

**ЭМПИРИКА ФИТОКВАНТИФИКАЦИИ АНТРОПОГЕННО  
ТРАНСФОРМИРОВАННОЙ СРЕДЫ***ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»**283050, г. Донецк, ул. Щорса, 46; e-mail: andrey\_safonov@mail.ru*

**Сафонов А. И. Эмпирика фитокоантификации антропогенно трансформированной среды.** – Представлены результаты апробации некоторых методологических подходов реализации возможных сценариев количественной оценки состояния экотопов антропогенно трансформированной среды. Для территории Центрального Донбасса опорными в экологическом мониторинге являются функциональные критерии комплексной коантификации с помощью растений-индикаторов. Эмпирический метод установления индикационной значимости растений положен в основу диагностических мероприятий экологического содержания в регионе.

*Ключевые слова:* фитоиндикация, фитомониторинг, Донбасс, диагностика, антропогенные экотопы.

**Введение**

Технологии коантификации природных сред, как правило, обусловлены приоритетными секторами национальных экономик и межведомственных промышленных объектов, например, в системах горно-перерабатывающего производства [1], в условиях конструирования и эксплуатации полигонов промышленных и бытовых отходов [4], для урбанизированных территорий и объектов фитодизайна в обеспечении экологической безопасности этих регионов [7, 8, 17], при создании экологических сетей и зеленых коридоров ландшафтно-биологического функционала на больших массивах горно-добывающей промышленности [20], в том числе угледобывающей [19, 22]. Постпроектная ландшафтная эксплуатация трансформированных природных сред является мировой задачей и особо актуальна для антропогенно измененных экотопов степной зоны промышленно развитой Европы, где буферная выносливость природных систем значительно уязвима и трудно восстанавливается до прежнего квазинатурального состояния без применения передовых технологий рекультивации. В таких случаях ботанические объекты являются важной средообразующей компонентой ожидаемых и контролируемых сукцессионных преобразований, нуждающихся в информации о текущем и тенденциозном состоянии экотопов в условиях постоянной диагностики и коррекции внедряемых технологических процессов.

Цель работы – представить спектр эмпирических подходов в установлении фитопригодности природных сред Донбасса при осуществлении коантификации антропогенно трансформированных экотопов.

**Материал и методы исследования**

В основу используемых методов положена модель многоуровневой реакции вегетативных и генеративных систем растений на действие факторов специфического и неспецифического стресса. Среди прогрессивных методологических приемов эколого-индикационной эмпирики использовали биомониторинговые принципы при работе в промышленно загрязненных средах [6], методы интеллектуальной системы экологического мониторинга [9], подходы в создании цифрового программного обеспечения мониторинга отдельного промышленного предприятия [12], способы оценки по принятому матричному методу [5], методы количественной оценки риска на техногенных сооружениях [18] и ландшафтной ординации биологических процессов в нестабильных экологических условиях [22].

В региональной коантификации Центрального Донбасса реализованы программы геоинформационных способов обработки материала при картографическом зонировании и одноплоскостной модели расчета ранжированных территорий [16], рассмотрены ботанико-

экологические маркеры фитодиагностики экологических сред по индикаторным шкалам и градационным признакам [2], эмпирически сформированы некоторые критерии мониторинга техногенного напряжения по группам растений [3], проведена первичная фитоквалиметрия токсического прессинга и степени трансформации экотопов [13], апробированы принципы фитоиндикационного мониторинга для выявления и решения локальных бытовых и коммунально-технологических проблем в г. Донецке [14], а также представлена моновидовая классификация случаев тератообразования как пример индикационной пластичности видов растений в условиях антропогенного воздействия [15].

### Результаты и обсуждение

По целевому заказу мониторинговой программы на финальной стадии визуализации геостратегических данных всегда существует запрос на получение картографического материала, доступного в эксплуатационно-менеджментном восприятии, чтобы было технологически удобно очертить зоны риска, бедствия, стремительных трансформаций, балансового восстановления и пр. Поэтому эмпирика шкалообразования отошла в дробном представлении от унифицированной 10-балльной оценки и в каждом частном случае (для разного принципа и критерия) диапазоны варьирования в дискретном эквиваленте были представлены в соответствии с заданным программным условием и назначением использования в научно-прикладных, хозяйственных или научно-теоретических областях знаний и деятельности человека.

