

ДЕТАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ФИТОТЕСТИРОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ ПО УЯЗВИМОСТИ АПИКАЛЬНЫХ МЕРИСТЕМ

© 2025. *Е. В. Галактионова, А. И. Сафонов*

В работе даны варианты качественных модификаций апикальных частей фитоиндикаторов в ответ на специфический и неспецифический стресс, вызванный повышенным содержанием отдельного токсического элемента в почвенно-водном растворе или группы поллютантов в типичных пропорциях для техногенного загрязнения. Эксперимент рассмотрен как частный случай корневого теста. Выявленные характерные преобразования калиптрогена, дерматокалиптрогена, дерматогена, периблемы, плеромы, колумеллы, ризодермы, пре-дифференциации клеток центрального цилиндра, асимметричности формирования корневого чехлика сопряжены с высокими концентрациями (более 3 ПДК) Ni, Cu, Co, Cd, Hg, Pb и значениями в зоне металлургического импакта для элементов Mn, Fe, Zn в субстрате. Методический приём может быть востребован в полевой и лабораторной диагностике уровня фитотоксичности почв аграрного и(или) хозяйственно-техносферного назначения. Точка роста нижнего концевой двигателя, являясь первичным барьером в контакте растительного организма с субстратом, не только дифференцированно реагирует на специфические условия среды, но и формирует каскад структурных преобразований, отражающихся на всей архитектонике растения-индикатора.

Ключевые слова: экологический мониторинг, фитопатология, структурная ботаника, строение корня, точка роста, фитоиндикация, антропогенное загрязнение, токсичность почвы.

Введение. В тотальной [1, 2] и локальной [3, 4] системе диагностики экотопов с высоким уровнем антропогенной нагрузки [5–7] использование методов биотестирования [8, 9] является оправданным с точки зрения получения информации реального отклика тест-организма на воздействие потенциально агрессивного агента в среде обитания и (или) почвенно-водном субстрате [10–12]. Разрабатываемые многочисленные методы и способы оценки природных сред с помощью витальных экспериментов [1, 4, 8, 10, 11, 13, 14] во многом должны быть адаптированы к тем научно-техническим возможностям и хозяйственным потребностям, которые предусматривают их использование в конкретном регионе [4, 10, 15, 16]. При этом важно естественное сочетание как образцов тестируемых субстратов, так и тест-видов, используемых для реакционной оценки неблагоприятного фактора.

Цель работы – выделить качественные отличия в строении апикальных меристем корневых систем тест-видов в ответ на различные загрязнители (на примере ионов тяжелых металлов), характерные для высокого уровня техногенеза в антропогенно напряженных регионах.

Материал и методика исследования. Образцы почв в корнеобитаемом слое травянистых индикаторных видов были отобраны в зонах высокого техногенного (как вариант антропогенного) воздействия, уровень и специфика которого установлены ранее [17–19]. Для параллельного (контрольно-сравнительного) вторичного эксперимента в лабораторных условиях были приготовлены растворы нитратных форм тяжелых металлов в диапазоне 3, 4 и 5 ПДК, использован также парный характер загрязнения. Приняты во внимание особенности опытов по фитотестированию в условиях техногенных экосистем [20–22] и частные примеры методик по биотестированию почв [23]. Структурно-функциональный аппарат меристем тест-видов изучен при анализе зародышевого корневого аппарата в норме и патологии [24] и в период 2–3 недель при прорастании. Работа является продолжением ранее проведенной серии экспериментов по ризологическому фитотестированию [18, 25, 26].

