
ФИЗИОЛОГИЯ И БИОХИМИЯ РАСТЕНИЙ

УДК 581.15 : 58.02 (470.60)

ФИТОТЕСТИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЯЖЁЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ ПОЧВ ДОНБАССА

© Т. И. Кравсун
Т. I. Kravsun

Phytotesting of heavy metal contamination of Donbass soils

ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», кафедра ботаники и экологии
283050, г. Донецк, ул. Щорса, д. 46. Тел.: +38 (071) 394-18-12, e-mail: kf.botan@donnu.ru

Аннотация. В статье представлены результаты фитотестирования почвенных растворов с высокими концентрациями ионов тяжёлых металлов. Чувствительность видов растений Донбасса к загрязнению почв установлена по специфическим проявлениям в структурах зародышевого корешка *Achillea nobilis* L., *Artemisia vulgaris* L., *Centaurea diffusa* Lam., *Galinsoga parviflora* Cav., *Senecio vulgaris* L., *Tripleurospermum inodorum* (L.) Sch. Bip. Модельные эксперименты по прорастиванию растений реализованы в лабораторных условиях с фиксированными концентрациями отдельных металлов и при совместном загрязнении, а также при тестировании образцов почв, отобранных в зонах влияния промышленных объектов Донбасса.

Ключевые слова: фитотестирование, тяжёлые металлы, корневой тест, фитоиндикация, гистология корня проростка, Донбасс.

Abstract. The article presents the results of phytotesting of soil solutions with high concentrations of heavy metal ions. The sensitivity of Donbass species plant to soil pollution was established by specific transformations in the structures of the embryonic root *Achillea nobilis* L., *Artemisia vulgaris* L., *Centaurea diffusa* Lam., *Galinsoga parviflora* Cav., *Senecio vulgaris* L., *Tripleurospermum inodorum* (L.) Sch. Bip. Model experiments on plant germination were carried out in laboratory conditions with fixed concentrations of individual metals and with joint pollution, as well as when testing soil samples taken in the zones of influence of industrial facilities of Donbass.

Keywords: phytotesting, heavy metals, root test, phytoindication, seedling root histology, Donbass.

DOI: 10.22281/2686-9713-2020-3-37-44

Введение

В системе геохимического дисбаланса почв соединения тяжёлых металлов в большинстве случаев являются наиболее активными доминантными агентами промышленного загрязнения (Baker, Brooks, 1989; Plekhanova et al., 2019). Контролирующая функция экологического мониторинга на этапе диагностики сводится в таких случаях к проведению фитоиндикационной оценки основной накопительной среды – почвенного горизонта экотопов (Eremchenko et al., 2016; Safonov, 2016, 2020 b; Dorohina, 2018; Kumar, 2018). Технологии выполнения фитомониторинговых программ для регионов с интенсивной антропогенной нагрузкой являются неотъемлемой частью полномасштабных ботанико-экологических исследований (Safonov, 2013; Parmar et al., 2016; Ibragimova, 2018; Khondhodjaeva et al., 2018; Eremchenko et al., 2019). Для территории Донбасса выявление фитоиндикационных свойств реализуется в долгосрочном квантификационном эксперименте (Safonov, 2009, 2020 a).

Цель работы – на основании лабораторного эксперимента на проростках типичных для промышленных зон видов растений Донбасса установить их металлоторерантность и оценить фитотоксичность почвенных образцов на предприятиях-загрязнителях способом тканевого корневого фитотестирования.

