
БІОРИЗНОМАНІТТЯ ТА БІОБЕЗПЕКА ЕКОСИСТЕМ

УДК 631.95:579.26

БІОДІАГНОСТИКА І БІОБЕЗПЕКА ҐРУНТІВ АГРОЕКОСИСТЕМ

О.В. Шерстобоева, О.С. Дем'янюк, Я.В. Чабанюк

Інститут агроекології і природокористування НААН

Розглянуто науковий досвід із розроблення методів та критеріїв комплексної біодіагностики ґрунтів агроекосистем і створення інформативної, репрезентативної та об'єктивної системи оцінювання їх стану. Розроблені методи та система показників дають змогу проводити екологічну оцінку елементів агротехнологій, здійснювати ранню діагностику і запобігати розвитку в ґрунтах небажаних процесів унаслідок антропогенної дії. Оцінка природного стану і рівня антропогенного пошкодження ґрунтів за низкою біодіагностичних критеріїв може сприяти безпеці аграрного виробництва, а саме — збереженню родючості ґрунтів та отриманню якісної сільськогосподарської продукції.

Ключові слова: агроекосистема, екологічний стан ґрунту, біодіагностика.

Колектив Інституту агроекології і природокористування НААН, який святкує у цьому році своє 45-річчя, починаючи з 2000 р. плідно працює над створенням системи біоіндикаційних показників для ранньої діагностики стану ґрунту агроекосистем, адже їх тривале господарське використання погіршує багатовікову екологічну рівновагу, часто спричиняючи деформацію структури екосистеми та її забруднення. Цей науковий напрям було започатковано в лабораторії екології мікроорганізмів, розвинено та поглиблено у дослідженнях О. Шерстобоевої, О. Дем'янюк, Я. Чабанюка, Т. Шустерук, О. Тертичної, А. Бунас, Л. Ваги та ін. Зважаючи на багаторічні результати досліджень провідних українських і закордонних учених — мікробіологів, ґрунтознавців, екологів та на власні експериментальні дані, була розроблена система показників біологічної активності ґрунту, які рекомендовано визначати і враховувати під час проведення екологічного оцінювання стану ґрунту й агротехнологій. Ці показники охоплюють доклітинний, популяційний, ценотичний рівні організації

біологічної системи, мають тісний кореляційний зв'язок із актуальною і потенційною родючістю ґрунту та найоб'єктивніше характеризують його екологічний стан.

Дедалі більший антропогенний вплив на екосистеми потребує нових ефективних методів моніторингу та діагностики стану об'єктів навколишнього природного середовища. Світова практика свідчить про перспективність використання біологічних об'єктів у виявленні антропогенно зумовленої деградації природних та трансформованих екосистем, встановленні тривалих тенденцій їх змін та буферної здатності біологічних систем щодо чинників різної природи [1].

Найціннішим багатством України є родючі ґрунти, частка яких становить близько 6% від усіх світових площ ґрунтів чорноземного типу, і саме їх залучено в сільськогосподарське виробництво. Особливо негативний вплив антропогенного тиску на ґрунтове середовище проявляється саме в агроекосистемах, де нераціональне, науково необґрунтоване застосування засобів хімізації, технологій механічного обробітку ґрунту, недотримання принципів

© О.В. Шерстобоева, О.С. Дем'янюк, Я.В. Чабанюк, 2017

сівозміни тощо призводить до розбалансування їх функціональних складових і втрати стійкості екосистеми загалом [2, 3].

Розробленню системи найбільш інформативних і достовірно реєструвальних критеріїв, які зможуть найоб'єктивніше відображати зміни екологічного стану ґрунту, передусє багатий науковий досвід. Так, для оцінювання стану орних земель та їх агроекологічної паспортизації філіями Державного технологічного центру охорони родючості ґрунтів (нині ДУ «Інститут охорони ґрунтів України») було створено систему нормативних агрохімічних показників [3–5], сформовано базу фізико-хімічних, агрофізичних та екотоксикологічних показників.

Проте для показників ранньої діагностики змін ґрунтового середовища, пов'язаних із біологічною компонентою ґрунту, такої інформативної бази досі не створено, і навіть не розроблено систему діагностичних критеріїв. В Україні комплексні дослідження з використанням біоіндикаційних показників, зокрема ґрунту в агроекосистемах, на сьогодні ще не набули системного підходу, а проведені дослідження носять фрагментарний характер.

Мікроорганізми внаслідок значної поверхні контакту із середовищем існування є доволі чутливими до умов довкілля, а висока швидкість їх розмноження дає можливість у короткий термін виявити зміни, що виникають за дії різних екологічних чинників [6].