Анализ результатов. Давленные препараты и продольные срезы точек роста корневых систем тест-видов из числа апробированных фитоиндикаторов в дифференциации для одно- и двудольных растений не дали принципиальных отличий. Хотя отмечена большая чувствительность у представителей двудольных и числа видов семейств капустных и астровых. Наиболее оптимальным объектом в изучении корневых меристем (по дифференцированной уязвимости структур и выявлению локусов специфических деградтивных процессов и преднекротических образований в меристематических тканях) выделены витальные препараты *Berteroa incana* (L.) DC., *Echium vulgare* L., *Taraxacum officinale* F.H.Wigg. и *Elytrigia repens* (L.) Desv. ex Nevski. Учитывая специфику эксперимента, целевая программа была ограничена выявлением устойчивых качественных реакций, поэтому рабочие концентрации токсических элементов в эксперименте для обнаружения мишеней уязвимости были сориентированы на уровне трех предельно-допустимых (в лабораторном эксперименте при подготовке водных растворов нитратных форм) концентраций и (или) того уровня загрязнения, который был предварительно определён в почвенных образцах.

Полученные результаты были рассмотрены в моно-, би- и многофакторном эквивалентах загрязнения, при этом общая тенденция деградтивных процессов сохраняется и увеличивается суммационный эффект, который в 28–35 % случаев приводит к замиранию ростовых процессов на 9–11 сутки эксперимента и массовым некрозам корневой системы.

При монофакторном загрязнении никелем (рис. 1) в первую очередь уязвимы структуры нижнего дерматогена и боковых частей калиптрогена, вторичными мишенями уязвимости являются периферические отделы центрального цилиндра (инициалей), которые по морфологии всего среза дифференцируются в дистальные части плеромы, наблюдается асимметричность в очагах поражения.

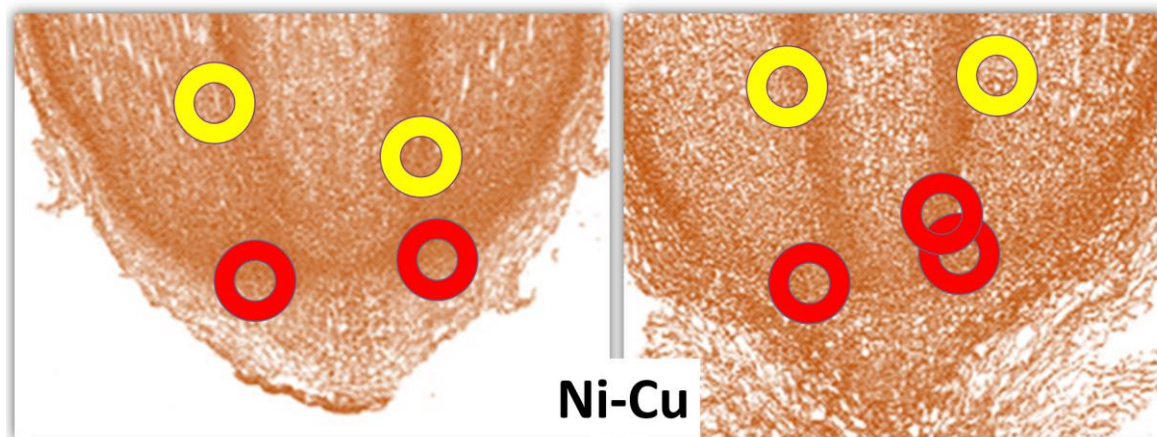


Рис. 1. Функциональные мишени уязвимости апикальных меристем тест-видов растений в условиях загрязнения субстрата ионами никеля и меди (более 3 ПДК)

Сходными процессами характеризуется и реакция растений на высокие концентрации в почвенно-водном растворе ионов меди, однако фокус уязвимости концентрируется ближе к центральной части дерматогена и имеет рассредоточенный характер локальных проявлений (на рис. 1 показано красным), тогда как периферические отделы центрального цилиндра и границ перехода между плеромой и периблемой (на рис. 1 показано жёлтым) являются условно симметричными на продольном срезе, а значит формируют сплошное кольцо в зоне первичной дифференциации клеточных структур.