Методы и материалы исследований

В основу методологического подхода при осуществлении процесса многостороннего лабораторного фитотестирования положен принцип обнаружения дифференцированных отличий в экотопической приуроченности в характеристике почв и связанных с этими процессами состояний растительных организмов по фитоиндикационным критериям. Использовали методические разработки фитотестового назначения и проведения экологического мониторинга в урбанизированных и промышленных регионах (Clemens, 2001; Rakhimov et al., 2014; Pospelova et al., 2017; Ibragimova, 2018) с поправками на специфику гистоструктурного фитоэмбрионального эксперимента (Safonov, 2017, 2019). Сбор образцов почв осуществляли в 2020 г. на расстоянии 0,4–0,6 км от зоны влияния промышленных предприятий Донбасса в западном направлении. В качестве тест-объектов были выбраны *Achillea nobilis* L., *Artemisia vulgaris* L., *Centaurea diffusa* Lam., *Galinsoga parviflora* Cav., *Senecio vulgaris* L., *Tripleurospermum inodorum* (L.) Sch. Bip. как часто встречающиеся на промплощадках экспериментальной территории. Семенной материал собран в буферной зоне РЛП «Донецкий Кряж» в 2019 г. Концентрации растворов монометаллического загрязнения были выбраны с учётом региональных ПДК (меньшее указанное значение) и реальных верхних границ установленных концентраций активных форм тяжёлых металлов (Cd^{2+} , Cr^{3+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+}) в зонах влияния промышленных объектов (большее значение). В лабораторном эксперименте с контролируруемыми концентрациями использовали только нитратные растворы. Химический анализ проведён атомно-абсорбционным методом, структурная дифференциация – световой микроскопией на Ergaval.

Для проведения цифровой квантификации параметров качественного состояния зародышевого корешка при прорастании на водных растворах использовали два значения: REс – показатель реального эмбриологического качества зародышевого корешка (равен процентному отклонению линейного параметра корешка от максимальных показателей контроля на 7-е сутки с момента начала прорастания – корневой тест по длине), IEs – индекс эмбриологической уязвимости – оценивали по 10-балльной шкале как сумму показателей структурно-функциональной деградации в условиях воздействия загрязнителей: асимметрия корневого чехлика, лизис конформационной паренхимы, прозенхимная деградация дерматогена, недифференцированный дерматокалиптроген, элиминация протодермальных образований – по одному баллу; степень выраженности некротических проявлений в 5-балльной сравнительной оценке.

Названия сосудистых растений даны в соответствии с базой «The Euro+Med PlantBase» (2019).

Результаты исследований

Весь процесс фитотестирования провели в три этапа. На первом этапе проращивания растений в 5-кратной повторности (по 20 плодов) были определены особенности формирования начальных преобразований прорастающего первичного корешка и его развития на протяжении 14 суток (табл. 1) с момента разрыва семенного эпителия. Во всех сериях экспериментов показатель реального эмбриологического качества зародышевого корешка был меньше контроля, следовательно, в таких концентрациях и для указанных видов растений не наблюдается стимулирование ростовых процессов, как это, например, предусмотрено в общетеоретической закономерности (Clemens, 2001). Показатели развития тканей точки роста в целом для растворов с большими концентрациями находились в существенно более выраженном угнетении (табл. 1). Для *Artemisia vulgaris*, *Centaurea diffusa* и *Tripleurospermum inodorum* были установлены и экспериментально апробированы более высокие концентрации ионов металлов, поскольку в полевых условиях эти виды более толерантны к полиметаллическому стрессу и при монометаллическом воздействии концентрации в 2–3 предельно допустимых значения не вызывают достоверно значимой разницы, следовательно, не имеют значимости для фитотестирования.

Показатель REс является результатом линейного технического расчёта. По его значениям было установлено (табл. 1), что преимущественно индифферентны к загрязнению Ni²⁺ – *Senecio vulgaris*, Pb²⁺ – *Tripleurospermum inodorum*, Cr³⁺ – *Achillea nobilis* и *Centaurea diffusa*, Cu²⁺ – *Artemisia vulgaris* и *Galinsoga parviflora*, Zn²⁺ – *Achillea nobilis*; при экспериментальных концентрациях ионов Cd²⁺ толерантных видов из числа используемых установлено не было. Этот факт важен для дальнейшего проведения фитотестирования при анализе комбинированных воздействий загрязнителей.

Таблица 1
Фитотестирование в условиях фиксированных концентраций ионов отдельных тяжёлых металлов

Table 1

Phytotesting under conditions of fixed concentrations of ions of individual heavy metals

