yb (1,8) – фасциация проводящих пучков *Polygonum aviculare*; Zr (332,0) – полимеризация перисперма *Plantago lanceolata*.

Большую значимость при формировании признаков конечной тератологической синкопии, схизокопии (по семенам и плодам для перенесения периода покоя) и возможных форм матриальности оказывают следующие их использованные признаки: смещение интегументального тапетума; дистопия базального тела; асимметричность семядолей; гипергенезия гиалиновой оболочки; элиминация протодермы вокруг зародыша; пролификация проводящего пучка; дистопия семядолей; хориза интегументального тапетума; пролификация гипостазы; дистопия внутреннего интегумента.

Были реализованы попытки установления микроклиматических трендов при проявлении аномалий растительных организмов, что востребовано научной общественностью в контексте трансформации климата (Agathokleous et al., 2022), однако достоверных данных для промышленных зон с разной активностью предприятий в разные годы не выявлено, – факторы отдельного или комплексного ингредиентного загрязнения остаются превалирующими, что также согласуется с результатами исследований других авторов (Bian et al., 2020; Deza-Araujo et al., 2022; Nowak et al., 2022). Также исследования по выявлению уровней промышленной контаминации на репродуктивную сферу растительных организмов (Egogova et al., 2022) являются принципиально важными в рассмотрении разных сценариев, способов и стратегий выживания видов в нестабильных экологических условиях (Safonov, 2009).

Полученные данные также могут быть востребованы в экспериментах по фитотестированию и определению фитоприспособности отдельных типов субстрата для разных направлений хозяйственной деятельности (агротехника, строительные технологии, ландшафтный дизайн и др.). Такие исследования проводятся на биологическом факультете Донецкого национального университета в лаборатории фитомониторинга техногенных ландшафтов (Kraus, 2020). В блоке экспериментов с проростками выделены корреляты по сопряжённым структурам (тканям, имеющим идентификацию как при эмбриогенезе, так и при прорастании семени): строение дерматогена, его прозенхимная деградация, симметричность корневого чехлика на разных стадиях формирования и развития, процессы лизиса конформационных участков паренхимы, дифференциация слоев дерматокальпигена, деградационные процессы протодермальных образований, локальные некрозы и другие признаки.

## Заключение

Данные с нулевыми значениями (более 80% от всего объёма выборки) в поиске аномальных структур информативны для тематического направления в градиенте токсической нагрузки или при составлении специальных шкал адаптивной пластичности растений в условиях промышленного региона, – такие данные не являются целевым объектом анализируемого в статье материала. Проведение детальных физиолого-биохимических исследований на современном этапе не представляется технически возможным и во многом целесообразным, однако существенное расширение диапазона анализируемых элементов непосредственно в фитомассе генеративных органов и одновременный поиск открытых (ландшафтных) контрастных геохимических аномалий позволяют определенным образом выделить некоторые закономерности прирегистрации морфотипических патологий.

В качестве современных перспектив рассматривается возможность интерактивной цифровизации полученных данных фитоиндикационной значимости (Prokorieva et al., 2021) и дополнение базы данных мониторингового профиля на основании технологии использования групп тотипотентных клеток и (или) меристематических инициалей растений-индикаторов (Safonov, 2021 a).

*Работа реализована в рамках государственной научной темы № 0122D000085 «Ботаника антропогенеза: индикация и оптимизация».*