Важно отметить, что при монофакторном и парном загрязнении указанными металлами (Ni-Cu) не наблюдается изменений в строении осевой части центрального цилиндра, колумеллы и корневого чехлика, что важно при формировании неизменённого габитуса растения в целом.

Характер повреждения корневых меристем при загрязнении ионами кобальта и кадмия (рис. 2) является более глубинным и затрагивает принципиально важные участки серии апикальных меристем, которые, по-видимому, могут провоцировать патологии на более заметном морфологическом уровне для всей архитектоники растения по вегетативной надземной части особи. В условиях 3–5-кратного эквивалентного загрязнения кобальтом в апикальных меристемах кончика корня слабо дифференцируется зона дерматогена и ризодерма формируется с задержкой по сравнению с образцами контроля. Мишени уязвимости при таком характере загрязнения – ряд клеток центрального цилиндра, из которых в последствии образуется или могла бы быть образована стела, – эти клетки на продольных разрезах на 30–50 % представлены некротическими образованиями. Причем локализация таких нарушений имеет четко выраженную колонку на протяжении всей зоны первичных меристем. В сравнении с другими токсичными элементами для изучаемой группы тканей кобальт обладает высокой миграционной способностью и аккумулирует вредные для развития корня проявления в самых центральных конформационных зонах.

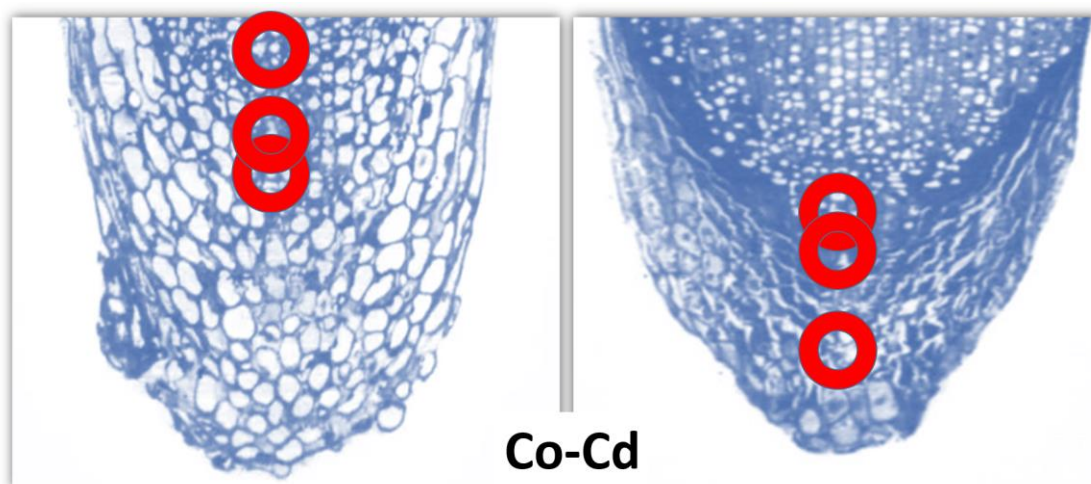


Рис. 2. Функциональные мишени уязвимости апикальных меристем тест-видов растений в условиях загрязнения субстрата ионами кобальта и кадмия (более 3 ПДК)

При кадмиевом загрязнении сохраняется гистологически визуальный барьер дерматогена и морфология корневого чехлика, однако нарушается деятельность самой активной части меристематического аппарата – калипрогена; колумелла диффузно представлена на общем срезе, при этом слабо дифференцируются крахмальные зёрна её клеток (рис. 2). Общий характер воздействия группы Co-Cd – это поражение центральных конформационных тканей вдоль зоны всей меристематической активности, формируя колонку в ряд локальных некротических проявлений. Суммационное влияние обоих металлов при двухфакторном эксперименте провидит к летальному эффекту всей особи на конец второй недели наблюдений. Предположено, что в природных условиях, преодолевая токсичные барьеры, растения компенсаторно избегают очагов агрессивности почвенно-водного контакта и меняют градус (ось) роста в сторону меньшей локальной токсичности.