Виды	Металлы	Концентрации, мг/л	Критерии индикационной значимости		
			REс*	IEс**	гистоструктурные проявления
<i>Achillea nobilis</i> L.	Cd ²⁺	0,5	85,1±5,02	8	массовые некрозы
		3	48,0±2,32		асимметрия корневого чехлика
	Ni ²⁺	4	82,3±3,38	4	лизис конформационной паренхимы
		12	56,5±2,70		массовые некрозы
	Pb ²⁺	6	48,7±2,06	9	недифференцированный дерматокаллитроген
		18	27,8±0,37		
	Cr ³⁺	6	98,4±5,50	2	точечные некрозы
		12	90,0±5,33		
	Cu ²⁺	3	86,9±3,03	9	элиминация протодермальных образований, асимметрия корневого чехлика
		30	35,2±0,36		
	Zn ²⁺	23	97,9±3,61	1	точечные некрозы
		60	94,5±4,41		
<i>Artemisia vulgaris</i> L.	Cd ²⁺	0,5	75,1±4,83	9	элиминация протодермальных образований, асимметрия корневого чехлика, прозенхимная деградация дерматогена, массовые некрозы
		5	31,7±0,43		
	Ni ²⁺	4	95,0±5,03	10	
		15	33,7±0,77		
	Pb ²⁺	6	88,2±4,34	7	точечные некрозы
		20	59,3±2,82		
	Cr ³⁺	6	85,8±3,80	10	лизис конформационной паренхимы
		15	36,9±1,40		
	Cu ²⁺	3	96,0±5,19	1	точечные некрозы
		36	96,4±3,31		
	Zn ²⁺	23	87,1±5,35	9	элиминация протодермальных образований
		72	31,2±0,84		
<i>Centaurea diffusa</i> Lam.	Cd ²⁺	0,5	89,9±4,04	5	точечные некрозы
		5	73,0±3,39		массовые некрозы
	Ni ²⁺	4	88,5±4,08	3	точечные некрозы
		15	65,2±2,42		лизис конформационной паренхимы
	Pb ²⁺	6	57,1±2,18	8	прозенхимная деградация дерматогена
		20	31,3±1,05		
	Cr ³⁺	6	93,1±4,59	2	точечные некрозы
		15	90,4±5,09		
	Cu ²⁺	3	87,6±4,55	5	массовые некрозы
		36	75,6±3,88		
	Zn ²⁺	23	84,0±4,17	3	точечные некрозы
		72	72,0±4,30		прозенхимная деградация дерматогена
<i>Galinsoga parviflora</i> Cav.	Cd ²⁺	0,5	66,2±2,20	9	асимметрия корневого чехлика, лизис конформационной паренхимы, недифференцированный дерматокаллитроген, элиминация протодермальных образований, массовые некрозы
		3	45,9±1,09		
	Ni ²⁺	4	68,8±2,56	8	
		12	47,7±1,03		
	Pb ²⁺	6	69,0±2,20	8	
		18	34,1±1,29		
Cr ³⁺	6	69,8±3,27	10	асимметрия корневого чехлика	

Виды	Металлы	Концентрации, мг/л	Критерии индикационной значимости		
			REс*	IEс**	гистоструктуры проявления
<i>Senecio vulgaris</i> L.	Cu ²⁺	12	28,6±0,09	1	массовые некрозы
		3	95,2±5,85		точечные некрозы
		30	93,4±5,22		
	Zn ²⁺	23	67,1±0,45	10	лизис конформационной паренхимы, недифференцированный дерматокалитроген, асимметрия корневого чехлика, массовые некрозы
		60	27,0±0,89		
	Cd ²⁺	0,5	74,0±2,03	9	массовые некрозы
		3	29,7±0,83		
	Ni ²⁺	4	92,0±4,00	1	точечные некрозы
		12	91,8±4,16		
	Pb ²⁺	6	83,0±3,02	4	прозенхимная деградация дерматогена
		18	59,1±1,13		
	Cr ³⁺	6	82,8±4,00	5	асимметрия корневого чехлика
12		66,2±2,01	массовые некрозы		
Cu ²⁺	3	80,8±5,54	4	точечные некрозы	
	30	67,1±3,15		лизис конформационной паренхимы	
	23	54,5±2,02		асимметрия корневого чехлика	
Zn ²⁺	60	28,6±0,78	9	массовые некрозы	
<i>Tripleurospermum inodorum</i> (L.) Sch. Bip.	Cd ²⁺	0,5	88,6±4,49	5	элиминация протодермальных образований
		5	73,2±3,80		
	Ni ²⁺	4	85,9±4,02	3	массовые некрозы
		15	67,8±2,52		лизис конформационной паренхимы
	Pb ²⁺	6	98,6±5,14	1	точечные некрозы
		20	97,0±3,03		
	Cr ³⁺	6	57,2±0,78	10	прозенхимная деградация дерматогена, массовые некрозы
		15	31,9±0,86		
	Cu ²⁺	3	87,7±5,48	3	элиминация протодермальных образований
		36	77,4±3,53		
	Zn ²⁺	23	89,2±4,47	5	точечные некрозы
		72	75,1±2,16		

Примечание. *REс – показатель реального эмбриологического качества зародышевого корешка, **IEс – индекс эмбриологической уязвимости (пояснение в тексте).

