

А.З. Глухов, А.И. Сафонов

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОВЕДЕНИЯ ФИТОИНДИКАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ТЕХНОГЕННО ТРАНСФОРМИРОВАННЫХ ЭКОТОПОВ

фитоиндикация, тяжелые металлы, загрязнение, картографический метод, мониторинг, базы данных

Во многих регионах фоновое загрязнение и дальнейший перенос поллютантов приводят к острым повреждениям растений далеко от источников эмиссий [2, 4, 7, 8, 12, 14]. Для реализации своевременных мероприятий по защите природной среды очень важно разрабатывать систему раннего выявления и экспресс-диагностики изменений в экосистемах [23]. В этом направлении существуют программы локального и комплексного мониторинга [24, 25, 29]. Особо актуальны эти вопросы для антропогенно трансформированных регионов, среди которых на территории Украины выделяется Донбасс [6, 16, 18].

В связи с возрастающим загрязнением и необходимостью глобального мониторинга использование индикационных возможностей растений в условиях техногенных ландшафтов приобретает особенное значение [1, 3, 5, 7]. На основе общих фитоэкологических исследований, базирующихся главным образом на состоянии растений, создаются многочисленные группы карт и планов на местности по загрязненности или влиянию поллютантов на биоту. Картографический метод визуализации является базой для изучения негативного влияния человека на окружающую среду и проявления внешних и внутренних реакций природно-антропогенных систем [13, 21, 30].

Картографический метод охватывает: анализ динамики негативных природных процессов и деградиативных признаков в рамках техногенных ландшафтов, также отдельных компонентов и основных характеристик; анализ плоскостного расположения вредных элементов, которые связаны в первую очередь с функционированием промышленных комплексов, и анализ специальных картографических материалов.

Однако, мониторинговые исследования большей частью проводятся фрагментарно, отсутствует общепризнанная стандартизированная методика экологических наблюдений и сбора информации для составления баз данных. Не разработана также общая концепция трактования изменений среды под влиянием антропогенного прессинга: трансформация, коэволюция, модификация, деградация и т. д. Простая схема трактовки взаимоотношений человека с окружающей средой: «наблюдение — временной ряд внутренних изменений — индикация внешних изменений» не может приниматься как универсальная [20, с. 390].

Цель нашей работы — оценка загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами фитокартографическим способом и разработка методических приемов отображения сопряженности изменчивости признаков растений с уровнем антропогенной нагрузки.

В качестве модельной зоны для проведения исследования выбрана территория Артемовского и Константиновского районов Донецкой области площадью 2,9 тыс. км², где нами была заложена 302-компонентная 2-уровневая мониторинговая сетка в соответствии с установленными требованиями [24] таким образом, чтобы в квадрате площадью 10 км² располагалась мониторинговая точка (пробная площадь) для сбора проб (рис. 1). Урбаноландшафты г. Артемовска и г. Константиновки характеризовали полуторной плотностью локализации узлов мониторинговой сетки ввиду большей гетерогенности металлонасыщения почв и с целью более достоверного последующего определения специфики металлопрессинга, как показано на рисунке 1. Выбор пробных площадей проводили с требованием соответствия



Рис. 1. Локализация узлов мониторинговой сетки в Артемовском и Константиновском районах Донецкой области

их максимально однородным эдафо-климатическим, орографическим и фитоценотическим условиям. Использовали равнинные территории средней степени увлажнения с произрастающими на них видами *Cichorium intybus* L., *Tripleurospermum perforatum* (Merat) M.Laipz, *Tanacetum vulgare* L., *Taraxacum officinale* Webb. ex Wigg., *Tragopogon major* Jacq., *Achillea collina* Becker ex Reichenb. (*Asteraceae* Dum.); *Daucus carota* L. (*Apiaceae* L.); *Berteroa incana* (L.) DC., *Lepidium sativum* L. (*Brassicaceae* L.); *Echium vulgare* L. (*Boraginaceae* L.); *Reseda lutea* L. (*Resedaceae* S. F. Gray); *Plantago major* L. (*Plantaginaceae* Juss.); *Elytrigia repens* (L.) Nevski (*Poaceae* L.). Эти виды оптимально соответствуют требованиям фитоиндикаторов для антропогенно трансформированных территорий северных промышленных узлов Донбасса, что было описано ранее по многочисленным ботаническим характеристикам [17]. Выбор этих видов был обусловлен их широкой экологической амплитудой и возможностью стабилизации структурной пластичности [20]. Механизм отбора проб растительного материала и в ризосфере описан нами ранее [17, 27] и соответствует требованиям при проведении мониторинговых исследований [13, 24].

