

Морозова Т. В., к.б.н., доцент, докторант (Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, tetiana.morozova@ukr.net), **Мудрак О. В., д.с.-г.н., професор, академік АНВШ** (КЗВО «Вінницька академія безперервної освіти», Вінниця, ov_mudrak@ukr.net)

БІОМОНІТОРИНГ АГРОЕКОСИСТЕМ: ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Агроекосистеми, завдяки своїй спрощеній структурі та збідненому видовому складу, вимагають постійного моніторингу для забезпечення їхньої стійкості та продуктивності в умовах інтенсивного антропогенного навантаження. Оцінка екологічного стану агроекосистем є критично важливою для виявлення змін, спричинених зовнішніми чинниками, такими як кліматичні зміни, внесення добрив і забруднення компонентів довкілля. Це дослідження зосереджене на використанні біоіндикації як ефективного інструменту оцінки стану агроекосистем, зокрема через морфологічні зміни рослин і флуктуючу асиметрію (ФА).

У контексті глобальних екологічних викликів, таких як зміни клімату і зниження біорізноманіття агросфери, фітомоніторинг виступає ключовим методом для відстеження впливу стресових умов на рослинність. Зокрема, застосування комп'ютерної морфоколірної метрії та аналізу екологічної ДНК (eDNA) показує значний потенціал для точного моніторингу рослинності і оцінки біорізноманіття. Результати дослідження свідчать про важливість оптимальних доз мінеральних і органічних добрив та правильного управління агротехнологічними практиками для збереження стабільності розвитку рослин.

Особливу увагу в дослідженні приділено впливу пестицидів, які можуть викликати як летальні, так і сублетальні ефекти на нецільові організми, що підкреслює необхідність постійного моніторингу їхнього впливу. Виявлені атипкові фенотипи у модельних організмах, таких як *Drosophila melanogaster*, служать індикаторами підвищеного рівня пестицидів, що є важливим для екологічної безпеки агроекосистем.

Дослідження підкреслює необхідність інтеграції різних

методів моніторингу для комплексної оцінки стану агроєкосистем, що дозволяє розробити ефективні стратегії для управління їхньою стійкістю та продуктивністю в умовах сучасних екологічних викликів.

Ключові слова: біоіндикація; екологічний моніторинг; агроценози; антропогенне навантаження; фітомоніторинг; компоненти довкілля.

Постановка проблеми. Для розробки екологічно безпечних технологій і комплексів обладнання, спрямованих на управління агроєкосистемами в умовах інтенсивного сільськогосподарського виробництва, критично важливо мати детальну інформацію про стан цих систем і тенденції їх розвитку. Біомоніторинг, який ґрунтується на вивченні реакцій живих організмів на зміни в середовищі, є одним з найбільш ефективних підходів для отримання таких даних. Важливим аспектом екологічного моніторингу агроєкосистем є вибір і впровадження методів, які можуть бути застосовані як у польових умовах, так і в лабораторних дослідженнях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Здоров'я ґрунту є критично важливим для стабільного функціонування агроєкосистем і їх продуктивності [1]. Антропогенна діяльність, така як інтенсивна обробка ґрунтів і застосування хімічних добрив і пестицидів, може призводити до деградації ґрунтових екосистем, зниження врожайності і погіршення екосистемних послуг [2]. Враховуючи ці чинники, ефективний моніторинг здоров'я ґрунту є необхідним для збереження агроєкосистем.

Традиційні методи оцінки здоров'я ґрунту переважно зосереджені на визначенні хімічних забруднювачів, як-от важкі метали і пестициди [3; 4], а також радіаційного забруднення, однак ці методи не завжди враховують вплив цих речовин на ґрунтову біоту. Ґрунтова біота, включаючи мікроорганізми, гриби, нематоди і безхребетних, виконує важливі екологічні функції, такі як колообіг поживних речовин і стабілізація структури ґрунту. Інтеграція біоіндикаторів у систему моніторингу дає можливість отримати більш комплексну оцінку стану агроєкосистем [5]. Методи статистичної та математичної обробки даних у поєднанні з геоінформаційними системами (ГІС) дозволяють відображати загальні тенденції просторової прив'язки екологічних даних, але не завжди

забезпечують детальний аналіз.