Установлена металлочувствительность в условиях фиксированных концентраций для тест-видов: *Achillea nobilis* – для Pb²⁺ и Cu²⁺; *Artemisia vulgaris* – Cd²⁺, Ni²⁺, Cr³⁺ и Zn²⁺; *Centaurea diffusa* – Pb²⁺; *Galinsoga parviflora* – Cd²⁺, Ni²⁺, Pb²⁺, Cr³⁺ и Zn²⁺; *Senecio vulgaris* – Cd²⁺ и Zn²⁺; *Tripleurospermum inodorum* – Cr³⁺. Такая межвидовая разница указывает на поливалентность видов даже близких в таксономическом отношении (в рамках одного семейства). Полученный результат является основанием для формирования комбинаций комплексных загрязнений в фиксированных лабораторных условиях с учётом реально установленных концентраций ионов металлов в растворах, полученных из образцов почвогрунтов некоторых предприятий Донбасса.

На втором этапе фитотестирования был использован семенной материал тех же видов, при этом растворы для проращивания были составлены в комбинации с теми металлами, которые вызывают существенный процесс угнетения корневого корешка на первых этапах прорастания. Этот этап фитотестирования важен для дальнейшего учёта в выводах о фитотоксичности среды в целом. Были использованы комбинации концентраций ионов, указанные в большем значении (табл. 1).

Экспериментально доказано, что в разных сочетаниях элементов фитотоксичность раствора может характеризоваться как усилением агрессивности среды, так и её снижением при неконкурентном ингибировании. Достоверно установлено, что в парных сочетаниях Cd²⁺-Zn²⁺, Pb²⁺-Zn²⁺ наблюдается антагонизм токсичности и по используемым критериям фитоиндикационной значимости для *Artemisia vulgaris*, *Galinsoga parviflora* и *Senecio vulgaris* ростовые процессы корня были близки к контрольным значениям, то есть доказан процесс антагонизма в парных группах металлов. Однако при добавлении в раствор Cr³⁺

в случае с *Galinsoga parviflora* наблюдается резкое подавление ростовых процессов: корневая система полностью разрушается в растворе за первую половину экспозиции опыта.

Совместное нахождение в растворе токсичных ионов в сочетании $Pb^{2+}-Cu^{2+}$ (тестирование на *Achillea nobilis*), $Cd^{2+}-Ni^{2+}$ (*Artemisia vulgaris*), $Pb^{2+}-Cr^{2+}$ (*Galinsoga parviflora*) вызывало усиление токсичного эффекта, при этом показатель реального эмбриологического качества зародышевого корешка не превышал значения 21,2. В большинстве случаев при парных и всех апробированных тройных сочетаниях растворов $Cd^{2+}-Ni^{2+}-Cr^{3+}$ (*Artemisia vulgaris*) и $Pb^{2+}-Cr^{3+}-Zn^{2+}$ (*Galinsoga parviflora*) доказано проявление суммационного токсического эффекта. В этой серии экспериментов массовые некрозы и лизис конформационной паренхимы были настолько частыми, что выделить дифференциацию в проявлении других гистоструктурных преобразований не представляется возможным. Предполагаем, что влияние аниона в растворе (при использовании всех нитратных солей) также усугубило ситуацию с резистентностью корневых меристем, – это требует дальнейшего детального изучения. Возможно, что присутствие такого дополнительного лабораторного фактора при осуществлении эксперимента с чистыми растворами (анионная избыточная концентрация) может быть устранено при изучении концентраций токсичных элементов катионного состава в образцах почв при анализе полевого блока исследований по фитотестированию.