## Список литературы

- Agathokleous E., De Marco A., Paoletti E., Querol X., Sicard P. 2022. Air pollution and climate change threats to plant ecosystems // Environmental Research. V. 212. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113420>
- [Bekuzarova et al.] Бекузарова С. А., Бурдзиева О. Г., Качмазов Д. Г., Майсурадзе М. В. 2018. Экологические проблемы на территориях с горнодобывающей промышленностью и активная рекультивация токсических почв // Геология и геофизика Юга России. № 4. С. 7–17. <https://doi.org/10.23671/VNC.2018.4.20130>
- Bian Z., Yu H., Hou J., Mu S. 2020. Influencing factors and evaluation of land degradation of 12 coal mine areas in Western China // Journ. of China Coal Society. V. 45. P. 338–350.
- Bremer K. 1994. *Asteraceae: cladistic and classification*. Portland, Oregon: Timber Press. 752 p.
- [Bulokhov] Булохов А. Д. 2004. Фитоиндикация и её практическое применение. Брянск: Изд-во БГУ. 244 с.
- Callaway R. M., Pennings S. C., Richards C. L. 2003. Phenotypic plasticity and interactions among plants // Ecology. V. 84. Iss. 5. P. 1115–1128.
- Cherednichenko O., Pilyugina A., Nuraliev S. 2022. Chapter 10 – Cytogenetical bioindication of pesticidal contamination // Pesticides in the Natural Environment Sources, Health Risks, and Remediation. P. 227–260. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90489-6.00010-0>
- Deza-Araujo M., Morales-Molino C., Conedera M., Henne P. D., Krebs P., Hinz M., Heitz C., Hafner A., Tinner W. 2022. A new indicator approach to reconstruct agricultural land use in Europe from sedimentary pollen assemblages // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. V. 599. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2022.111051>
- [Egorova et al.] Егорова И. Н., Григорьева Т. И., Неворова О. А. 2022. Оценка содержания тяжёлых металлов в соплодиях хмеля обыкновенного с породного отвала угольного разреза «Кедровский» // Вестник Биомедицина и социология. Т. 7. № 2. С. 17–22. <https://doi.org/10.26787/mydha-2618-8783-2022-7-2-17-22>
- [Embryologia...] Эмбриология цветковых растений. Терминология и концепции. 1994. Под ред. Т. Б. Батыгиной. Т. 1. Генеративные органы цветка. СПб.: Мир и семья. 320 с.
- [Embryologia...] Эмбриология цветковых растений. Терминология и концепции. 1997. Под ред. Т. Б. Батыгиной. Т. 2. Семья. СПб.: Мир и семья. 823 с.
- [Embryologia...] Эмбриология цветковых растений. Терминология и концепции. 2000. Под ред. Т. Б. Батыгиной. Т. 3. Системы репродукции. СПб.: Мир и семья. 640 с.
- Erdős L., Bede-Fazekas A., Batori Z., Berg Ch., Kröel-Dulay G., Magnes M., Sengl P., Tölgyesi C., Török P., Zinnen J. 2022. Species-based indicators to assess habitat degradation: Comparing the conceptual, methodological, and ecological relationships between hemeroby and naturalness values // Ecological Indicators. V. 136. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108707>
- [Gusev] Гусев А. П. 2016. Диагностика ландшафтно-экологических ситуаций на основе фитоиндикации // Вестник Воронежского гос. ун-та. Сер.: География. Геоэкология. № 4. С. 77–83.
- Khondhodiaeva N. B., Ismillaeva K. B., Ruzimbayeva N. T. 2018. Bioindication and its importance in the conducting of ecological monitoring // European Sci. N 4 (36). P. 68–70.
- [Kravsun] Кравсун Т. И. 2020. Фитотестирование загрязнения тяжёлыми металлами почв Донбасса // Разнообразие растительного мира. № 3 (6). С. 37–44. <https://doi.org/10.22281/2686-9713-2020-3-37-44>
- Kumar R. 2018. A review of phylogeography: biotic and abiotic factors // Geology, Ecology, Landscapes. V. 2. Iss. 4. P. 268–274.

Madheshiya P., Gupta G. S., Sahoo A., Tiwari S. 2022. Chapter 14 – Biomonitoring tools and bioprogramming: An overview // *New Paradigms in Environmental Biomonitoring Using Plants*. P. 341–366. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824351-0.00015-8>

[Makrushin] Макрушин Н. М. 1989. Основы гетеросперматологии. М.: Агропромиздат. 287 с.

[Mandak B. 1997. Seeds heteromorphism and life cycle of plants: a literature review // *Preslia*. V. 69. P. 129–159.

[Mandra] Мандра Ю. А. 2010. Место и роль фитоиндикации в общей системе экологического мониторинга // *Вестник Московского гос. технол. ун-та «Станкин»*. № 2 (10). С. 74–78.

[Neverova] Неворова О. А. 2009. Применение фитоиндикации в оценке загрязнения окружающей среды // *Биосфера*. Т. 1. № 1. С. 82–92.