Перспективним підходом для оцінки стану біоти в агроєкосистемах є використання фітоморфологічних показників асиметрії із застосуванням фрактального аналізу. Цей метод дозволяє досліджувати складні геометричні форми і структури, які демонструють самоподібність на різних масштабах [6]. У контексті біоіндикації фрактальний аналіз є ефективним інструментом для вивчення структурної асиметрії в екосистемах, моделювання екологічних процесів та виявлення просторових асиметрій у розподілі забруднювачів або угруповань видів. Фрактальний аналіз надає можливість оцінювати асиметрію в екологічних даних, таких як просторові патерни, структурні характеристики середовища та динаміка забруднення [7]. Це особливо корисно для виявлення нерівномірного розподілу забруднювачів або асиметрії у видовому різноманітті та структурі рослинного покриву. Наприклад, аналіз асиметрії листків берези, що базується на вивченні їхньої геометричної структури, може надати важливу інформацію про вплив екологічних чинників на форму і структуру листків.

Біотичний моніторинг, що включає визначення стану видів агробіорізноманіття – ендеміків, реліктів, вразливих, рідкісних, зникаючих рослин і тварин, що проживають в агроландшафтах – також підкреслює необхідність впровадження біомоніторингу як важливої складової екологічного моніторингу агросфери [8].

Інтеграція біологічних показників якості ґрунтів у систему моніторингу дозволяє точніше оцінювати їхній стан. Біорізноманіття ґрунтових мікроорганізмів може слугувати індикатором екологічних змін, зокрема процесів колообігу поживних речовин [9]. Таким чином, запровадження комплексних методів біомоніторингу є критично важливим для забезпечення стійкого розвитку агроєкосистем і підвищення їхньої екологічної безпеки для агросфери загалом.

Мета і завдання дослідження. Проаналізувати методи біомоніторингу агроєкосистем для оцінки їхнього стану і стійкості в умовах інтенсивного і органічного сільськогосподарського виробництва.

Виклад основного матеріалу дослідження. Агроєкосистеми, на відміну від природних екосистем, мають спрощену структуру і знижений видовий склад через агрономічні вимоги для підвищення врожайності. Вони залежать від постійного втручання людини, що

робить необхідним регулярний моніторинг для забезпечення їхньої стійкості і продуктивності. Оцінка екологічного стану агроєкосистем є ключовим інструментом для виявлення змін, викликаних зовнішніми чинниками, такими як кліматичні зміни, внесення добрив і забруднення.

Одним із найбільш ефективних методів оцінки є біоіндикація, яка дозволяє встановити взаємозв'язок між змінами в індикаторних організмах і навколишнім середовищем. Наприклад, морфологічні зміни у рослинах можуть свідчити про вплив стресових умов.

В умовах глобальних екологічних викликів, таких як зміни клімату і зниження біорізноманіття, потреба в інноваційних підходах до моніторингу зростає. Фітомоніторинг стає дедалі важливішим інструментом, оскільки рослини є чутливими індикаторами змін клімату та антропогенних впливів. Рослинний покрив надає цінну інформацію про біорізноманіття, стан ґрунтів і функціонування екосистем. Рослини особливо чутливі до змін абіотичних чинників, що робить їх корисними для моніторингу впливу кліматичних змін і діяльності людини. Просторово-часові зміни рослинних угруповань дозволяють оцінити реакції на кліматичні зміни та антропогенне навантаження [10].

Фітомоніторинг агроєкосистем може проводитися як морфологічними, так і молекулярними методами. Морфологічні методи, що ґрунтуються на визначенні видів за зовнішніми ознаками, вимагають високої кваліфікації дослідників і залежать від вегетаційного періоду [11]. Молекулярні методи можуть інтегративно оцінювати стан рослинності та реконструювати історичні зміни біорізноманіття [13–14], що важливо для розуміння довготривалого впливу сільськогосподарської діяльності та змін клімату [15].