Саме мікробіота та її поліфункціональна діяльність є основним чинником ґрунтоутворювального процесу, живлення рослин і фітосанітарного стану ґрунту та забезпечує стабілізуючу функцію метаболічної рівноваги у природі [7, 8]. Тому ґрунтово-біологічні дослідження не повинні залишатись поза увагою дослідників під час всебічних обстежень стану ґрунту агроекосистем, а мають стати основою контрольної функції стану ґрунтового середовища, необхідної для розроблення екологічно безпечних агротехнологій та експертної оцінки земель з метою еколого-економічної оптимізації землекористування.

Інформація, одержана шляхом використання системи інформативних біодіагностичних показників, має важливе значення і є підґрунтям для вибору того чи іншого агротехнічного заходу, спрямованого на підвищення ефективності та збереження потенційної родючості ґрунту. Важливою складовою методологічної основи оцінювання екологічного стану ґрунту є система показників контролю, вибір яких обумовлено необхідністю належної характеристики головних функцій ґрунту, ґрунтоутворювальних або ґрунторуйнівних процесів, а також визначальних процесів щодо росту, розвитку та живлення рослин. Крім того, основними вимогами до показників біологічної активності ґрунту, які мають бути залучені для проведення біодіагностичних досліджень, є: інформативність, висока чутливість, репрезентативність, доступність у методичному виконанні, тобто висока точність (допустима лише незначна похибка) та простота визначення [9].

Для моніторингових досліджень стану ґрунту природних екосистем за техногенного на них впливу вітчизняними та зарубіжними авторами вже розроблено і запропоновано низку біоіндикаційних критеріїв [7, 8, 10–15]. Проте в агроекосистемах ґрунт зазнає постійних змін, за яких біологічні та біохімічні процеси виходять за рамки екологічного стандарту. Щоб оцінити рівень порушення екосистеми, спричиненого різними агрозаходами, необхідними для отримання сталих урожаїв, достатньо порівняти його параметри з відповідними параметрами непорушеної екосистеми — еталоном, і тим самим дати оцінку змінам, що відбулися. Ґрунтовий еталон, як вважає В.В. Медведєв [4], — це ґрунт у початковому стані, що є своєрідною точкою відліку для всіх наступних порівнянь у процесі тривалих систематичних спостережень, у т.ч. моніторингу. Оптимальним у цьому аспекті є цілинний, бажано абсолютно заповідний ґрунт, де антропогенний вплив повністю відсутній або мінімізований. Через недостатню кількість цілинних аналогів подібним еталоном може бути і переліг.

Програмою стандартного моніторингу ґрунтів України запропоновано такі біодіагностичні показники: активність азотфіксації; нітрифікаційна, амоніфікаційна, денітрифікаційна здатність, активність ферментів пероксидази, поліфенолоксидази, дегідрогенази, інвертази, а також сумарна біологічна активність — продукування CO_2 [4, 5]. На думку інших авторів, зокрема Є.М. Мішустіна [16], важливими показниками є коефіцієнти оліготрофності, мінералізації, гуміфікації та гумусонагромадження, вміст лабільної частини гумусу, токсичність ґрунту тощо [17, 18].

До інтегрованих показників екологічного стану ґрунту відносять: загальну біогенність, вміст органічного вуглецю у ґрунті, вміст вуглецю та азоту в мікробній біомасі, гідролізований азот, ферментативну активність, частку мікробного від загального органічного вуглецю ґрунту — як чутливий індикатор змін рівноваги між продукційними можливостями мікробіоценозу та запасом енергії, депонованої в органічній речовині ґрунту, тощо [14, 15, 19].

Вміст азоту та вуглецю у мікробній біомасі, як вважає А.С. Яковлев [18], є перспективним критерієм, що відображає інтенсивність трансформації елементів живлення за внесення мінеральних і органічних добрив.

Досліджуючи лісові фітоценози Карпат і Прикарпаття, В.П. Стефурак [11] пропонує для оцінки рівня антропогенного впливу реєструвати відхилення чисельності мікроорганізмів від відповідних меж їх норми, співвідношення кількостей різних груп мікроорганізмів, зміни їх видового різноманіття, а також окремих родів та видів мікроміцетів, інтенсивність виділення ґрунтом діоксиду вуглецю та активність ґрунтових ферментів.

Прикладом вивчення ґрунтових мікроорганізмів як індикаторів впливу еколого-географічного чинника навколишнього природного середовища можна вважати фундаментальні роботи Є.М. Мішустіна, який використовував для біодіагностики ґрунтів характеристики кількісного стану мікробних угруповань, чисельність і спів-

відношення певних груп мікроорганізмів [16]. Для порівняльної оцінки активності біологічних процесів, які протікають у ґрунті, низкою вчених [17] запропоновано коефіцієнти, що відображають функціональну активність мікрофлори. Зокрема, коефіцієнти мінералізації-імобілізації, оліготрофності, педотрофності, які вказують на спрямованість перебігу мікробіологічних процесів у ґрунті — у напрямі деградації або відновлення його родючості. Дослідники проблеми Т. Дьомкіна, Б. Золотарьова [20] пропонують також за мікробіологічними параметрами визначати інтенсивність швидкості мінералізації гумусових речовин ґрунту.