Nowak J., Faure N., Glorieux C., Vileb D., Pauwels M., Frérot H. 2022. Sublethal effects of metal toxicity and the measure of plant fitness in ecotoxicological experiments // *Environmental Pollution*. V. 304. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119138>

[Obshchaia...] Общая эмбриология: Терминологический словарь. 2010. Ставрополь: Ставропольский гос. аграрный ун-т. 144 с.

Parmar T. K., Rawtani D., Agrawal Y. K. 2016. Bioindicators: the natural indicator of environmental pollution // *Frontiers in Life Sci*. V. 9. Iss. 2. P. 110–118.

Plekhanova I. O., Zolotareva O. A., Tarasenko I. D., Yakovlev A. S. 2019. Assessment of ecotoxicity of soils contaminated by heavy metals // *Eurasian Soil Sci*. V. 52. Iss. 10. P. 1274–1288.

Pogányová A., Kerekeš E., Mičieta K. 2017. The ecogenotoxic plant biomonitoring of a long-term polluted area in central Slovakia // *Environmental Science and Pollution Research*. V. 24. Iss. 35. P. 27376–27383. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0353-z>

Pozolotina V. N., Antonova E. V. 2017. 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. Journ. of Radiation Biol*. V. 93. Iss. 3. P. 330–339. <https://doi.org/10.1080/09553002.2016.1254835>

[Prokopieva et al.] Прокопьева К. О., Коношкова М. В., Новикова Н. М., Соболев И. В. 2021. Цифровая фитоиндикация засоления почв в сухой степи (Республика Калмыкия) // *Аридные экосистемы*. Т. 27. № 2 (87). С. 68–81.

Radula M. W., Szymura T. H., Szymura M., Swacha G. 2022. Macroecological drivers of vascular plant species composition in semi-natural grasslands: A regional study from Lower Silesia (Poland) // *Sci. of the Total Environment*. V. 233. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155151>

Ramírez N., Briceño H. 2022. Ecology of morphological fruit types, and fruit and seed colors in 27 Venezuelan plant communities // *Acta Oecologica*. V. 116. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2022.103838>

[Safonov] Сафонов А. И. 2009. Стратегическая потенциализация фитоиндикаторов техногенных загрязнений // *Аграрная Россия*. № 51. С. 58–59.

[Safonov] Сафонов А. И. 2017. Фитозмариональный скрининг в экологическом мониторинге Донбасса // *Зелёный журнал – Бюл. ботанического сада Тверского гос. ун-та*. Вып. 3. С. 6–14.

[Safonov] Сафонов А. И. 2019. Тератогенез растений-индикаторов промышленного Донбасса // *Разнообразие растительного мира*. 2019. № 1 (1). С. 4–16. <https://doi.org/10.22281/2686-9713-2019-1-4-16>

[Safonov] Сафонов А. И. 2020 а. Гистологические маркеры эмбрионального аппарата фитоиндикаторов Донбасса // *Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: Мат. XVIII Всерос. науч.-практ. конф.*, Киров, 18 ноября 2020 года. Киров: Вятский гос. ун-т. С. 86–89.

[Safonov] Сафонов А. И. 2020 б. Динамика фитомониторинговых показателей антропогенеза в Донбассе (2000–2019 гг.) // *Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона*. № 1–2. С. 31–36.

[Safonov] Сафонов А. И. 2020 в. Новые виды растений в экологическом мониторинге Донбасса // *Вестник Донецкого нац. ун-та*. Сер. А: Естественные науки. № 1. С. 96–100.

[Safonov] Сафонов А. И. 2021 а. Функциональная значимость меристем растений-индикаторов в биодиагностике природных сред // *Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: Мат. XIX Всерос. науч.-практ. конф.* Киров, 25 ноября 2021 года. Киров: Вятский гос. ун-т. С. 10–13.

[Safonov] Сафонов А. И. 2021 б. Идентификация некоторых родов астровых по палинологическим отпечаткам // *Вестник Донецкого нац. ун-та*. Сер. А: Естественные науки. № 3. С. 69–77.