Серед перспективних інструментів моніторингу виділяються комп'ютерна морфо-колірна метрія, яка дозволяє точно реєструвати морфологічні та колірні зміни в рослинах, а також аналіз екологічної ДНК (eDNA), який дає змогу ідентифікувати рідкісні види та оцінювати біорізноманіття навіть у ґрунтових системах. Проте цей метод потребує подальшого розвитку для повноцінного використання в агроєкосистемах.

Для комплексної оцінки стану агроєкосистем слід використовувати різні групи біоіндикаторів. Наприклад, стенобіонти, які живуть у вузькому діапазоні екологічних умов, можуть

сигналізувати про короточасні зміни, тоді як еврибіонти, здатні адаптуватися до широкого спектра умов, вони дозволяють оцінювати довготривалі зміни. Поєднання цих підходів забезпечує комплексну оцінку екологічного стану агроєкосистем.

Толерантність організмів до змін екологічних чинників можна оцінювати через фізіологічний (потенційний) та екологічний (реальний) діапазони. Фізіологічний діапазон описує максимальні можливості виживання за певних умов, тоді як екологічний відображає реальну присутність організмів у природі, що часто обмежується взаємодією з іншими чинниками довкілля. За реакцією організмів на ці чинники виділяють чотири типи екологічної присутності, що характеризуються різним розподілом у межах діапазону толерантності. Ці типи є корисними для біомоніторингу, оскільки дозволяють виявити, як організми реагують на зміни екологічних умов.

Біологічні методи моніторингу, на відміну від хімічних і фізичних, не потребують попередньої ідентифікації конкретних забруднювачів і є швидкими й економічно ефективними. Це робить їх важливими інструментами для моніторингу стану агроєкосистем в умовах сучасних екологічних викликів. Зокрема, морфологічні зміни у рослинах, такі як флуктуюча асиметрія, можуть бути надійними показниками стабільності розвитку і екологічних ризиків. Флуктуюча асиметрія є універсальним показником, що сигналізує про порушення розвитку під впливом стресових чинників. Використання показників флуктуючої асиметрії, таких як асиметрія листків або квітів, дозволяє ефективно оцінювати екологічні ризики і розробляти стратегії для підвищення стійкості агроєкосистем.

Дослідження впливу різних доз комплексного добрива на стабільність розвитку *Trifolium pratense* L. показало, що найбільш стабільними ознаками для визначення флуктуючої асиметрії були довжина центральної жилки та параметри бічних листків. Відсутність антисиметрії та спрямованої асиметрії підтверджує нормальний розвиток рослин. Використання добрив у дозі $N_{30}P_{30}K_{30}$ спричинило найменші відхилення у стабільності розвитку, тоді як контрольні рослини і рослини з підвищеною дозою добрива ($N_{60}P_{60}K_{60}$) демонстрували підвищений рівень ФА, що свідчить про зниження стабільності розвитку. Збільшення зеленої маси супроводжувалося зменшенням вмісту нітратного азоту у ґрунті, що ймовірно призвело

до порушення внутрішніх механізмів гомеостазу та зниження стабільності розвитку. Дослідження флуктуючої асиметрії листових пластинок озимої пшениці показало зв'язок між величиною ФА та продуктивністю рослин. Найбільші відхилення були зафіксовані при використанні високих доз мінеральних добрив ($N_{120}P_{120}K_{120}$). У дослідженнях впливу агротехнологічних прийомів на стабільність розвитку картоплі і пшениці було встановлено, що сівозміни з бобовими культурами позитивно впливають на показники стійкості розвитку, що дозволяє використовувати коефіцієнт флуктуючої асиметрії як індикатор якості агротехнологічних практик.

Пестициди, які широко використовуються для боротьби зі шкідниками і запобігання хворобам, можуть мати негативний вплив на нецільові організми, зокрема членистоногих, таких як двокрилі (*Diptera*). Пестициди можуть викликати як летальні, так і сублетальні ефекти на біоту, порушуючи екологічну рівновагу. Зміни клімату, зокрема підвищення температур, можуть посилювати токсичність агрохімікатів, що підкреслює необхідність постійного моніторингу їхнього впливу на навколишнє середовище. Збір матеріалу проводився в садах з різним рівнем обробки пестицидами в межах Прут-Дністровської височини. Як умовний контроль виступали сади без пестицидного навантаження, також вивчалися сади з середнім та високим рівнем пестицидної обробки.