В фитодиагностическом эксперименте сходный характер трансформации структур апикальных меристем кончика корня проявила пара элементов в монофакторном загрязнении ртутью и свинцом. Это периферическое поражение ризодермы и корневого чехлика (рис. 3). Ртуть, по-видимому, является первым (из исследуемых) токсичных элементов, который взаимодействует непосредственно с клетками корневого чехлика. Так называемые элиминирующие (сброшенные) клетки корневого чехлика в условиях ртутного загрязнения подвержены лизису в 4–5 раз быстрее, чем в норме.

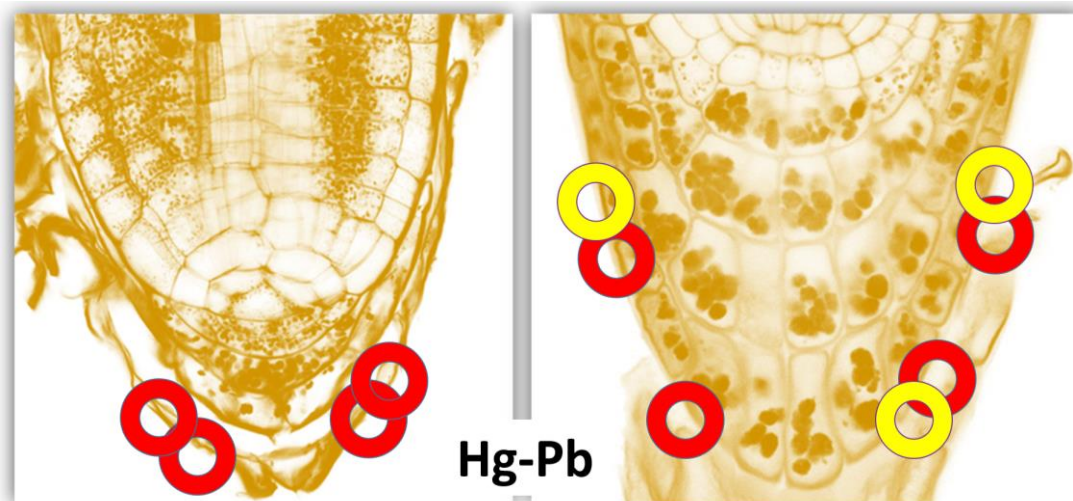


Рис. 3. Функциональные мишени уязвимости апикальных меристем тест-видов растений в условиях загрязнения субстрата ионами ртути и свинца (более 3 ПДК)

Свинцовые атаки на корневые меристемы фокусируются в области периферических клеток колумеллы (по некрозам в этой зоне наблюдений, рис. 3), что может объяснить резкую смену направления роста корня при точечном взаимодействии с Pb-содержащей агрессивной средой в натуральных условиях.

Разнонаправленные эффекты состояния корневых апикалей были отмечены в группе воздействия марганца, железа и цинка: наблюдаются как тканевые мишени с элиминацией тканей или некрозами (показано красным, рис. 4), а также витализационные эффекты при усиленном росте и развитии (в сравнении с контрольными образцами) – локусы гиперплазии (показано зелёным, рис. 5), что также не является нормой и может быть причиной многочисленных тератных образований надземных структур.



Рис. 4. Функциональные мишени уязвимости и гиперфункции апикальных меристем тест-видов растений в условиях загрязнения субстрата ионами марганца, железа и цинка (импактные концентрации металлургического производства), пояснения в тексте

Марганцевогенные мишени являются причиной элиминации клеток нижнего отдела и периферической части корневого чехлика, гиперплазии периблемы и плеромы в симметричном изображении на продольном срезе. При высоких концентрациях железа нивелируются участки ризодермы, дерматогена и периблемы, хотя характер их проявления фрагментарный и не образует сплошного кольца, т.е. не симметричен на продольном разрезе; гиперплазия отмечена в области активности калипрогена и нижних отделов дерматогена. При цинковом воздействии наблюдаются частые некрозы краевого дерматогена и участков ризодермы на первых стадиях её развития; гиперплазия нижней части калипрогена и всей зоны колумеллы. Даже на таком структурном уровне наблюдения можно отметить (подтверждается) функциональный антагонизм цинка с ионами кадмия, свинца и ртути.