С помощью специально созданной компьютерной программы “Phytomonitor” вся зона исследования была представлена в виде векторно-информационного поля с 302-компонентной стандартизацией и 3-миллионным блоком данных. За 1998-2001 годы нами собрана база данных содержания тяжелых металлов (Pb, Zn, Cd, Ni, Cr, Mo, Fe, Mn, Cu, Hg) в органах растений и в корнеобитаемом горизонте питания.

В качестве примера на рисунке 2 представлена специфика локализации свинца в ризосфере, визуализация чего стала возможной при реализации программы “Phytomonitor”.

Формула для вычисления загрязнения в точке А с координатами (х,у) позволяет представить все мониторинговые зоны в виде 3-миллионного векторного слоя:

$$A = \frac{n_1/r_1^2 + n_2/r_2^2 + n_3/r_3^2 + n_4/r_4^2}{1/r_1^2 + 1/r_2^2 + 1/r_3^2 + 1/r_4^2},$$

где А – любая из 3 000 000 точек векторного поля,

n_i – загрязнение на четырёх участках, ближайших к точке А,

r_i – среднее пропорциональное между четырьмя ближайшими точками, рассчитывается по формуле:

$$r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$$

где х, у – координаты точки А,

x_i, y_i – координаты четырёх участков, ближайших к точке А.

Разделение всего диапазона варьирования признаков на 10 интервалов было основано на 10%-ной частоте встречаемости их характеристик. Например, для свинца 10% всех минимальных показателей, полученных методом анализа, входили в интервал от 0 до 69 мг/кг, что отображено на рисунке 2. Последующие интервалы вычисляли сходным методом со смещением в сторону 7–8%-ной поправки для облегчения расчетов и устранения грубой разнокачественности ступеней повышения признака с целью сохранения стабильного одинакового шага в интервальном переходе. Методика обработки всех данных по структурным изменениям в растениях и 10%-ного балльно-шкального разделения их в качестве визуально демонстрационного примера структурных трансформаций индикаторных видов аналогична проведенной для металлов.

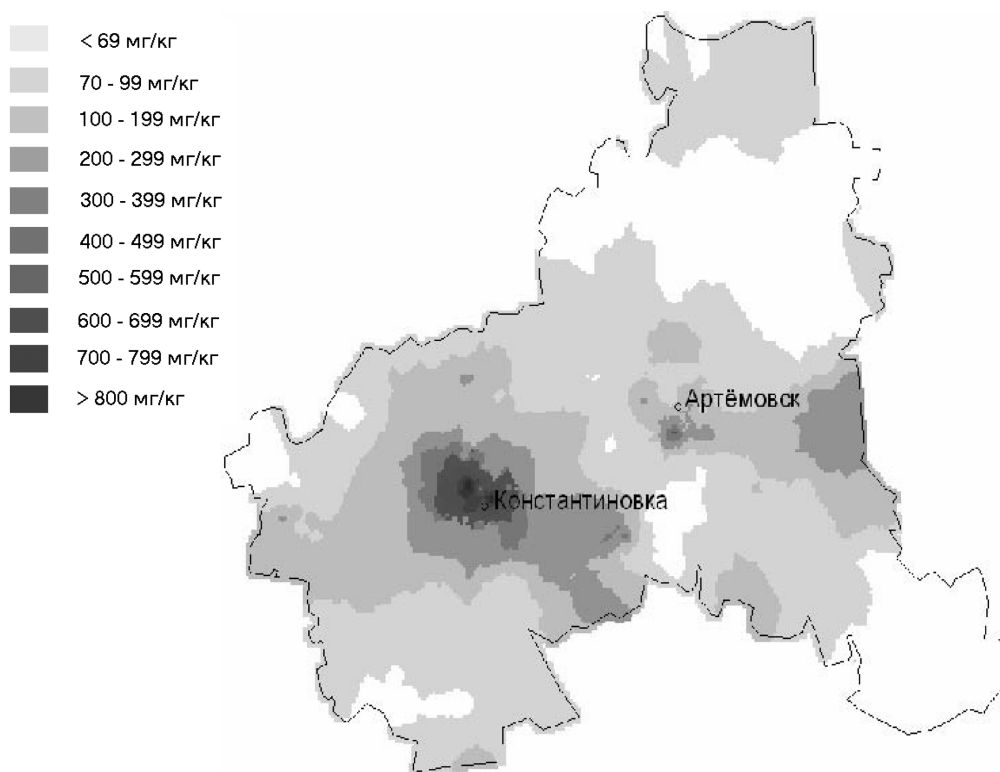


Рис. 2. Специфика локализации свинца в ризосфере травянистых растений на территории Артёмовского и Константиновского районов