Safonov A. 2022. Ecological scales of indicator plants in an industrial region // *BIO Web Conf*. V. 43. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20224303002>

[Safonov, Glukhov] Сафонов А. И., Глухов А. З. 2021 а. Экологический фитомониторинг в Донбассе с использованием геостратегического картографирования // *Проблемы промышленной ботаники индустриально развитых регионов: Мат. докл. VI Междунар. конф.*, Кемерово, 06–07 октября 2021 года. Кемерово: ФИЦ угля и углехимии СО РАН. С. 77–79. [https://doi.org/10.53650/9785902305606\\_77](https://doi.org/10.53650/9785902305606_77)

[Safonov, Glukhov] Сафонов А. И., Глухов А. З. 2021 б. Эмпирические критерии фитомониторинга техногенной нагрузки в Донбассе // *Экобиотех*. Т. 4. № 3. С. 195–202. <https://doi.org/10.31163/2618-964X-2021-4-3-195-202>

Safonov A., Glukhov A. 2021. Ecological phytomonitoring in Donbass using geoinformational analysis // *BIO Web Conf*. V. 31. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213100020>

[Safonov, Glukhov] Сафонов А. И., Глухов А. З. 2022. Фитомониторинг урбанозёмов в условиях степной зоны Северного Приазовья // *Мат. междунар. науч. конф. «Агрофизический институт: 90 лет на службе земледелия и растениеводства»* ФГБНУ АФИ, Санкт-Петербург, Россия, 14–15 апреля 2022 г. СПб.: ФГБНУ АФИ. С. 849–855.

[Safonov, Mitenko] Сафонов А. И., Мирненко Н. С. 2019. Палинологический скрининг в мониторинговой программе Центрального Донбасса // *Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона*. № 3–4. С. 43–48.

- [Shamrov] Шамров И. И. 2015. Эмбриология и воспроизведение растений. СПб. 200 с.
- [Spitsyn] Спицын И. П. 2011. Технологии и результаты цитозембриологического, цитогенетического, цитохимического и экологического анализов растений. Тамбов. 381 с.
- Sukhorukov A. P., Nilova M. V. 2015. Carpology of the genus *Tragopogon* L. (*Asteraceae*) // *Phytotaxa*. V. 201. Iss. 1. P. 27–49.
- Sultan S. E. 1995. Phenotypic plasticity and plant adaptation // *Acta Botanica Neerlandica*. V. 44. Iss. 4. P. 363–383.
- [Suntsova et al.] Сунцова Л. Н., Ишмаков Е. М., Козик Е. В. Оценка состояния городской среды методом фитоиндикации (на примере г. Красноярск) // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журн. 2011. № 4 (322). С. 29–32.
- Terekhina N. V., Ufimtseva M. D. 2020. Leaves of trees and shrubs as bioindicators of air pollution by particulate matter in Saint Petersburg // *Geography, Environment, Sustainability*. V. 13. Iss. 1. P. 224–232.
- Tscharnke T., Klein A. M., Kruess A., Steffan-Dewenter I., Thies C. 2005. Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity – ecosystem service management // *Ecol. Letters*. V. 8 (8). P. 857–874. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.200500782.x>
- Yepintsev S. A., Kurolap S. A., Komov I. V., Minnikov I. V. 2013. Monitoring of factors of ecological safety of urbanized territories' population (by example of settlements of Voronezh region // *Life Sci. Journ.* 10 (12 SPL. ISS.) P. 846–848.
- Yepintsev S. A., Shekoyan S. V., Lepeshkina L. A., Voronin A. A., Klevisova M. A. 2019. Technologies for creating geographic information resources for monitoring the socio-ecological conditions of cities // *IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering*. Electronic ed. P. 012012.
- [Yudakova] Юдакова О. И., Гупорова О. В., Беляченко Ю. А. 2012. Методы исследования репродуктивных структур и органов растений. Саратов: Саратовский нац. исследовательский гос. ун-т им. Н. Г. Чернышевского. 42 с.
- Zaika M. A., Kilian N., Jones K., Krinitsina A. A., Nilova M. V., Speranskaya A. S., Sukhorukov A. P. 2020. *Scorzonera* sensu lato (*Asteraceae*, *Cichorieae*) – taxonomic reassessment in the light of new molecular phylogenetic and carpological analyses // *PhytoKeys*. V. 137. P. 1–85.