Выводы.

1. Метод фитотестирования (как вариант проведения мониторинговых исследований диагностического назначения) на основании корневого теста может быть значительно детализирован при использовании структурно-токсикологического анализа по состоянию апикальных меристем в кончике корня. Эта зона является первым и наиболее чутко реагирующим барьером в фазовом переходе между живой и неживой природой, т.е. дискретно отделимой особью и её окружением. Большинство используемых фитоиндикаторов антропогенно трансформированных регионов в стартовых своих реакциях при прорастании преодолевают в первую очередь барьер ростовых процессов зародышевого корня, поэтому уже на первых стадиях 2-3-суточного эксперимента можно получить первичную информацию о специфике загрязнения эдафической среды.

2. Дифференцировать характер воздействия конкретного поллютанта достоверно возможно в монофакторном эксперименте; при добавлении других токсичных элементов в почвенно-водную среду характер воздействия смешивается, однако на практике токсикологического анализа, как правило, можно выделить приоритетные загрязнители, учитывая также близость конкретных источников загрязнения и формы импакта их на аккумулятивные природные среды.

3. Доказано, что концентрации некоторых тяжелых металлов в пределах 3 ПДК вызывают специфические реакции в структурной организации меристематического аппарата тест-растений, что также обуславливает проявление патологий (в случае выживания) на уровне габитуса и архитектоники растения в целом.

Исследование выполнено в рамках деятельности молодежной лаборатории «Диагностика и механизмы адаптации природных и антропогенно-трансформированных экосистем Донбасса» (номер госрегистрации 124051400023-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Урбозкодиагностика промышленных городов Центрального Черноземья / С.А. Куролап, О.В. Клепиков, Т.И. Прожорина [и др.]; РНФ, Воронежский государственный университет. – Воронеж: Цифровая полиграфия, 2022. – 255 с. – ISBN 978-5-907669-06-2. – EDN: HEQQGA.
2. Remote monitoring of factors determining the environmental safety of urban areas / S. Yeprintsev, S. Kurolap, O. Klepikov, P. Vinogradov // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 389. – P. 03030. – DOI: 10.1051/e3sconf/202338903030. – EDN: WPFKSG.
3. Корниенко В.О. Ретроспективный анализ антропогенного загрязнения города Донецка. Вибрационно-акустическое шумление // Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки. – 2024. – № 1. – С. 93–100. – DOI: 10.5281/zenodo.12532574. – EDN: TSWEOL.
4. Assessment of the impact of technogenic air pollution on the social processes of large urbanized regions / S. Yeprintsev, S. Kurolap, O. Klepikov, S. Shekoyan // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 215. – P. 03009. – DOI: 10.1051/e3sconf/202021503009. – EDN: DBPHXD.