Під час досліджень було виявлено три атипові фенотипи кольору і розмірів тіла *Drosophila melanogaster* Meigen, 1830: чорне тіло нормальних розмірів (*black*), чорне тіло збільшених розмірів (*ebony*), жовте тіло нормальних розмірів (*yellow*). Також зафіксовано два атипові фенотипи крил: з зазубреним краєм одного крила (*serrate*) або обох крил (*Cut-13*), а також три атипові фенотипи кольору очей: коричнево-червоні (*sepia*), матово-бордові (*rough eye/glass*), блискуче-червоні (*mutation ruby*). Додатково виявлено фенотипи, які не мають відомих мутаційних аналогів, зокрема меланома на черевці і червоний хоботок. Ці специфічні фенотипові зміни можуть слугувати індикаторами підвищеного рівня пестицидів у навколишньому середовищі (рисунок).

Агроекосистеми, які є результатом інтенсивного втручання людини, потребують постійного моніторингу для забезпечення їхньої стійкості і продуктивності. Біоіндикація, зокрема використання морфологічних і молекулярних методів, є ефективними

інструментами для оцінки змін у таких системах. Фітомоніторинг є важливим для розуміння реакцій рослин на кліматичні і антропогенні зміни. Морфологічні зміни в рослинах, такі як флуктуюча асиметрія (ФА), є корисними показниками екологічних ризиків і змін у довкіллі. Вони допомагають виявити вплив стресових чинників на розвиток рослин і є ефективними для довготривалого моніторингу агроєкосистем.

Меланома черевця і хоботка



Фенокопії крил



Фенокопії кольору тіла



ebony

yellow

black

Рисунок. Генотоксичність гербіцидів

Перспективні методи: Комп'ютерна морфо-колірна метрія і аналіз екологічної ДНК (eDNA) є перспективними методами для детального моніторингу рослинності. Вони забезпечують точну інформацію про морфологічні і колірні зміни, а також дозволяють ідентифікувати рідкісні види та оцінювати біорізноманіття.

Вплив різних доз добрив і агротехнологічних прийомів на стабільність розвитку рослин є значним. Результати досліджень показують, що оптимальні дози добрив сприяють стабільності розвитку, тоді як надмірне використання може викликати негативні зміни. Використання пестицидів має потенціал викликати як летальні, так і сублетальні ефекти на нецільові організми. Підвищення температури через зміни клімату може посилювати токсичність агрохімікатів, що вимагає постійного моніторингу для збереження екологічної рівноваги.

Для комплексної оцінки стану агроєкосистем важливо використовувати різні методи моніторингу, включаючи морфологічні показники, флуктуючу асиметрію та аналіз екологічної ДНК. Це забезпечить більш точну оцінку впливу екологічних змін та допоможе в розробці ефективних стратегій для управління агроєкосистемами.

Висновки. Біомоніторинг агроєкосистем є ефективним інструментом для оцінки екологічного стану агроландшафтів і сприяє розробці екологічно сталих підходів до їхнього управління. З огляду на динамічний характер аграрних екосистем та зростання антропогенного впливу, біомоніторинг відіграє ключову роль у забезпеченні сталого розвитку сільського господарства.

Основними викликами біомоніторингу агроєкосистем є необхідність створення чутливих і надійних методів для виявлення екологічних змін на ранніх етапах. Важливо також враховувати широкий спектр екологічних і антропогенних чинників, що впливають на функціонування агроєкосистем.

Сучасні перспективи розвитку біомоніторингу включають впровадження новітніх технологій, таких як дистанційне зондування та геоінформаційні системи, які дозволяють масштабувати процеси оцінки екосистем на великі території. Особливий інтерес викликає інтеграція інноваційних методів, таких як аналіз екологічної ДНК (eDNA) та інші біоіндикативні підходи, що можуть суттєво покращити розуміння процесів у рослинних угрупованнях та ґрунтах під впливом

стресових чинників, зумовлених змінами клімату й інтенсивним землекористуванням.