Спектр эмпирических подходов в установлении фитоприспособности природных сред Донбасса при осуществлении квантификации антропогенно трансформированных экотопов был разделен на 10 групп по разным принципам методологического соответствия.

1. Классический ординационный способ шкалообразования, но с учетом картографической дифференциации для отдельного участка исследований. Апробирован для видов растений *Agrostis stolonifera* L., *Amblystegium serpens* (Hedw.) Schimp., *Artemisia vulgaris* L., *Berteroa incana* (L.) DC., *Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub, *Capsella bursa-pastoris* (L.) Medik., *Centaurea diffusa* Lam., *Chenopodium album* L., *Cichorium intybus* L., *Cirsium arvense* (L.) Scop., *Cyclachaena xanthiifolia* (Nutt.) Fresen., *Dactylis glomerata* L., *Diplotaxis muralis* (L.) DC., *Echium vulgare* L., *Gypsophila paniculata* L., *Grimmia pulvinata* (Hedw.) Sm., *Lactuca tatarica* (L.) C. A. Mey., *Orthotrichum speciosum* Nees, *Papaver rhoeas* L., *Plagiomnium cuspidatum* (Hedw.) T. Kop., *Plantago lanceolata* L., *Plantago major* L., *Polygonum aviculare* L., *Reseda lutea* L., *Senecio vulgaris* L., *Stellaria subulata* Boeber ex Schlecht., *Tanacetum vulgare* L., *Tragopogon major* Jacq., *Tripleurospermum inodorum* (L.) Sch. Bip. Это наиболее распространенный вариант эмпирики фитоквантификации в Донбассе, поскольку, как правило, использует одинаковый шаг при формировании индикационной шкалы и прост в технической реализации. Достоверность показателей при повторяемости эксперимента доказана 4–6-летними исследованиями.

2. Континуальное распределение данных на плоскости для очерчивания межгодовой или многолетней динамики изменения показателя состояния экотопа. Подход использован для видов растений: *Achillea nobilis* L., *Amblystegium subtile* (Hedw.) Schimp., *A. vulgaris*, *Atriplex hortensis* L., *Atriplex patula* L., *B. incana*, *Atriplex mircantha* C. A. Mey., *B. inermis*, *Bromus arvensis* L., *C. bursa-pastoris*, *C. diffusa*, *C. intybus*, *C. arvense*, *Convolvulus arvensis* L., *C. xanthiifolia*, *D. glomerata*, *Daucus carota* L., *D. muralis*, *Dianthus campestris* M. Bieb., *E. vulgare*, *Glaucium corniculatum* (L.) Rudolph, *L. tatarica*, *Leskea polycarpa* Hedw., *P. lanceolata*, *P. major*, *R. lutea*, *S. vulgaris*, *T. vulgare*, *T. major*, *T. inodorum*. Повторяемость эксперимента при проверке достоверности составила 2 периода (2010–2014 гг. и 2016–2021 гг.) в случае использования разных видов. Этот подход требует многолетних наблюдений и вычленения флуктуационных процессов.

3. Подход выделения экокризисных зональных характеристик (участков) – территорий, требующих незамедлительного вмешательства и реорганизации эксплуатационных мероприятий апробирован для следующих видов растений *Ambrosia artemisiifolia* L.,

*A. hortensis*, *B. incana*, *Bryum capillare* Hedw., *C. bursa-pastoris*, *C. diffusa*, *C. album*, *C. intybus*, *C. arvensis*, *C. xanthiifolia*, *Deschampsia cespitosa* (L.) Beauv., *E. vulgare*, *Hyoscyamus niger* L., *Melilotus albus* Medik., *P. major*, *P. aviculare*, *Platygyrium repens* (Brid.) Schimp., *R. lutea*, *S. vulgaris*, *T. vulgare*, *T. major*, *T. inodorum*, *Fumaria schleicheri* Soy.-Willem. На практике в категорию критически неблагоприятных участков отнесены по разным примерам 1,5–4,6 % всей территории Центрального Донбасса – преимущественно это зоны непосредственного импакта крупных промышленных предприятий или урбанизированные территории, в 2020 и 2021 гг. к зонам экокризисного состояния добавились сорно-бытовые и рудеральные полигоны.