## References

- Agathokleous E., De Marco A., Paoletti E., Querol X., Sicard P. 2022. Air pollution and climate change threats to plant ecosystems // *Environmental Research*. V. 212. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113420>
- Bekuzarova S. A., Burdzieva O. G., Kachmazov D. G., Maisuradze M. V. 2018. Ekologicheskie problemy na territoriiakh s gornodobyvaishchei promyshlennost'iu i aktivnaia rekul'tivatsiia toksicheskikh pochv [Environmental problems in mining areas and active reclamation of toxic soils] // *Geologiya i geofizika Iuga Rossii*. № 4. P. 7–17. (In Russian) <https://doi.org/10.23671/VNC.2018.4.20130>
- Bian Z., Yu H., Hou J., Mu S. 2020. Influencing factors and evaluation of land degradation of 12 coal mine areas in Western China // *Journ. of China Coal Society*. V. 45. P. 338–350.
- Bremer K. 1994. *Asteraceae: cladistic and classification*. Portland, Oregon: Timber Press. 752 p.
- Bulokhov A. D. 2004. Fitoindikatsiia i ee prakticheskoe primenenie [Phytoindication and its practical application]. Bryansk: Izd-vo BGU. 244 p. (In Russian)
- Callaway R. M., Pennings S. C., Richards C. L. 2003. Phenotypic plasticity and interactions among plants // *Ecology*. V. 84. Iss. 5. P. 1115–1128.
- Cherednichenko O., Pilyugina A., Nuraliev S. 2022. Chapter 10 – Sytogenetical bioindication of pesticidal contamination // *Pesticides in the Natural Environment Sources, Health Risks, and Remediation*. P. 227–260. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90489-6.00010-0>
- Deza-Araujo M., Morales-Molino C., Conedera M., Henne P. D., Krebs P., Hinz M., Heitz C., Hafner A., Tinner W. 2022. A new indicator approach to reconstruct agricultural land use in Europe from sedimentary pollen assemblages // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. V. 599. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2022.111051>
- Egorova I. N., Grigor'eva T. I., Neverova O. A. 2022. Otsenka soderzhaniia tiazhelykh metallov v soplodiiakh khmelia obyknovennogo s porodnogo otvala ugol'nogo razreza «Kedrovskii» [Estimation of the content of heavy metals in the seedlings of common hop from the waste dump of the Kedrovsky coal mine] // *Vestnik Biomeditsina i sotsiologii*. T. 7. № 2. P. 17–22. (In Russian) <https://doi.org/10.26787/nydha-2618-8783-2022-7-2-17-22>
- Embriologiya tsvetkovykh rastenii. Terminologiya i kontseptsii [Embryology of flowering plants. Terminology and concepts.]. 1994. Pod red. T. B. Batyginoi. T. 1. Generativnye organy tsvetka [Generative organs of a flower.]. St. Petersburg: Mir i sem'ia. 320 p. (In Russian)
- Embriologiya tsvetkovykh rastenii. Terminologiya i kontseptsii. 1997. Pod red. T. B. Batyginoi. T. 2. Semia [Seed]. St. Petersburg: Mir i sem'ia. 823 p. (In Russian)
- Embriologiya tsvetkovykh rastenii. Terminologiya i kontseptsii. 2000. Pod red. T. B. Batyginoi. T. 3. Sistemy reprodukcii [Systems of reproduction.]. St. Petersburg: Mir i sem'ia. 640 p. (In Russian)
- Erdős L., Bede-Fazekas Á., Batori Z., Berg Ch., Kröel-Dulay G., Magnes M., Sengl P., Tölgyesi C., Török P., Zinnen J. 2022. Species-based indicators to assess habitat degradation: Comparing the conceptual, methodological, and ecological relationships between hemeroby and naturalness values // *Ecological Indicators*. V. 136. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108707>
- Gusev A. P. 2016. Diagnostika landshaftno-ekologicheskikh situatsii na osnove fitoindikatsii [Diagnostics of landscape and ecological situations based on phytoindication] // *Vestnik Voronezhskogo gos. un-ta*. Ser.: Geografii. Geoekologiya. № 4. P. 77–83. (In Russian)
- Khondhodjaeva N. B., Ismillaeva K. B., Ruzimbayeva N. T. 2018. Bioindication and its importance in the conducting of ecological monitoring // *European Sci.* N 4 (36). P. 68–70. (In Russian)