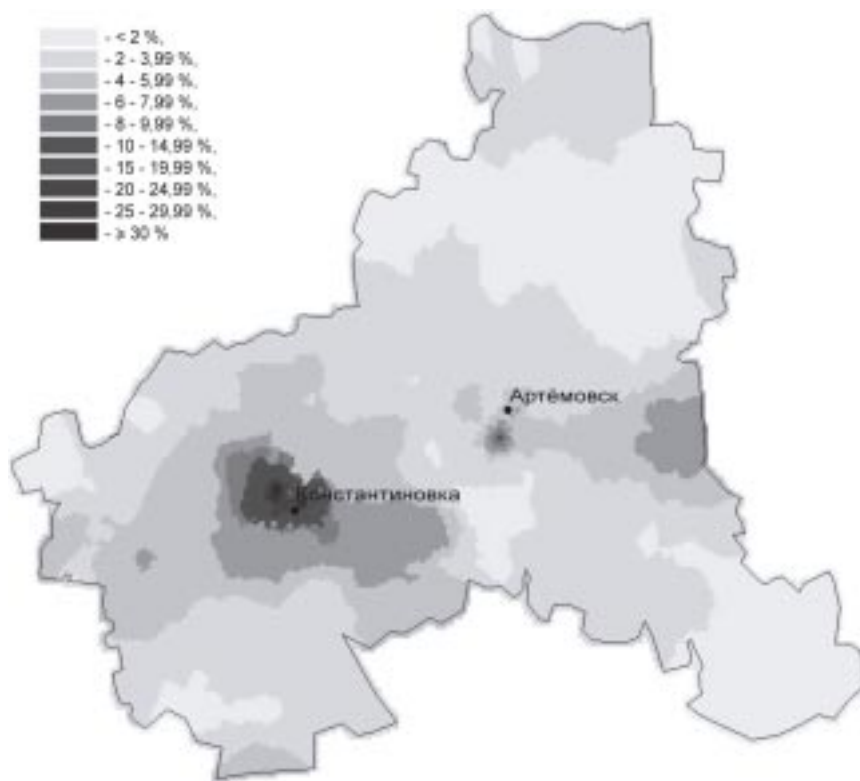


Рис. 3. Карта-схема частоты встречаемости анизокотилии для *Cichorium intybus* L. на территории Артемовского и Константиновского районов