Третий этап (обработка полевых сборов) фитотестирования был проведён для почвенных сред, сформированных в зонах влияния промышленных предприятий. Во всех случаях почвенный покров представлен технозёмами на базе природных чернозёмов – техногенными почвогрунтами, характерными для антропогенно трансформированной среды Донбасса.

В табл. 2 представлены результаты элементного анализа по содержанию выбранной группы подвижных форм тяжёлых металлов в почвенных образцах и диапазоны значения показателя реального эмбриологического качества зародышевого корешка для всех видов растений с рассчитанным 10-балльным коэффициентом эмбриологической уязвимости.

Таблица 2

Фитотестирование почв в зонах влияния промышленных предприятий

Table 2

Phytotesting of soils in the zones of impact of industrial enterprises

Предприятие	Концентрации тяжёлых металлов, мг/л						Критерии	
	Cd^{2+}	Ni^{2+}	Pb^{2+}	Cr^{3+}	Cu^{2+}	Zn^{2+}	REc	IEs
Енакиевский металлургический завод	5,6	18,2	19,2	8,0	31,6	72,3	12-36	8
Юзовский металлургический завод	3,2	4,5	10,9	7,6	28,5	66,6	19-45	8
Макеевский металлургический комбинат	5,0	12,2	12,0	6,0	27,9	103,5	12-45	8
Енакиевский коксохимзавод	3,2	5,8	9,4	12,4	14,3	45,1	25-49	7
Макеевский коксохимзавод	4,7	6,0	8,1	11,9	16,8	43,6	29-53	6
Ясиновский коксохимзавод	5,9	7,4	6,3	14,0	14,0	43,2	14-50	7
Харьковский трубный завод	4,4	15,7	6,7	7,9	30,5	49,4	20-55	7
Концерн Стирол	1,4	2,3	4,5	4,1	8,7	27,0	40-82	3
Старобешевская ТЭС	1,5	3,0	19,8	4,6	7,1	30,9	34-80	4
Зуевская ТЭС	0,4	2,9	6,6	4,7	7,2	27,5	29-71	3

Анализ результатов определения подвижных форм тяжёлых металлов в выбранной группе элементов для почвенных растворов позволяет установить следующее: 1) наибольшая металлонагрузка на ризоэдафосферу в Донбассе осуществляется в зонах влияния металлургических предприятий – в большей степени экотопы Енакиевского металлургического завода и Макеевского металлургического комбината; 2) меньшими концентрациями тяжёлых металлов характеризуются почвы Концерн Стирол и Зуевской ТЭС; 3) специфично Cr-загрязнение для группы коксохимических заводов, однако Ясиновский коксохимзавод выделяется в дополнение Cd^{2+} -загрязнением; 4) эдафотоп Старобешевской ТЭС содержит наибольшее коли-

чество Pb²⁺, Макеевского металлургического комбината – Zn²⁺; 5) почвы Харцызского трубного завода характеризуются высокими концентрациями Ni²⁺, Cu²⁺ и Zn²⁺. Сравнительно благоприятной для развития корневых систем средой можно считать почвогрунты в зонах воздействия Концерн Стирол, Старобешевской и Зуевской ТЭС. Важно отметить, что индекс эмбриологической уязвимости в растворах на основании природных сред при тех же концентрациях вредных веществ не превышает показателя «8», что значительно меньше по токсичности в сравнении с моно-загрязнением чистыми растворами и указывает на комплексную буферность почвенных проб в отношении проявления общей фитотоксичности для используемых тест-видов.

Результаты дифференцированного межвидового сравнения при фитотестировании почв в зонах влияния промышленных предприятий по показателю линейного роста первичного корешка на начальных стадиях прорастания (табл. 3) сопряжены с выявленной спецификой металлочувствительности по лабораторным данным на чистых растворах (табл. 1) и при комплексном загрязнении (табл. 2): *Achillea nobilis* наиболее угнетается высокими концентрациями Cu²⁺ и Pb²⁺; *Artemisia vulgaris* – Cd²⁺, Ni²⁺, Cr³⁺ и Zn²⁺; *Centaurea diffusa* – Pb²⁺; *Galinsoga parviflora* – Pb²⁺, Cr³⁺ и Zn²⁺; *Senecio vulgaris* – Cd²⁺ и Zn²⁺; *Tripleurospermum inodorum* – Cr³⁺.