- Kravsun T. I.* 2020. Fitotestirovanie zagriazneniia tiazhelymi metallami pochv Donbassa [Phytotesting of heavy metal pollution in Donbas soils] // Raznoobrazie rastitel'nogo mira. № 3 (6). P. 37–44. (In Russian) <https://doi.org/10.22281/2686-9713-2020-3-37-44>
- Kumar R.* 2018. A review of phylogeography: biotic and abiotic factors // *Geology, Ecology, Landscapes*. V. 2. Iss. 4. P. 268–274.
- Madheshiya P., Gupta G. S., Sahoo A., Tiwari S.* 2022. Chapter 14 – Biomonitoring tools and bioprogramming: An overview // *New Paradigms in Environmental Biomonitoring Using Plants*. P. 341–366. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824351-0.00015-8>
- Makrushin N. M.* 1989. *Osnovy geterospermatologii* [Fundamentals of heterospermatology]. M.: Agropromizdat. 287 p. (In Russian)
- Mandak B.* 1997. Seeds heteromorphysm and life cycle of plants: a literature review // *Preslia*. V. 69. P. 129–159.
- Mandra Iu. A.* 2010. Mesto i rol' fitoindikatsii v obshchei sisteme ekologicheskogo monitoringa [The place and role of phytoindication in the overall system of environmental monitoring] // *Vestnik Moskovskogo gos. tekhnol. un-ta «Stankin»*. № 2 (10). P. 74–78. (In Russian)
- Neverova O. A.* 2009. Primenenie fitoindikatsii v otsenke zagriazneniia okruzhaiushchei sredy [Application of phytoindication in the assessment of environmental pollution] // *Biosfera*. T. 1. № 1. S. 82–92. (In Russian)
- Nowak J., Faure N., Glorieux C., Vileb D., Pauwels M., Frérot H.* 2022. Sublethal effects of metal toxicity and the measure of plant fitness in ecotoxicological experiments // *Environmental Pollution*. V. 304. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119138>
- Obshchaia embriologiya: Terminologicheskii slovar' [General Embryology: Terminological Dictionary]. 2010. Stavropol': Stavropol'skii gos. agrarnyi un-t. 144 p. (In Russian)
- Parmar T. K., Rawtani D., Agrawal Y. K.* 2016. Bioindicators: the natural indicator of environmental pollution // *Frontiers in Life Sci.* V. 9. Iss. 2. P. 110–118.
- Plekhanova I. O., Zolotareva O. A., Tarasenko I. D., Yakovlev A. S.* 2019. Assessment of ecotoxicity of soils contaminated by heavy metals // *Eurasian Soil Sci.* V. 52. Iss. 10. P. 1274–1288.
- Pogányová A., Kerekeš E., Mičieta K.* 2017. The ecogenotoxic plant biomonitoring of a long-term polluted area in central Slovakia // *Environmental Science and Pollution Research*. V. 24. Iss. 35. P. 27376–27383. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0353-z>
- Pozolotina V. N., Antonova E. V.* 2017. 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. Journ. of Radiation Biol.* V. 93. Iss. 3. P. 330–339. <https://doi.org/10.1080/09553002.2016.1254835>
- Prokop'eva K. O., Koniushkova M. V., Novikova N. M., Sobolev I. V.* 2021. Tsifrovaia fitoindikatsiia zasoleniia pochv v sukhoi stepi (Respublika Kalmykiia) [Digital phytoindication of soil salinity in the dry steppe (Republic of Kalmykia)] // *Aridnye ekosistemy*. T. 27. № 2 (87). P. 68–81. (In Russian)