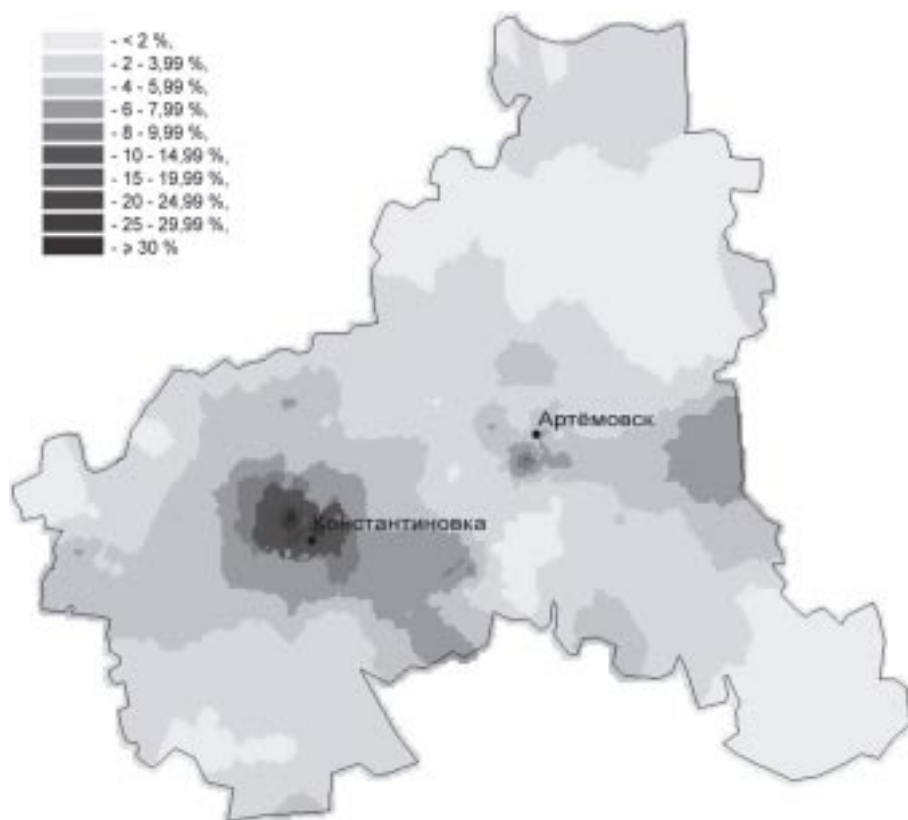


Рис. 4. Карта-схема частоты встречаемости схизокотилии для *Cichorium intybus* L. на территории Артемовского и Константиновского районов

На рисунках 3 и 4 представлены карты-схемы встречаемости степени разнокачественности семядолей — соответственно анизокотилии и схизокотилии для *C. intybus* на территории Артемовского и Константиновского районов Донецкой области. Идея использования шкал устойчивости видов природной флоры не нова в литературе [23], но эти шкалы толерантности позволяют определять и устанавливать оптимумы и экологические преферендумы по количеству видов, их обилию и соотношению в структуре сообществ. В этой работе [23] комфортапы отражают степень отклонения от 100%-ного оптимума, исследование чего не преследуется в рамках поставленной нами цели.

Методика определения сопряженности и корреляции анатомо-морфологических признаков со степенью и спецификой металонагрузки заключается в вычислении следующих четырех критериев оценки: коэффициент корреляции (для 302-блокового сравнения), общий картографический коэффициент корреляции (для 3-миллионного блокового сравнения), общие площади для металла и признака при среднем уровне загрязнения по пятому интервалу варьирования показателей, что выражается в процентах от максимально возможной этой величины, и общие площади при наибольшем уровне загрязнения (10-й максимальный интервал), которые указаны в таблице.

Необходимо также отметить, что ни одна из моделей и схематически визуализированных карт не может отражать на 100% картину действительности, поскольку сам принцип отражения аналитической информации на плоскости заключается в игнорировании параметров второй малости, упрощении и приближении ненаправленных и нелимитирующих факторов; иначе задача визуализации не может быть реализована.

В качестве примера в таблице проанализированы признаки и показатели частоты встречаемости анизокотилии (рис. 3), тератологической схизокотилии (рис. 4), дисимметричного полиморфизма плодов, гетерорамии и матрикальной гетероспермии для *C. intybus*. Гистологическая дифференциация и терминологическое соответствие проведено по литературным данным [9, 13, 19, 22, 26, 28]. Первичное визуальное сравнения рисунков 2, 3 и 4 находит сходство в плоскостном распределении фактора и признаков, что также указывает на высокую степень сопряженности между самими показателями — частоты встречаемости анизокотилии и тератологической схизокотилии *C. intybus*.

Анализ таблицы позволяет сделать некоторые выводы и очертить тенденции для указанных пяти признаков:

- 1) информативными показателями определены анизокотилия, тератологическая схизокотилия и матрикальная гетероспермия для фактора загрязнения свинцом;
- 2) частота дисимметричного полиморфизма плодов тесно не коррелирует ни с одним из металлов;
- 3) сравнение r и R не может выделить лучший критерий, но совпадение положительной и отрицательной корреляции может указывать на однонаправленность специфики определения, что подтверждает взаимодополняемость критериев во всех случаях;
- 4) критерий оценки S-10 по модулю всегда превышает S-5, что, скорее всего, обусловлено обострением проявления признака при усилении фактора загрязнения во всех вариантах;
- 5) все 4 критерия сопоставимы по характеру при выявлении общих закономерностей, но ни один в отдельности не является универсальным.