Таблица 3

Дифференцированные фитотестовые показатели для почв в зонах влияния промышленных предприятий

Table 3

Differentiated phytotest indicators of soils in the zones of impact of industrial enterprises

Предприятие	Виды					
	<i>Achillea nobilis</i>	<i>Artemisia vulgaris</i>	<i>Centaurea diffusa</i>	<i>Galinsoga parviflora</i>	<i>Senecio vulgaris</i>	<i>Tripleurospermum inodorum</i>
Енакиевский металлургический завод	12	14	12	14	14	36
Юзовский металлургический завод	19	40	41	36	42	45
Макеевский металлургический комбинат	12	12	13	12	12	45
Енакиевский коксохимзавод	49	25	48	25	40	25
Макеевский коксохимзавод	51	29	53	29	50	29
Ясиновский коксохимзавод	40	14	50	14	15	14
Харцызский трубный завод	20	21	52	21	20	55
Концерн Стирол	76	40	71	45	74	82
Старобешевская ТЭС	70	73	34	77	75	80
Зуевская ТЭС	36	45	49	29	38	71

Следовательно, по данным проведённого фитотестирования наблюдается как возможность выявления индикационных свойств растений по комплексному фактору стресса, так и при дробной элементной диагностике загрязнителя (одного или двух тяжёлых металлов), однако, такое предположение верно для обозначенных диапазонов установленного загрязнения и определенных концентрациях отдельной группы металлов (Cd, Ni, Pb, Cr, Cu, Zn).

Заключение

На территории промышленного Донбасса сформированы контрастные геохимические условия, требующие многостороннего анализа и своевременного контроля. Показатели содержания токсичных элементов, среди которых по распространённости и опасности выделяются тяжёлые металлы, в зонах влияния промышленных предприятий превышают норму. Такая ситуация требует проведения многофункционального экологического мониторинга и оценки рисков реализации жизненных процессов в эко-топах высокой техногенной нагрузки.

В результате проведённого трёхэтапного фитотестирования растворов с содержанием активных форм Cd²⁺, Ni²⁺, Pb²⁺, Cr³⁺, Cu²⁺, Zn²⁺ тест-объектами *Achillea nobilis*, *Artemisia vulgaris*, *Centaurea diffusa*, *Galinsoga parviflora*, *Senecio vulgaris*, *Tripleurospermum*

inodorum для практики индикационной экспертизы важными являются результаты: 1) комплексное загрязнение ионами тяжёлых металлов в природных средах (на примере почвенной) имеет менее агрессивно выраженный коэффициент фитотоксичности по сравнению с аналогичными концентрациями на чистых лабораторных растворах; 2) при экспресс-определении качества почв по критерию полиметаллического загрязнения целесообразно использовать *Artemisia vulgaris* и *Galinsoga parviflora*; 3) дифференцированный отклик при монометаллическом загрязнении может быть выявлен при фитотестировании с помощью *Centaurea diffusa* и *Tripleurospermum inodorum*; 4) апробированные критерии индикационной значимости (показатель реального эмбриологического качества зародышевого корешка и индекс эмбриологической уязвимости) выявили достоверную дифференциацию результатов при моно- и полифакторном металл-индуцированном стрессе.

Установленные зависимости в системе «растительный организм – токсичная среда» по реакции первичных корневых структур могут представлять интерес также для фундаментального изучения реализации стратегий выживания видов в нестабильных экологических условиях.

Работа реализована в рамках государственной научной темы № 0117D000192 «Функциональная ботаника: экологический мониторинг, ресурсные технологии, фитодизайн».