4. Обозначение на картографическом материале отдельных данных, имеющих чрезвычайное проявление по характеру фиксированного сомато-генетического мутационного процесса, например, уникальные случаи тератообразования, появления редких аномалий, которые невозможно вписать в систему статистических закономерностей за счет единичных случаев проявления. Этот способ на практике использован для видов растений: *Amaranthus retroflexus* L., *A. vulgaris*, *A. hortensis*, *A. patula*, *Aulacomnium palustre* (Hedw.) Schwägr., *B. inermis*, *B. arvensis*, *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth, *Chelidonium majus* L., *C. arvense*, *D. glomerata*, *D. carota*, *D. muralis*, *E. vulgare*, *Galinsoga parviflora* Cav., *L. tatarica*, *Orthotrichum pallens* Bruch ex Brid., *Persicaria maculosa* Gray, *P. lanceolata*, *P. major*, *Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt, *Portulaca oleracea* L., *R. lutea*, *Radula complanata* (L.) Dumort., *Rumex crispus* L., *T. major*, *T. inodorum*. Эмпирика этой категории квантификационных мероприятий, как правило, не имеет прямых связей с работой промышленности или урбанизации территории. Каждый частный случай рассматривается как фиксируемый процесс, результат которого, возможно, проявится статистически в последующих поколениях.

5. По реализации программы индивидуального активного мониторинга, например, при использовании гомогенизированного семенного материала, вегетативных трансплантаций или выращивании растений в контролируемых условиях начального формирования для выделения разницы после смены геолокалитета с другими токсическими характеристиками. Подход использован для следующих видов растений: *A. nobilis*, *A. stolonifera*, *A. artemisiifolia*, *B. incana*, *Brachythecium campestre* (Müll. Hal.) Bruch et al., *C. bursa-pastoris*, *C. album*, *C. intybus*, *C. arvense*, *C. arvensis*, *C. xanthiifolia*, *Cynoglossum officinale* L., *D. carota*, *D. cespitosa*, *Erigeron canadensis* L., *G. parviflora*, *Homalothecium lutescens* (Hedw.) H. Robins., *Kochia laniflora* (S. G. Gmel.) Borb., *Orthotrichum pumilum* Sw., *Otites media* (Litv.) Klovov, *P. major*, *P. aviculare*, *R. lutea*, *S. vulgaris*, *Sisymbrium polymorphum* (Murray) Roth, *T. vulgare*, *T. major*, *T. inodorum*, *Sagina procumbens* L. В этой программе активного мониторинга выделены закономерности выбора признаков фенотипической природы проявления, что во многих случаях является принципиально важным в реализации широкомасштабных программ и получения корректно обоснованных выводов об информативной значимости индикаторов в процедуре фитоэкологических экспертиз.

6. Создание 3–5-ступенчатой дискретной шкалы квантификации для концептуального разграничения экотопов трех–пяти уровней трансформации. Указанный подход реализован в практических работах для следующих видов растений: *A. stolonifera*, *A. retroflexus*, *A. vulgaris*, *A. hortensis*, *Alsine media* L., *B. incana*, *B. inermis*, *B. arvensis*, *Brachythecium mildeanum* (Schimp.) Schimp., *C. epigeios*, *C. bursa-pastoris*, *C. diffusa*, *C. majus*, *C. intybus*, *D. carota*, *Digitaria sanguinalis* (L.) Scop., *D. muralis*, *Fallopia convolvulus* (L.) Á. Löve, *Melilotus officinalis* (L.) Pall., *Moehringia trinervia* (L.) Clairv., *Nigella arvensis* L., *P. major*, *P. aviculare*, *Plagiomnium affine* (Blandow ex Funck) T. J. Kop., *Pleuridium acuminatum* Lindb., *R. lutea*, *R. crispus*, *Sonchus arvensis* L., *T. major*, *T. inodorum*, *Weissia brachycarpa* (Nees & Hornschuch) Juratzka. Такой пример является, по сути, частным случаем первого принципа из указанного перечня, однако для некоторых признаков слабодискретной природы перевод качественных показателей затруднен в эквивалентную экологическую шкалу вариации, тогда

использование 3, 4 или 5 диапазонов наличия или специализации отдельных анатомо-морфологических признаков являются наиболее оправданы эмпирически.