5. Определение пределов устойчивости экосистемных функций горно-луговой черноземовидной почвы при загрязнении цинком / А.А. Кузина, Е.С. Храпай, С.И. Колесников [и др.] // Биосфера. – 2024. – Т. 16, № 3. – С. 352–359. – DOI: 10.24855/biosfera.v16i3.943. – EDN: JCNDFU.
6. Моделирование и экспериментальная проверка процессов разделения биоклеток по величине магнитной восприимчивости / В.Н. Павлов, В.Н. Калаев, В.О. Корниенко [и др.] // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2022. – Т. 10, № 1(36). – DOI: 10.26102/2310-6018/2022.36.1.010. – EDN: AJYQDO.
7. Yepintsev S.A. Geoinformation technologies as a mechanism for assessing environmental risks to public health in the conditions of technogenic air pollution in cities // Ecology Economy Informatics. Geoinformation technologies and space monitoring. – 2020. – Vol. 2, No. 5. – P. 9–13. – DOI: 10.23885/2500-123x-2020-2-5-9-15. – EDN: XIYQIQ.
8. Корниенко В.О., Авдеева К.А., Елизаров А.О. Биологические эффекты переменного магнитного поля промышленной частоты, на примере кукурузы сахарной // Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки. – 2023. – № 4. – С. 60–67. – EDN: JGJAHB.
9. Мирненко Н.С. Пыльца как тест-система индикации неблагоприятной городской среды (на примере г. Донецка) // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2023. – № 3. – С. 12–17. – EDN: JQCOXN.
10. Колесников С.И. Методология оценки эффективности рекультивации нарушенных земель по степени восстановления экологических функций почвы // Рекультивация нарушенных земель: технологии, эффективность и биоразнообразие. – Новокузнецк: СибГИУ, 2024. – С. 108–109. – EDN: QDRXMJ.
11. Ecological State Assessment of Urban Soils by Bioassay / T. V. Bardina, M. V. Chugunova, L. P. Kapelkina [et al.] // Water, Air, & Soil Pollution. – 2022. – Vol. 233, No. 1. – DOI: 10.1007/s11270-021-05475-8. – EDN: HCOSCA.
12. Moshenko D., Kuzina A., Kolesnikov S. Comparative assessment of the Black soils sustainability in the Central Caucasus and the Caucasus to pollution with lead, chromium, copper, nickel and oil // Sustainable Development of Mountain Territories. – 2020. – Vol. 12, No. 1(43). – P. 75–87. – DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-1-75-87. – EDN: VOURSC.
13. Frunze O. Sorption capacity of ornamental herbaceous plants under conditions of soil contamination with lead // E3S web of conferences. – 2023. – Vol. 462. – P. 02004. – DOI: 10.1051/e3sconf/202346202004. – EDN: BGOFEZ.
14. Сафонов А.И. Фитоэмбриональный скрининг в экологическом мониторинге Донбасса // Зеленый журнал - Бюллетень ботанического сада Тверского государственного университета. – 2017. – № 3. – С. 5–12. – EDN: UYHXGO.
15. Зелёные насаждения городов Центральной России (на примере Воронежа, Липецка, Тулы) как фактор экологической безопасности / С.А. Епринцев, О.В. Клепиков, С.В. Шекоян, П.М. Виноградов // Экологические проблемы использования горных лесов. – Краснодар: КубГУ, 2024. – С. 98–102. – EDN: BNAGJM.
16. Пирко И.Ф., Корниенко В.О. Ресурсы флоры Юга Восточно-Европейской равнины. Аборигенные виды порядка Злакоцветные (Poales small) для озеленения городов Донецко-Макеевской агломерации // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2024. – № 3. – С. 24–37. – DOI: 10.5281/zenodo.14532037. – EDN: JJBGYH.
17. Phytomonitoring in Donbass for identifying new geochemical anomalies / I.I. Zinivovskaia, A.I. Safonov, N.S. Yushin [et al.] // Russian Journal of General Chemistry. – 2024. – Vol. 94, No. 13. DOI: 10.1134/S1070363224130048.
18. Сафонов А.И. Экологический фитомониторинг антропогенных трансформаций. – Донецк: ДонГУ, Издательский дом «ЭДИТ», 2024. – 289 с. – ISBN 978-5-605-24266-6. – EDN: QVJSQE.
19. Сафонов А.И. Фитогеохимический мониторинг антропогенно измененных территорий Донбасса // Актуальные проблемы экологии и природопользования. – 2024. – С. 199–203. – EDN: DOFUKB.
20. Калинина А.В. Диагностика эдафотопов некоторых отвалов угольных шахт г. Макеевки методами фитотестирования // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2019. – № 1-2. – С. 6–12. – EDN: OJDSTR.
21. Калинина А.В. Диагностика фитоценозов породного отвала шахты «Калиновская-Восточная» на основе системных индексов разнообразия // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2020. – № 3-4. – С. 6–10. – EDN: ZLEQFR.
22. Калинина Ю.С., Сафонов А.И. Рабочая схема ландшафтной индикации в Донецке: дизайн и критерии устойчивости геосистем // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2024. – № 3. – С. 14–23. – DOI: 10.5281/zenodo.14531840. – EDN: GAKMLH.