Приведенные примеры вовсе не умаляют эффектов действия остальных металлов (кроме свинца). Так, Zn по результатам корреляционно-сопряженного анализа оказывает влияние на появление головчатых трихом на нижней поверхности листовой пластинки *C. intybus*, форму столбиков пыльцевых зерен, при загрязнении Cd может использоваться индекс аномальности анастомозной сетки, Ni — степень дефектности пыльцы, Cr — индекс гетерогенности трахеальных элементов и гемитрихотилия, Mo — сильно сморщенная поверхность семянки,

Таблица. Характеристики сопряженности структурной трансформации *Cichorium intybus* L. и содержания тяжелых металлов в почве

Признак	Критерий оценки*	Металлы									
		Pb	Zn	Cd	Ni	Cr	Mo	Fe	Mn	Cu	Hg
Анизокотилия	г	+0,95	+0,12	+0,16	+0,21	+0,05	+0,02	-0,16	+0,05	-0,12	+0,20
	R	+0,89	+0,10	+0,14	+0,16	+0,13	+0,17	-0,13	+0,15	-0,04	+0,02
	S-5	62,3	10,0	19,3	13,4	4,5	2,1	14,1	3,2	15,2	0,3
	S-10	92,4	12,1	20,1	16,2	10,1	12,4	16,2	13,5	16,4	3,6
Тератологическая схизокотилия	г	+0,97	+0,12	+0,17	-0,09	+0,19	+0,09	+0,10	-0,15	+0,14	+0,09
	R	+0,96	+0,21	+0,07	-0,08	+0,17	+0,16	+0,11	-0,13	+0,08	+0,13
	S-5	69,2	16,9	20,8	2,7	3,6	4,3	17,1	3,9	18,5	2,4
	S-10	94,0	18,3	25,7	13,3	17,6	16,5	19,3	20,3	25,0	21,2
Дисимметричный полиморфизм	г	+0,03	-0,14	-0,03	+0,17	+0,09	+0,04	+0,27	-0,10	+0,19	+0,11
	R	+0,07	-0,15	-0,13	+0,05	+0,12	+0,16	+0,35	-0,21	+0,18	+0,13
	S-5	3,5	4,6	20,5	19,7	10,4	5,8	15,7	21,6	12,1	11,8
	S-10	13,5	16,2	27,2	22,3	20,2	15,1	20,0	25,4	13,5	12,1
Гетеромерия	г	+0,01	-0,04	-0,25	+0,09	-0,11	-0,23	+0,12	+0,05	+0,15	+0,06
	R	+0,03	-0,15	-0,10	+0,24	-0,12	-0,04	+0,08	+0,13	+0,07	+0,12
	S-5	6,2	3,2	2,3	21,2	16,7	6,8	20,9	19,6	18,4	17,0
	S-10	16,3	13,6	21,5	41,4	20,3	35,7	39,2	30,9	21,0	29,1
Матрикальная гетероспермия	г	+0,88	+0,03	+0,01	-0,05	+0,04	-0,13	+0,08	+0,12	+0,25	+0,20
	R	+0,80	+0,06	+0,15	-0,10	+0,07	-0,16	+0,09	+0,14	+0,21	+0,19
	S-5	79,6	16,9	10,7	11,4	0,3	13,2	13,6	8,5	9,1	10,0
	S-10	93,7	20,6	30,3	21,2	6,2	20,0	13,9	17,1	19,8	17,2

* **Примечание:** г – коэффициент корреляции, R – общий картографический коэффициент корреляции, S-5 – общие площади для металла и признака при среднем уровне загрязнения, S-10 – общие площади для металла и признака при наибольшем уровне загрязнения в процентах от максимально возможного

Fe — дугоподобно согнутые трихомы листа, Mn — показатель радиального роста меристематической зоны всех вегетативных органов, разрастание эндосперма, Cu — тератологическая поликотилия, Hg — изменение формы корневого чехлика.