Застосування цих методів дозволить підвищити стійкість агроєкосистем і забезпечити своєчасне реагування на екологічні виклики. Це сприятиме збереженню біорізноманіття та забезпеченню стійкості екосистем, що є критично важливим у контексті глобальних кліматичних змін.

1. Dhananjayan V., Jayanthi P., Jayakumar S., Ravichandran B. Agrochemicals Impact on Ecosystem and Bio-monitoring / In: Kumar S., Meena R. S., Jhariya M. K. (eds). *Resources Use Efficiency in Agriculture*. 2020. Springer, Singapore. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-15-6953-1_11 (дата звернення: 10.07.2024).
2. Xing K., Lu W., Huang Q. et. al. Soil eDNA biomonitoring reveals changes in multitrophic biodiversity and ecological health of agroecosystems. *Environmental Research*. 2024. Vol. 262 (2). P. 119931 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119931>
3. Bawa U., Ahmad A., Ahmad J. N. and Ezra A. G. Assessment of health risks from consumption of food crops fumigated with metal based pesticides in gwadam, Gombe state, Nigeria Bayero. *Journal of Pure and Applied Sciences* 2021. Vol. 14(1). P. 100–110. DOI: <https://doi.org/10.4314/bajopas.v14i1.1>
4. Liu S., Wu K., Yao Lu et. al. Characteristics and correlation analysis of heavy metal distribution in China's freshwater aquaculture pond sediments. *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 931. P. 172909. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172909>.
5. Морозова Т. В., Ліхо О. А. Емісія CO₂ з ґрунтів під енергетичними культурами. *Вісник НУВГП. Сер. Сільськогосподарські науки*. 2022. Вип. 2(98). С. 89–103. URL: <http://surl.li/fatarw> (дата звернення: 10.07.2024).
6. Muraleedharan V., Rajan S. C. & Jaishanker R. Determining the limits of traditional box-counting fractal analysis in leaf complexity studies, *Flora*. 2023. Vol. 304. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flora.2023.152300>.
7. Jahanmiri F. & Parker D. C. An Overview of Fractal Geometry Applied to Urban Planning. *Land*. 2022. Vol. 11. P. 475. DOI: <https://doi.org/10.3390/land11040475>
8. Мудрак О. В., Морозова Т. В. Застосування мікрокосмів для екологічно аргументованого добору біопаливних культур. *Агроєкологічний журнал*. 2023. № 4. С. 123–133. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2023.293762>
9. Biswal D. Nematodes as Ghosts of Land Use Past: Elucidating the Roles of Soil Nematode Community Studies as Indicators of Soil Health and Land Management Practices. *Appl Biochem Biotechnol*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12010-022-03808-9>.
10. Steinbauer M. J., Grytnes J.-A., Jurasinski G et. al. Accelerated increase in plant species richness on mountain summits is linked to warming. *Nature*. 2018. Vol. 556(7700). P. 231–234. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0005-6>
11. Corona P., Chirici G., McRoberts R. E., Winter S., & Barabati A. Contribution of large-scale forest inventories to biodiversity assessment and

monitoring. *Forest Ecology and Management*. 2011. Vol. 262(11). P. 2061–2069. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.08.044> 12. Beng K. C., & Corlett R. T. Applications of environmental DNA (eDNA) in ecology and conservation: Opportunities, challenges and prospects. *Biodiversity and Conservation*. 2020. Vol. 29(7). P. 2089–2121. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10531-020-01980-0> 13. Hiiesalu I., Opik M., Metsis et. al. Plant species richness belowground: Higher richness and new patterns revealed by next-generation sequencing. *Molecular Ecology*. 2012. Vol. 21(8). P. 2004–2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2011.05390.x> 14. Ariza M., Fouks B., Mauvisseau Q., Halvorsen R., Alsos I. G. & de Boer H. J. Plantbiodiversity assessment through soil eDNA reflects temporal and local diversity. *Methods in Ecology and Evolution*. 2023. Vol. 14. P. 415–430. DOI: <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13865> 15. Foucher A., Evrard O., Ficetola G. F. et. al. Persistence of environmental DNA in cultivated soils: Implication of this memory effect for reconstructing the dynamics of land use and cover changes. *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10(1). P. 10502. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67452-1>