23. Использование методов биотестирования для оценки экологического состояния почвогрунтов рекультивированного карьера / Т.В. Бардина, М.В. Чугунова, В.В. Кулибаба, В.И. Бардина // Биосфера. – 2020. – Т. 12, № 1-2. – С. 1-11. – DOI: 10.24855/BIOSFERA.V12I1.539. – EDN: NEQGBA.
24. Сафонов А.И. Структурная разнокачественность эмбриональных структур фитоиндикаторов в Донбассе // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2016. – № 3-4. – С. 23–29. – EDN: YUDMKW.
25. Турчанинова А.В. Ризологическое фитотестирование почв Донбасса // Вестник студенческого научного общества ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет». – 2024. – Т. 1, № 16. – С. 160–164. – EDN: GDQXZC.
26. Галактионова Е.В., Сафонов А.И. Совместные разработки по ризологическому фитотестированию почв в нарушенных биотопах // Донецкие чтения 2024: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности. – Донецк: ДонГУ, 2024. – Т. 3: Биологические и медицинские науки, экология. – С. 45. – EDN: CGDODP.

Поступила в редакцию 30.01.2025 г.

DETAILING THE METHOD OF PHYTOTESTING POLLUTED SOILS BY THE VULNERABILITY OF APICAL MERISTEMS

E. V. Galaktionova, A. I. Safonov

The paper presents options for qualitative modifications of the apical parts of phytoindicators in response to specific and non-specific stress caused by an increased content of a single toxic element in a soil-water solution or a group of pollutants in typical proportions for anthropogenic pollution. The experiment is considered as a special case of the root test. The revealed characteristic transformations of calyptrogen, dermatocaliprogen, dermatogen, periblem, pleroma, columella, rhizoderm, cell differentiation of the central cylinder, and asymmetry of root sheath formation are associated with high concentrations (more than 3 MPC) of Ni, Cu, Co, Cd, Hg, Pb and values in the metallurgical impact zone for Mn, Fe, Zn. The methodological technique may be in demand in field and laboratory diagnostics of the level of phytotoxicity of soils for agricultural and(or) economic and technospheric purposes. The growth point of the lower end motor, being the primary barrier in contact of the plant organism with the substrate, not only reacts differentially to specific environmental conditions, but also forms a cascade of structural transformations that affect the entire architectonics of the indicator plant.

Keywords: ecological monitoring, phytopathology, structural botany, root structure, growth point, phytoindication, anthropogenic pollution, soil toxicity.

Галактионова Елена Владимировна
заведующий кафедрой «Биология»
НАО Северо-Казахстанский
университет им. М. Козыбаева,
г. Петропавловск, Республика Казахстан.
E-mail: galaktionova7272@mail.ru

Galaktionova Elena
head of the department of Biology,
M. Kozybaev North Kazakhstan University,
Petropavlovsk, Republic of Kazakhstan.

Сафонов Андрей Иванович
кандидат биологических наук, доцент;
заведующий кафедрой ботаники и экологии
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: andrey_safonov@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9701-8711
AuthorID: 957581

Safonov Andrey
candidate of biological sciences, docent;
head of the department of Botany and Ecology,
Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.