В предыдущих работах [17, 27] нами были описаны и проанализированы признаки и индексы для *Cichorium intybus* L. и *Tripleurospermum perforatum* (Merat) M. Laipz. Так, изучение гистоструктурных особенностей корневой системы проводили по следующим показателям: деградация периферийной части дерматогена, стимулирование образования колумеллы не из апикальной инициали, многорядность ризодермы, утолщение слоя экзодермы, увеличение межклетников первичной коры, суммарный показатель мелкоклеточности, показатель радиального роста меристематической зоны, индекс гетерогенности трахеальных элементов, индекс деформации терминальной флоэмы, габитуальная асимметричность корневой системы и т. д. Использование результатов, полученных в других аспектах структурированности и степеней корреляции с металлическими агентами, позволило выделить 6 основных сопряженных групп, которые, как правило, гисто-физиологически относительно однородны и проявляют одинаковую тенденцию реакции ткани на металлическое загрязнение. Так, например, хром влияет на разнокачественность трахеальных элементов всех вегетативных органов тест-растений.

Нами составлена база данных по ризо-, каули-, фолио-, палино-, анто-, эмбрио- и карпологическим признакам для характеристики структурной организации или степени трансформации атипичного проявления для каждого из указанных фитоиндикаторов.

Таким образом, проведение фитоиндикационного мониторинга техногенно трансформированных экотопов перспективно в рамках надежности и достоверной оценки загрязнения окружающей среды, например, тяжелыми металлами, сбора аналитической информации о состоянии среды и обработки данных картографическими векторными методами с целью индикации и определения механизмов сопряженности первичного автотрофного блока с факторами техногенной нагрузки на природные экосистемы.

1. Бессонова В.П. Пасивний моніторинг забруднення середовища важкими металами з використанням трав'янистих рослин // Укр. ботан. журн. – 1991. – № 2. – С. 77-80.
2. Гетко Н.В. Растения в техногенной среде. – Минск: Наука и техника, 1989. – 205 с.
3. Дідух Я.П., Плюта П.Г. Фітоіндикація екологічних факторів. – К.: Наук. думка, 1994. – 280 с.
4. Коршиков И.И. Адаптация растений к условиям техногенно загрязненной среды. – Киев: Наук. думка, 1996. – 238 с.
5. Коршиков И.И. Использование растений в индикации техногенного загрязнения окружающей среды // Охорона довкілля та екологічна безпека. (Збірка доповідей науково-практичної конференції, Донецьк, 21–22 листопада 2001 р.) – Донецьк, 2001. – Т. 2.– С. 44–46.
6. Коршиков И.И., Котов В.С., Михеенко И.П. Взаимодействие растений с техногенно загрязненной средой. – Киев: Наук. думка, 1995. – 191 с.
7. Промышленная ботаника / Е.Н. Кондратюк, В.П. Тарабрин, В.И. Бакланов, Р.И. Бурда, А.И. Хархота. – Киев: Наук. думка, 1980. – 260с.
8. Baker A.J., Walker P.L. Physiological responses of plants to heavy metals and the quantification of tolerance and toxicity // Bioavailability. – 1989. – № 1. – P. 7–17.
9. Bertin R.I. Plant reproductive ecology: patterns and strategies // Reproductive ecology. – Oxford: Oxford University Press, 1988. – P. 30–59.
10. Bortlyn G.P., Miksche J.P. Botanical microtechnique and cytochemistry. – Ames: Iowa State University Press, 1996. – 326 p.
11. Chambers K.L. Amphitropical species pairs in *Micraseris* and *Agoseris* (*Compositae: Cichoriae*) // Quarterly Review of Biology. – 1997. – №38. – P. 124–140.
12. Costescu L.M., Hutchinson T.S. The ecological consequences of soil pollution by metallic dust from the Sudbury smelters // Environmental progress in science and education. – 1972. – № 2. – P. 540–545.
13. Degorski M. Phytoindication methods in landscape planning and management // Geographical and Management. – 1996. – № 62. – P. 69–100.
14. Foy C.D., Chaney R.L., White M.C. The physiology of metal toxicity in plants // Article Review Plants Physiology. – 1978. – №29. – P. 511–566.