REFERENCES:

1. Dhananjayan V., Jayanthi P., Jayakumar S., Ravichandran B. Agrochemicals Impact on Ecosystem and Bio-monitoring / In: Kumar S., Meena R. S., Jhariya M. K. (eds). *Resources Use Efficiency in Agriculture*. 2020. Springer, Singapore. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-15-6953-1_11 (data zvernennia: 10.07.2024). 2. Xing K., Lu W., Huang Q. et. al. Soil eDNA biomonitoring reveals changes in multitrophic biodiversity and ecological health of agroecosystems. *Environmental Research*. 2024. Vol. 262 (2). P. 119931 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119931> 3. Bawa U., Ahmad A., Ahmad J. N. and Ezra A. G. Assessment of health risks from consumption of food crops fumigated with metal based pesticides in gwadam, Gombe state, Nigeria *Bayero Journal of Pure and Applied Sciences* 2021. Vol. 14(1). P. 100–110. DOI: <https://doi.org/10.4314/bajopas.v14i1.1> 4. Liu S., Wu K., Yao Lu et. al. Characteristics and correlation analysis of heavy metal distribution in China's freshwater aquaculture pond sediments. *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 931. P. 172909. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172909> 5. Morozova T. V., Likho O. A. Emisiia SO₂ z gruntiv pid enerhetychnymy kulturamy. *Visnyk NUVHP. Ser. Silskohospodarski nauky*. 2022. Vyp. 2(98). S. 89–103. URL: <http://surl.li/fatarw> (data zvernennia: 10.07.2024). 6. Muraleedharan V., Rajan S. C. & Jaishanker R. Determining the limits of traditional box-counting fractal analysis in leaf complexity studies. *Flora*. 2023. Vol. 304. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flora.2023.152300> 7. Jahanmiri F. & Parker D. C. An Overview of Fractal Geometry Applied to Urban Planning. *Land*. 2022. Vol. 11. P.

475. DOI: <https://doi.org/10.3390/land11040475> **8.** Mudrak O. V., Morozova T. V. Zastosuvannia mikrokosmiv dlia ekolohichno arhumentovanoho doboru biopalyvnykh kultur. *Ahroekolohichniy zhurnal*. 2023. № 4. S. 123–133. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2023.293762> **9.** Biswal D. Nematodes as Ghosts of Land Use Past: Elucidating the Roles of Soil Nematode Community Studies as Indicators of Soil Health and Land Management Practices. *Appl Biochem Biotechnol*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12010-022-03808-9>. **10.** Steinbauer M. J., Grytnes J.-A., Jurasinski G et. al. Accelerated increase in plant species richness on mountain summits is linked to warming. *Nature*. 2018. Vol. 556(7700). P. 231–234. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0005-6> **11.** Corona P., Chirici G., McRoberts R. E., Winter S., & Barbati A. Contribution of large-scale forest inventories to biodiversity assessment and monitoring. *Forest Ecology and Management*. 2011. Vol. 262(11). P. 2061–2069. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.08.044> **12.** Beng K. C., & Corlett R. T. Applications of environmental DNA (eDNA) in ecology and conservation: Opportunities, challenges and prospects. *Biodiversity and Conservation*. 2020. Vol. 29(7). P. 2089–2121. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10531-020-01980-0> **13.** Hiiesalu I., Opik M., Metsis et. al. Plant species richness belowground: Higher richness and new patterns revealed by next-generation sequencing. *Molecular Ecology*. 2012. Vol. 21(8). P. 2004–2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2011.05390.x> **14.** Ariza M., Fouks B., Mauvisseau Q., Halvorsen R., Alsos I. G. & de Boer H. J. Plantbiodiversity assessment through soil eDNA reflects temporal and local diversity. *Methods in Ecology and Evolution*. 2023. Vol. 14. P. 415–430. DOI: <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13865> **15.** Foucher A., Evrard O., Ficot G. F. et. al. Persistence of environmental DNA in cultivated soils: Implication of this memory effect for reconstructing the dynamics of land use and cover changes. *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10(1). P. 10502. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67452-1>
-