- Radula M. W., Szymura T. H., Szymura M., Swacha G.* 2022. Macroecological drivers of vascular plant species composition in semi-natural grasslands: A regional study from Lower Silesia (Poland) // *Sci. of the Total Environment*. V. 233. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155151>
- Ramírez N., Briceño H.* 2022. Ecology of morphological fruit types, and fruit and seed colors in 27 Venezuelan plant communities // *Acta Oecologica*. V. 116. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2022.103838>
- Safonov A. I.* 2009. Strategicheskaiia potentsializatsiia fitoindikatorov tekhnogennykh zagriaznenii [Strategic potentialization of phytoindicators of technogenic pollution] // *Agrarnaia Rossiia*. № 51. P. 58–59. (In Russian)
- Safonov A. I.* 2017. Fitoembrional'nyi skringing v ekologicheskome monitoringe Donbassa [Phytoembryonic screening in the ecological monitoring of Donbass] // *Zelenyi zhurnal – Biul. botanicheskogo sada Tverskogo gos. un-ta*. Vyp. 3. P. 6–14. (In Russian)
- Safonov A. I.* 2019. Teratogenez rastenii-indikatorov promyshlennogo Donbassa [Teratogenesis of plant-indicators of the industrial Donbass] // *Raznoobrazie rastitel'nogo mira*. 2019. № 1 (1). P. 4–16. (In Russian) <https://doi.org/10.22281/2686-9713-2019-1-4-16>
- Safonov A. I.* 2020 a. Gistologicheskii markery embrional'nogo apparata fitoindikatorov Donbassa [Histological markers of the embryonic apparatus of phytoindicators of Donbass] // *Biodiagnostika sostoiianiia prirodnykh i prirodno-tekhnogennykh sistem*: Mat. KhVIII Vseros. nauch.-prakt. konf., Kirov, 18 noiabria 2020 goda. Kirov: Viatskii gos. un-t. P. 86–89. (In Russian)
- Safonov A. I.* 2020 b. Dinamika fitomonitoringovykh pokazatelei antropotekhnogeneza v Donbasse (2000–2019 gg.) [Dynamics of phytomonitoring indicators of anthropotechnogenesis in Donbass (2000–2019)] // *Problemy ekologii i okhrany prirody tekhnogenno regiona*. № 1–2. P. 31–36. (In Russian)
- Safonov A. I.* 2020 v. Novye vidy rastenii v ekologicheskome monitoringe Donbassa [New plant species in the ecological monitoring of Donbas] // *Vestnik Donetskogo nats. un-ta*. Ser. A: Estestvennye nauki. № 1. P. 96–100. (In Russian)
- Safonov A. I.* 2021 a. Funktsional'naia znachimost' meristem rastenii-indikatorov v biodiagnostike prirodnykh sred [Functional significance of indicator plant meristems in the biodiagnostics of natural environments] // *Biodiagnostika sostoiianiia prirodnykh i prirodno-tekhnogennykh sistem*: Mat. KhIX Vseros. nauch.-prakt. konf. Kirov, 25 noiabria 2021 goda. Kirov: Viatskii gos. un-t. P. 10–13. (In Russian)
- Safonov A. I.* 2021 b. Identifikatsiia nekotorykh rodov astrovykh po palinologicheskimi ottiskami [Identification of some genera of *Asteraceae* by palynological impressions] // *Vestnik Donetskogo nats. un-ta*. Ser. A: Estestvennye nauki. № 3. P. 69–77. (In Russian)
- Safonov A.* 2022. Ecological scales of indicator plants in an industrial region // *BIO Web Conf.* V. 43. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20224303002>