7. Использование данных о пределах выносливости растительных организмов – функциональный подход с основным критерием антропоустойчивости, используется для классических убиквистов или типично стенобионтных видов по сопряженному механизму выделения эдикаторов и ассектаторов в сообществах разной степени сформированности. Эмпирически способ апробирован для видов: *A. nobilis*, *A. artemisiifolia*, *Abietinella abietina* (Hedwig) Fleisch., *A. hortensis*, *A. patula*, *B. inermis*, *Brachythecium salebrosum* (F. Weber & D. Mohr) Bruch et al., *Campyliadelphus chrysophyllus* (Brid.) R. S. Chopra, *C. epigeios*, *C. diffusa*, *C. album*, *C. intybus*, *C. arvense*, *C. officinale*, *D. glomerata*, *D. cespitosa*, *D. sanguinalis*, *E. vulgare*, *Elytrigia repens* (L.) Nevski, *G. parviflora*, *Galium mollugo* L., *L. tatarica*, *Oberna behen* (L.) Ikonn., *P. major*, *R. lutea*, *Salsola australis* R. Br., *S. vulgaris*, *Sinapis arvensis* L., *Syntrichia ruralis* (Hedw.) F. Weber & Mohr, *T. vulgare*, *T. major*, *T. inodorum*, *Xanthium albinum* (Widd.) H. Scholz. Такой подход наиболее оправдан с позиций фитоценотического анализа, однако почти во всех случаях речь не идет о сформировавшихся растительных сообществах (с учетом сильно трансформации экотопов), поэтому на современном этапе в Донбассе реализован на аутэкологическом уровне.

8. Подход полевой диагностики – это совокупность экспресс-способов квантификации на основании визуально-экспертного анализа в натуральных условиях проведения экспертизы. При всей кажущейся простоте реализация такого подхода доказана для сравнительно небольшого количества видов из числа фитоиндикаторов в условиях Донбасса: *C. bursa-pastoris*, *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid., *C. intybus*, *C. arvense*, *E. vulgare*, *P. major*, *R. lutea*, *S. vulgaris*, *T. major*, *T. inodorum*. Виды растений указанной категории индикационного эксперимента часто встречаются и в сопряженных диагностических группах по выделенным отдельным подходам анализируемого перечня, имеют широкую экологическую амплитуду и долгосрочный период использования в мониторинговых программах Центрального Донбасса.

9. Анализ вторичных данных при вариантах формирования статистически сопряженных корреляционных плеяд – учет не прямых фактических индексов, полученных уже как совокупность данных интегральной оценки состояния отдельного экотопа или территориальных характеристик для всего региона. Используются виды-индикаторы: *A. nobilis*, *A. retroflexus*, *A. artemisiifolia*, *A. vulgaris*, *A. hortensis*, *B. incana*, *B. arvensis*, *Bryum argenteum* Hedw., *Bryum torquescens* Bruch & Schimp., *C. epigeios*, *C. bursa-pastoris*, *C. diffusa*, *C. majus*, *C. intybus*, *C. xanthiifolia*, *C. officinale*, *D. carota*, *D. cespitosa*, *D. muralis*, *Euphorbia seguieriana* Neck., *G. parviflora*, *Hypnum cupressiforme* Hedw., *K. laniflora*, *P. lanceolata*, *P. major*, *P. aviculare*, *R. lutea*, *S. vulgaris*, *S. polymorphum*, *T. vulgare*, *Thlaspi arvense* L., *T. major*, *Tortula mucronifolia* Schwaegr., *T. inodorum*. Такой способ количественной оценки на практике характерен в комплексной оценке, что также часто востребовано экологическими службами региона.