Morozova T. V., Candidate of Biological Sciences (Ph.D.), Associate Professor (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne), **Mudrak O. V., Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Academician of the Academy of Sciences of the Higher School of Ukraine** (Vinnytsia Academy of Continuing Education, Vinnytsia)

BIOMONITORING OF AGROECOSYSTEMS: CHALLENGES AND PROSPECTS

Agricultural ecosystems, unlike natural ones, have simplified structures and reduced species diversity due to agronomic demands

for increased yield. They depend on human intervention, necessitating continuous monitoring to maintain their stability and productivity. Assessing the ecological status of agricultural ecosystems is crucial for identifying changes induced by external factors such as climate change, fertilizer application, and pollution. One of the most effective methods for evaluation is bioindication, which establishes the relationship between changes in indicator organisms and their environment. Specifically, morphological changes in plants can signal the impact of stress conditions.

In the context of global challenges such as climate change and decreasing biodiversity, innovative monitoring approaches are increasingly important. Phytomonitoring is becoming a critical tool, as plants are sensitive indicators of climate changes and anthropogenic impacts. Plant cover provides valuable information about biodiversity, soil conditions, and ecosystem functioning. Plants are particularly responsive to abiotic factors, making them useful for monitoring the effects of climate changes and human activities. Spatial and temporal changes in plant communities help assess responses to climatic changes and anthropogenic pressure.

Phytomonitoring of agricultural ecosystems can be conducted using both morphological and molecular methods. Morphological methods, based on identifying species by external features, require high researcher expertise and are dependent on the growing season. Molecular methods offer an integrative assessment of vegetation state and reconstruct historical biodiversity changes, which is essential for understanding the long-term effects of agricultural practices and climate changes. Emerging technologies such as computer-based morpho-colorimetric analysis and environmental DNA (eDNA) analysis provide precise monitoring tools for detecting morphological and color changes in plants and identifying rare species, respectively.

Comprehensive assessment of agricultural ecosystem status should involve various groups of bioindicators. For example, stenobionts, which thrive in narrow ecological ranges, can indicate short-term changes, while eurybionts, adaptable to a wide range of conditions, help assess long-term trends. Combining these approaches ensures a thorough evaluation of ecological status.

Biological monitoring methods, unlike chemical and physical ones, do not require prior identification of specific pollutants and are

quick and cost-effective. This makes them valuable for monitoring agricultural ecosystems under contemporary ecological challenges. Special attention in biomonitoring is given to morphological changes in plants. Fluctuating asymmetry (FA), reflecting deviations from symmetry in plant organs, is a reliable indicator of developmental stability and stress impacts. Measuring FA in leaf or flower asymmetry helps assess ecological risks and develop strategies to enhance ecosystem resilience.

Research on the impact of various doses of complex fertilizers on the developmental stability of *Trifolium pratense* revealed that central vein length and lateral leaf parameters were the most stable indicators of FA. Optimal fertilizer dose (N₃₀P₃₀K₃₀) showed minimal deviations, while control plants and those with higher doses (N₆₀P₆₀K₆₀) demonstrated increased FA, indicating reduced developmental stability. Increased biomass was associated with reduced nitrate nitrogen content in soil, potentially disrupting internal homeostasis and decreasing developmental stability. Studies on fluctuating asymmetry in wheat leaves showed a link between FA and plant productivity, with the highest deviations at high mineral fertilizer doses (N₁₂₀P₁₂₀K₁₂₀). Crop rotation with leguminous plants positively affected developmental stability, suggesting FA as an indicator of agronomic practices quality.

Pesticides, widely used for pest control in agriculture, can have negative impacts on non-target organisms, affecting ecological balance through various environmental pathways. Climate change further intensifies pesticide toxicity, emphasizing the need for ongoing monitoring. Research on pesticide impacts revealed atypical phenotypes in *Drosophila melanogaster*, such as color and size variations and wing and eye anomalies, indicating elevated pesticide levels in the environment.

Keywords: bioindication; environmental monitoring; agroecosystems; pesticides.