15. *Fruman D.C., Graham J.H., Emlen J.M.* Developmental stability in plants: symmetries, stress and epigenesis // *Genetica*. – 1993. – № 89. – P. 97–119.
16. *Glukhov A.Z., Safonov A.I.* Metallogenical phytotransformation on Donbass // *Problems of today in bioindication and biomonitoring (XI International Symposium on Bioindicatorsm, Syktyvkar, 17-21 September, 2001)* – Syktyvkar. – 2001. – P. 254–255.
17. *Glukhov A.Z., Safonov A.I.* Structural organization of plants under conditions of metal pollution of Donbass // *Bioindicators*. – 2002. – № 1. – P. 120–138.
18. *Glukhov A.Z., Safonov A.I.* Structural plasticity of plants under a weak metallic stress // *Plant under Environmental Stress (International Symposium, Moscow, 23–28 October, 2001)* – Moscow. – 2001. – P. 81–82.
19. *Kaul V.* Cytology and embryology of Indian *Cichorieae (Compositae)*. – Jaipur: University of Rajasthan, 1993. – 470 p.
20. *Kavelenova L.M.* Concerning some problems and perspectives of higher plants exploration as phytoindicators of technogenic pollution level in urban environment // *Problems of today in bioindication and biomonitoring (XI International Symposium on Bioindicatorsm, Syktyvkar, 17-21 September, 2001)* – Syktyvkar, 2001. – P. 390–391.
21. *Klein R.M., Klein D.* Research method in plant science. – N. York: Nature History Press, 1970. – 756 p.
22. *Korn R.* Heterogenetic growth of plant tissues // *Botanical Journal Linn Society*. – 1993. – № 112. – P. 351–371.
23. *Markelov D.A.* Bioindication of environmental based on the scales of tolerance of plant species // *Problems of today in bioindication and biomonitoring (XI International Symposium on Bioindicatorsm, Syktyvkar, 17-21 September, 2001)* – Syktyvkar, 2001. – P. 309–310.
24. *Munn R.E.* Global Environmental Monitoring System. – Toronto: SCOPE, № 3. – 1973. – 370 p.
25. *Osmanova G.O., Golovenkina I.A.* The monitoring of morphological plasticity vegetative organs of some grassy plants // *Problems of today in bioindication and biomonitoring (XI International Symposium on Bioindicatorsm, Syktyvkar, 17-21 September, 2001)* – Syktyvkar, 2001. – P. 330–331.
26. *Saas J.E.* Botanical microtechnique. Amus, Iowa: Iowa State College Press, 1988. – 228 p.
27. *Safonov A.I.* Correlation of the structural transformation indexes in plants under metal stress conditions // *Вісн. Львів. ун-ту. Серія біологічна*. – 2002. – № 29. – С. 193–204.
28. *Sarma D.V.* Embriological, palynological and foliar dermotype studies in *Asteraceae*. – Waltair: Ardhra University, 1996. – 576 p.
29. *Tracy M.J., Freeman D.C., Emlen J.M.* Developmental instability as a biomonitor of environmental stress. – New York, 1995. – P. 313–337.
30. *Vorobeichik E.L.* Stability of natural ecosystems to toxic load: experimental measurements of resistance and resilience // *Problems of today in bioindication and biomonitoring (XI International Symposium on Bioindicatorsm, Syktyvkar, 17-21 September, 2001)* – Syktyvkar, 2001. – P. 382–383.

ДБС НАН України

Получено 22.08.2002

УДК 549.25./28:58.051:546.3.002.637:6314:55]:912+615.9

Перспективы проведения фитоиндикационного мониторинга техногенно трансформированных экотопов / Глухов А.З., Сафонов А.И. // *Промышленная ботаника*. – 2002. – Вып. 2. – С. 7–14.

На примере северных промышленных узлов Донецкой области рассмотрены основные принципы и особенности проведения фитоиндикационных исследований. Для составления баз данных состояния среды и аналитического сбора информации заложена двухуровневая индикаторная мониторинговая сетка, проведены картографический метод 10-балльных шкал вариации и стандартизация структурной пластичности растений, установлены критерии корреляционной оценки сопряжения показателей фактора загрязнения и структурной трансформации тест-объектов.

Табл. 1. Рис. 4. Библиогр.: 30.

UDC 549.25./28:58.051:546.3.002.637:6314:55]:912+615.9

The perspective of conducting phytoindicational monitoring of technogenically transformed ecotopes / Glukhov A.Z., Safonov A.I. // *Industrial botany*. – 2002. – V. 2. – P. 7–14.

The basic principles and peculiarities of phytoindicational researches of the northern industrial centres in Donetsk region has been examined. For creating the database on the state of environment and for analytical collection of information a two-level indication monitoring net is installed, the cartographic method of 10-mark scales of variation and standardisation of structural plasticity in plants are conducted, the criteria for correlational evaluation of pollution factor and structural transformation indices of the test-objects are defined.

Tabl. 1. Pic. 4. Bibliogr.: 30.