10. Способ функционала – подход квантификации в оценке общей жизненности особей конкретного вида без дробного учета факториальных характеристик; на практике организован для случаев временно неустановленной причинно-следственной связи такого проявления в состоянии растительных организмов: *A. stolonifera*, *A. artemisiifolia*, *A. vulgaris*, *A. patula*, *B. incana*, *B. inermis*, *B. arvensis*, *Bryum caespitium* Hedw., *C. epigeios*, *C. bursa-pastoris*, *C. album*, *C. intybus*, *C. arvensis*, *C. xanthiifolia*, *C. officinale*, *D. glomerata*, *D. carota*, *D. cespitosa*, *E. vulgare*, *P. major*, *Polygonum patulum* M. Bieb., *R. lutea*, *S. vulgaris*, *T. vulgare*, *T. major*, *T. inodorum*, *Weissia controversa* Hedw. Такая категория экспериментов технически может рассматриваться как вариант экспресс-анализа, однако выделена в отдельную группу диагностического способа, поскольку количественный учет идет по другому признаку – функциональный критерий состояния отдельных особей в дробном геолокалитете.

## Выводы

Система цифровизации и количественных диагностик в эколого-ботанических исследованиях имеет свое применение и посредством анализа фитоиндикационных данных, когда совокупность реакций организмов на действие фактора или группы факторов можно ранжировать в соответствии с определенным принципом или способом получения итоговой экспертной информации.

Эмпирика фитоquantификации реализована на сегодня в десяти методологических подходах, каждый из которых существенным образом дополняет представление о ландшафтно-функциональном состоянии мест с различным уровнем антропогенной трансформации. Указанные способы опытной quantификации имеют свою специфику и используют опорные виды-индикаторы из числа цветковых и споровых видов растений Донбасса.

Работа выполнена в рамках инициативной научной темы «Функциональная ботаника: экологический мониторинг, ресурсные технологии, фитодизайн» (госрегистрация № 0117D000192) на кафедре ботаники и экологии ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет».

## Список литературы

1. Архипов И. А., Любимов Р. В., Трошкова И. А. Состояние компонентов природной среды в зоне воздействия горно-перерабатывающих производств Республики Алтай // География и природные ресурсы. 2021. Т. 42, № 1 (165). С. 49–55. <https://doi.org/10.15372/GIPR20210106>
2. Сафонов А. И. Ботанико-экологические маркеры quantификации природных сред в Донбассе // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. 2020. № 3–4. С. 40–47.
3. Сафонов А. И., Глухов А. З. Эмпирические критерии фитомониторинга техногенной нагрузки в Донбассе // Экобиотех. 2021. Т. 4, № 3. С. 195–202. <https://doi.org/10.31163/2618-964X-2021-4-3-195-202>
4. Черных Н. А., Баева Ю. И., Карабанова Д. Н., Нечепуренко А. И. Мониторинг состояния окружающей среды в зоне влияния полигона промышленных и бытовых отходов методами биоиндикации // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25, № 9. С. 38–43. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-9-38-43>
5. Ashofteh P. S., Bozorg-Haddad O., Loáiciga H. A. Multi-criteria environmental impact assessment of alternative irrigation networks with an adopted matrix-based method // Water Resources Management. 2017. Vol. 31. P. 903–928. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1554-9>
6. Bayouli I. T., Bayouli H. T., Dell'Oca A., Meers E., Sun J. Ecological indicators and bioindicator plant species for biomonitoring industrial pollution : Eco-based environmental assessment // Ecological Indicators. 2021. Vol. 125. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107508>
7. Gorodnichaya A., Melchenko A. Environmental monitoring and urban phytodesign in ensuring the radioecological safety of urban buildings // E3S Web of Conferences : 2018 Topical Problems of Architecture, Civil Engineering and Environmental Economics, TPACEE 2018. Moscow : EDP Sciences, 2019. P. 06001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199106001>
8. Gorodnichaya A., Pogorelova V., Glinyanova I. Eco-phytomonitoring in ensuring radiological safety of urban buildings // E3S Web of Conferences : International Scientific Conference «Construction and Architecture», CATPID 2019. Kislovodsk : EDP Sciences, 2019. P. 01022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913801022>
9. Matytsyna D. A., Tokarev K. E., Protsyuk M. P. Development of an intelligent system for environmental monitoring of atmospheric pollution // Journal of Physics : Conference Series. Volgograd, 2021. P. 012033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1801/1/012033>
10. Mezheva L. A., Lugovsky A. M., Gorbunov V. S., Sagova Z. M., Sushkova O. Yu. Organizing geographic and environmental monitoring for urban cadastral appraisal // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science. Moscow, 2020. P. 012127. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/579/1/012127>