- Safonov A. I., Glukhov A. Z. 2021 a. Ekologicheskii fitomonitoring v Donbasse s ispol'zovaniem geostrategicheskogo kartografirovaniia [Ecological phytomonitoring in Donbass using geographic mapping] // Problemy promyshlennoi botaniki industrial'no razvitykh regionov: Mat. dokl. VI Mezhdunar. konf., Kemerovo, 06–07 oktiabria 2021 goda. Kemerovo: FITs uglia i uglekhimii SO RAN. P. 77–79. (In Russian) [https://doi.org/10.53650/9785902305606\\_77](https://doi.org/10.53650/9785902305606_77)
- Safonov A. I., Glukhov A. Z. 2021 b. Empiricheskie kriterii fitomonitoringa tekhnogennoi nagruzki v Donbasse [Empirical criteria for phytomonitoring of technogenic load in Donbass] // Ekobiotekh. T. 4. № 3. P. 195–202. (In Russian) <https://doi.org/10.31163/2618-964X-2021-4-3-195-202>
- Safonov A., Glukhov A. 2021. Ecological phytomonitoring in Donbass using geoinformational analysis // BIO Web Conf. V. 31. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213100020>
- Safonov A. I., Glukhov A. Z. 2022. Fitomonitoring urbanozemov v usloviakh stepnoi zony Severnogo Priazov'ia [Phytomonitoring of urban soils in the conditions of the steppe zone of the Northern Sea of Azov] // Mat. mezhdunar. nauch. konf. «Agrofizicheskii institut: 90 let na sluzhbe zemledelii i rasteniievodstva» FGBNU AFI, Sankt-Peterburg, Rossiia, 14–15 aprelia 2022 g. St. Petersburg: FGBNU AFI. P. 849–855. (In Russian)
- Safonov A. I., Mirnenko N. S. 2019. Palinologicheskii skrining v monitoringovoi programme Tsentral'nogo Donbassa [Palynological screening in the monitoring program of the Central Donbas] // Problemy ekologii i okhrany prirody tekhnogenno regiona. № 3–4. P. 43–48. (In Russian)
- Shamrov I. I. 2015. Embriologii i vosproizvedenie rastenii [Embryology and reproduction of plants]. St. Petersburg. 200 p. (In Russian)
- Spitsyn I. P. 2011. Tekhnologii i rezul'taty tsitoembriologicheskogo, tsitogeneticheskogo, tsitokhimicheskogo i ekologicheskogo analizov rastenii [Technologies and results of cytoembryological, cytogenetic, cytochemical and ecological analyzes of plants]. Tambov. 381 p. (In Russian)
- Sukhorukov A. P., Nilova M. V. 2015. Carpology of the genus *Tragopogon* L. (Asteraceae) // Phytotaxa. V. 201. Iss. 1. P. 27–49.
- Sultan S. E. 1995. Phenotypic plasticity and plant adaptation // Acta Botanica Neerlandica. V. 44. Iss. 4. P. 363–383.
- Suntsova L. N., Inshakov E. M., Kozik E. V. Otsenka sostoianiia gorodskoi sredey metodom fitoindikatsii (na primere g. Krasnoarska) [Assessment of the state of the urban environment by phytoindication method (on the example of Krasnoyarsk)] // Izv. vyssh. ucheb. zavedenii. Lesnoi zhurn. 2011. № 4 (322). P. 29–32. (In Russian)
- Terekhina N. V., Ufimtseva M. D. 2020. Leaves of trees and shrubs as bioindicators of air pollution by particulate matter in Saint Petersburg // Geography, Environment, Sustainability. V. 13. Iss. 1. P. 224–232. (In Russian)
- Tscharntke T., Klein A. M., Kruess A., Steffan-Dewenter I., Thies C. 2005. Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity – ecosystem service management // Ecol. Letters. V. 8 (8). P. 857–874. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.200500782.x>
- Yeprintsev S. A., Kurolap S. A., Komov I. V., Minnikov I. V. 2013. Monitoring of factors of ecological safety of urbanized territories' population (by example of settlements of Voronezh region // Life Sci. Journ. 10 (12 SPL. ISS.)) P. 846–848.
- Yeprintsev S. A., Shekoyan S. V., Lepeshkina L. A., Voronin A. A., Klevtsova M. A. 2019. Technologies for creating geographic information resources for monitoring the socio-ecological conditions of cities // IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering. Electronic ed. P. 012012.
- Iudakova O. I., Gutorova O. V., Beliachenko Iu. A. 2012. Metody issledovaniia reproduktivnykh struktur i organov rastenii [Methods for studying the reproductive structures and organs of plants]. Saratov: Saratovskii nats. issledovatel'skii gos. un-t im. N. G. Chernyshevskogo. 42 p. (In Russian)
- Zaika M. A., Kilian N., Jones K., Krinitsina A. A., Nilova M. V., Speranskaya A. S., Sukhorukov A. P. 2020. *Scorzonera sensu lato* (Asteraceae, Cichorieae) – taxonomic reassessment in the light of new molecular phylogenetic and carpological analyses // PhytoKeys. V. 137. P. 1–85.

## Сведения об авторе

**Сафонов Андрей Иванович**

к. б. н., доцент кафедры ботаники и экологии

ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», Донецк

E-mail: andrey\_safonov@mail.ru

**Safonov Andrey Ivanovich**

Ph. D. in Biological sciences, Ass. Professor of the Dpt. of Botany and Ecology

Donetsk National University, Donetsk

E-mail: andrey\_safonov@mail.ru