Список литературы

- Baker A. J. M., Brooks R. R. 1989. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements – a review of their distribution, ecology and phytochemistry // *Biorecovery*. Vol. 1. P. 81–126.
- Clemens S. 2001. Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis // *Planta*. Vol. 212. P. 475–486.
- [Dorohina] Дорохина З. П. 2018. Фитоиндикация процессов деградации почв: основные термины и определения // *Вестник науки*. Т. 3. № 8. С. 229–237.
- [Eremchenko et al.] Еремченко О. З., Митракова Н. В. 2016. Фитотестирование почв и техногенных поверхностных образований в урбанизированных ландшафтах // *Вестник Пермского ун-та*. Вып. 1. С. 60–70.
- Eremchenko O. Z., Mitrakova N. V., Moskvina N. V. 2019. Phytotesting of the soils of urban pedocomplexes in residential areas of Perm, Russia // *Appl. Ecology and Environmental Research*. N 2 (17). P. 3179–3197.
- [Ibragimova] Ибрагимова Э. Э. 2018. Мониторинг состояния окружающей среды методами фитоиндикации техногенного химического загрязнения // *Человек – Природа – Общество: Теория и практика безопасности жизнедеятельности, экологии и валеологии*. № 4 (11). С. 57–61.
- 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.
- Kumar R. 2018. A review of phylogeography: biotic and abiotic factors // *Geology, Ecology, Landscapes*. Vol. 2. № 4. P. 268–274.
- Parmar T. K., Rawtani D., Agrawal Y. K. 2016. Bioindicators: the natural indicator of environmental pollution // *Frontiers in Life Sci.* Vol. 9. № 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.* Vol. 52. № 10. P. 1274–1288.
- [Pospelova et al.] Поспелова А. О., Мардра Ю. А., Зеленская Т. Г., Гудиев О. Ю. 2017. Оценка экологического состояния окружающей среды городских территорий методами биоиндикации и биотестирования. Ставрополь: Ставропольский гос. аграрный ун-т. 161 с.
- [Rakhimov et al.] Рахимов Т. У., Байсунов Б. Х., Хайридинов Д. Б. 2014. Фитоиндикации в оценке загрязнения промышленных зон // *Вестник Воронежского гос. ун-та*. Сер.: География, геоэкология. № 2. С. 62–65.
- [Safonov] Сафонов А. И. 2009. Стратегическая потенциализация фитоиндикаторов техногенных загрязнений // *Аграрная Россия*. № 51. С. 58–59.
- Safonov A. I. 2013. Phyto-qualitymetry of toxic pressure and the degree of ecotopes transformation in Donetsk region // *Problems of ecology and nature protection of technogenic region*. № 1. P. 52–59.
- [Safonov] Сафонов А. И. 2017. Фитоэмбриональный скрининг в экологическом мониторинге Донбасса // *Зелёный журнал – бюл. ботанического сада Тверского гос. ун-та*. Вып. 3. С. 6–14.
- [Safonov] Сафонов А. И. 2019. Сорно-рудеральная фракция урбанофлоры Донецкой агломерации как показатель трансформации локальных экосистем // *Трансформация экосистем под воздействием природных и антропогенных факторов: Мат. Междунар. науч. конф. (Киров, 16–18 апреля 2019 г.)*. Киров: ВятГУ. С. 13–16.
- [Safonov] Сафонов А. И. 2020 а. 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 б. Новые виды растений в экологическом мониторинге Донбасса // *Вестник Донецкого нац ун-та*. Сер. А: Естественные науки. № 1. С. 96–100.
- Safonov A. I. 2016. Phytoindicational monitoring in Donetsk // *World Ecology Journ.* Vol. 6. № 4. P. 59–71.

The Euro+Med PlantBase – the information resource for Euro-Mediterranean plant diversity [Electronic resource]. URL: <http://ww2.bgbm.org>. Date of access: 15.11.2020.