11. Neamtu R., Sluser B., Plavan O., Teodosiu C. Environmental monitoring and impact assessment of Prut River cross-border pollution // Environmental Monitoring and Assessment. 2021. Vol. 193, N 340. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09110-1>
12. Pashentsev D. A., Abramova A. I., Eriashvili N. D., Grimalskaya S. A., Gafurova A. Ya., Kharisova G. M., Karpenko G. V., Avilova V. V. Digital software of industrial enterprise environmental monitoring // Ekoloji. 2019. Vol. 28 (107). P. 243–251.
13. Safonov A. I. Phyto-qualimetry of toxic pressure and the degree of ecotopes transformation in Donetsk region // Problems of ecology and nature protection of technogenic region. 2013. N 1 (13). P. 52–59.
14. Safonov A. I. Phytoindicational monitoring in Donetsk // World Ecology Journal. 2016. Vol. 6, N 4. P. 59–71.
15. Safonov A. I. Theratogenesis of indicator plants of industrial Donbass // Diversity of plant world. 2019. N 1 (1). P. 4–16. <https://doi.org/10.22281/2686-9713-2019-1-4-16>
16. Safonov A., Glukhov A. Ecological phytomonitoring in Donbass using geoinformational analysis // Problems of industrial botany of industrially developed regions 2021. BIO Web Conf. 2021. Vol. 31. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213100020>
17. Sukhacheva E. U., Aparin B. F. Soil cover patterns in anthropogenically transformed landscapes of Leningrad oblast // Eurasian Soil Science. 2019. Vol. 52, N 9. P. 1146–1158. <https://doi.org/10.1134/S1064229319070123>
18. Teodosiu C., Robu B., Cojocariu C., Barjoveanu G. Environmental impact and risk quantification based on selected water quality indicators // Natural Hazards. 2015. Vol. 75. P. 89–105. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0637-7>
19. Wu Z., Lei S., Yan Q., Bian Z., Lu O. Landscape ecological network construction controlling surface coal mining effect on landscape ecology: A case study of a mining city in semi-arid steppe // Ecological Indicators. 2021. Vol. 133. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108403>
20. Yu H., Huang J., Ji C., Li Z. Construction of a landscape ecological network for a large-scale energy and chemical industrial base : a case study of Ningdong, China // Land. 2021. Vol. 10, N 4. P. 344. <https://doi.org/10.3390/land10040344>
21. Zaghloul A., Saber M., Gadow S., Awad F. Biological indicators for pollution detection in terrestrial and aquatic ecosystems // Bulletin of the National Research Centre. 2020. Vol. 44, N 127. <https://doi.org/10.1186/s42269-020-00385-x>
22. Zhang P., Ye Q., Yu Y. Research on farmers' satisfaction with ecological restoration performance in coal mining areas based on fuzzy comprehensive evaluation // Global Ecology and Conservation. 2021. Vol. 32. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01934>

**Safonov A. I. The empirics of phytoquantification of an anthropogenically transformed environment. –**

The results of approbation of some methodological approaches to the implementation of possible scenarios for a quantitative assessment of the state of ecotopes of the anthropogenically transformed environment are presented. For the territory of Central Donbass, the functional criteria for complex quantification with the help of indicator plants are the reference in environmental monitoring. The empirical method for establishing the indicative significance of plants is the basis for diagnostic measures for ecological content in the region.

*Key words:* phytoindication, phytomonitoring, Donbass, diagnostics, anthropogenic ecotopes.