References

- Baker A. J. M., Brooks R. R. 1989. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements – a review of their distribution, ecology and phytochemistry // *Biorecovery*. Vol. 1. P. 81–126.
- Clemens S. 2001. Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis // *Planta*. Vol. 212. P. 475–486.
- Dorokhina Z. P. 2018. Fitoindikatsiia protsessov degradatsii pochv: osnovnye terminy i opredeleniia [Phytoindication of soil degradation processes: basic terms and definitions] // *Vestnik nauki*. T. 3. № 8. P. 229–237. (In Russian)
- Eremchenko O. Z., Mitrakova N. V. 2016. Fitotestirovanie pochv i tekhnogennykh poverkhnostnykh obrazovaniy v urbanizirovannykh landshaftakh [Phytotesting of soils and technogenic surface formations in urbanized landscapes] // *Vestnik Permskogo un-ta*. Vyp. 1. P. 60–70. (In Russian)
- Eremchenko O. Z., Mitrakova N. V., Moskvina N. V. 2019. Phytotesting of the soils of urban pedocomplexes in residential areas of Perm, Russia // *Appl. Ecology and Environmental Research*. N 2 (17). P. 3179–3197.
- Ibragimova E. E. 2018. Monitoring sostoianiia okruzhaiushchei sredy metodami fitoindikatsii tekhnogenogo khimicheskogo zagriazneniia [Monitoring of the state of the environment by methods of phytoindication of technogenic chemical pollution] // *Chelovek – Priroda – Obshchestvo: Teoriia i praktika bezopasnosti zhiznedeiatel'nosti, ekologii i valeologii*. № 4 (11). P. 57–61. (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.
- Kumar R. 2018. A review of phytogeography: biotic and abiotic factors // *Geology, Ecology, Landscapes*. Vol. 2. № 4. P. 268–274.
- Parmar T. K., Rawtani D., Agrawal Y. K. 2016. Bioindicators: the natural indicator of environmental pollution // *Frontiers in Life Sci*. Vol. 9. № 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*. Vol. 52. № 10. P. 1274–1288.
- Pospelova A. O., Mardra Iu. A., Zelenskaia T. G., Gudiev O. Iu. 2017. Otsenka ekologicheskogo sostoianiia okruzhaiushchei sredy gorodskikh territorii metodami bioindikatsii i biotestirovaniia [Assessment of the ecological state of the environment of urban areas by bioindication and biotesting methods]. Stavropol': Stavropol'skii gos. agrarnyi un-t. 161 p. (In Russian)
- Rakhimov T. U., Baisunov B. Kh., Khairiddinov D. B. 2014. Fitoindikatsii v otsenke zagriazneniia promyshlennykh zon [Phytoindications in the assessment of pollution of industrial zones] // *Vestnik Voronezhskogo gos. un-ta*. Ser.: Geografiia, geokologiiia. № 2. P. 62–65. (In Russian)
- 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. 2013. Phyto-qualimetry of toxic pressure and the degree of ecotopes transformation in Donetsk region // *Problems of ecology and nature protection of technogenic region*. № 1. P. 52–59.
- Safonov A. I. 2016. Phytoindicational monitoring in Donetsk // *World Ecology Journ*. Vol. 6. № 4. P. 59–71.
- Safonov A. I. 2017. Fitoembrional'nyi skrining v ekologicheskome monitoringe Donbassa [Phytoembryonic screening in environmental monitoring of Donbass] // *Zelenyi zhurnal – biul. botanicheskogo sada Tverskogo gos. un-ta*. Vyp. 3. P. 6–14. (In Russian)
- Safonov A. I. 2019. Sorno-ruderal'naia fraktsiia urbanoflory Donetskoi aglomeratsii kak pokazatel' transformatsii lokal'nykh ekosistem [Weed-ruderal fraction of the urban flora of the Donetsk agglomeration as an indicator of the transformation of local ecosystems] // *Transformatsiia ekosistem pod vozdeistviem prirodnykh i antropogennykh faktorov: Mat. Mezhdunar. nauch. konf. (Kirov, 16–18 apreliia 2019 g.)*. Kirov: ViatGU. P. 13–16. (In Russian)
- Safonov A. I. 2020 a. Dinamika phytomonitoringovykh pokazatelei antropotehnogeneza v Donbasse (2000–2019 gg.) [Dynamics of phytomonitoring indicators of anthropotechnogenesis in Donbass (2000–2019)] // *Problemy ekologii i okhrany prirody tekhnogenogo regiona*. № 1–2. P. 31–36. (In Russian)
- Safonov A. I. 2020 b. Novye vidy rastenii v ekologicheskome monitoringe Donbassa [New species of plants in environmental monitoring of Donbass] // *Vestnik Donetskogo natsional'nogo un-ta*. Ser. A: Estestvennye nauki. № 1. P. 96–100. (In Russian)
- The Euro+Med PlantBase – the information resource for Euro-Mediterranean plant diversity [Electronic resource]. URL: <http://ww2.bgbm.org>. Date of access: 15.11.2020.

Сведения об авторах

Красун Татьяна Ивановна
аспирант кафедры ботаники и экологии
ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», Донецк
E-mail: kf.botan@donnu.ru

Krasun Tatjana Ivanovna
graduate student of the Dept. Botany and Ecology
Donetsk National University, Donetsk
E-mail: kf.botan@donnu.ru