Низка дослідників для кількісного виміру рівня стійкості мікробного угруповання ґрунту за антропогенних навантажень використовують метаболічний коефіцієнт [10, 15]. Для характеристики змін ґрунту агроєкосистем С. Корсун [21] пропонує використовувати показник екологічної стійкості як співвідношення різниці респіраторної активності ґрунту природної екосистеми та дослідження агроландшафтів. Натомість О. Берестецький, Ю. Мочалов, М. Шерстобоев, К. Андріюк та інші науковці рекомендують визначати фітотоксичність ґрунту як інтегральний екоотоксикологічний показник його екологічного стану [17, 22].

В експедиційних виїздах 2000–2016 рр. у 14 областях України були здійснені моніторингові дослідження екологічного стану ґрунтів природних екосистем та різних агроєкосистем у стаціонарних польових дослідках установ мережі НААН з вивчення впливу агротехнологій на продуктивність сільськогосподарських культур та якість продукції. На основі визначення широкого спектра показників біологічної активності за проведення мікробіологічних та біохімічних порівняльних аналізів ґрунту агроєкосистем з ґрунтом перелогів обґрунтовано систему біодіагностичних показників, які відображають екологічний стан антропогенно змінених ґрунтів.

До основних, тобто найчутливіших інформативних показників біологічної ак-

тивності, що найтісніше корелюють із загальним умістом гумусу та врожайністю сільськогосподарських культур, належать: вміст загальної біомаси мікроорганізмів, активність емісії діоксиду вуглецю, коефіцієнт гумусонагромадження. До другорядних біодіагностичних показників віднесено: целюлозоруйнівну активність, нітрифікаційну здатність, коефіцієнти мінералізації, педотрофності та оліготрофності, швидкість мінералізації гумусу, а також інтегральний показник екотоксикологічного стану ґрунту — його фітотоксичність [23]. Розроблено відповідні методичні рекомендації «Оцінка впливу агротехнологій на стан ґрунтів агроecosистем за біодіагностичними показниками» [9].

Комплексна біодіагностика ґрунтів агроecosистем та створення інформативної та об'єктивної системи оцінювання їх стану дає змогу проводити екологічне оцінювання застосованих елементів агротехнологій, здійснювати ранню діагностику та запобігати розвитку в ґрунті небажаних процесів унаслідок антропогенної дії, а також дає уявлення про рівень їх антропогенного пошкодження.

Багаторічні результати моніторингу ґрунтів стаціонарних дослідів та їх природних аналогів засвідчили, що у ґрунті під самоврегульованими природними фітоценозами існує оптимальне співвідношення чисельності мікроорганізмів, що виконують протилежні функції у ґрунтовому середовищі, та оптимальне співвідношення активності ферментів, що беруть участь у протилежних біохімічних реакціях. До такого стану мають наближатись показники ґрунту агроecosистем [24]. Отже, найпоказовішими критеріями є розрахункові коефіцієнти, за якими слід здійснювати експрес-оцінку екологічного стану ґрунту.

Поряд з оцінюванням репрезентативності та об'єктивності методів дослідження екологічного стану ґрунтів розробляли нові або удосконалювали існуючі методи. Так, було розроблено та запатентовано новий спосіб визначення антимікробної активності ґрунту, що характеризує його здатність до саморегуляції, який апробо-

вано та рекомендовано до впровадження для проведення агроecологічного моніторингу [25]. Для екологічного нормування якості ґрунтів запропоновано шкалу рівня антимікробної активності. Зокрема, використання способу дало змогу виявити лінійну залежність між показниками антимікробної активності ґрунту і коефіцієнтом його мікотрофності та загальним умістом мікробної біомаси.

Однак можливості вивчення й розуміння біорізноманіття ґрунтових мікроорганізмів мають певні таксономічні і методологічні обмеження, наприклад, визначення та ідентифікації ґрунтових мікроорганізмів, дослідження їх функцій. Нині немає більш інформативного способу вивчення різноманіття ґрунтових мікроорганізмів, як використання комплексу молекулярних методів, за допомогою яких можна отримати найповніші знання про біорізноманіття, стан та активність мікробного угруповання. І хоча молекулярні методи мають переваги в отриманні інформації про некультивовані форми мікроорганізмів, їм також характерні певні обмеження, які не можуть бути проігноровані. Тому система біодіагностичних критеріїв має обов'язково передбачати використання молекулярно-генетичних показників. За допомогою сучасних методів досліджень проводиться виділення та аналіз загальної мікробної ДНК ґрунту, зокрема, завдяки методам полімеразної ланцюгової реакції встановлюється видове біорізноманіття мікроорганізмів різних типів ґрунту, у т.ч. за використання тих чи інших агротехнологій [26].

Низкою досліджень продемонстровано, що застосування пестицидів не сприяє чітко вираженому ефекту зниження біологічної активності ґрунту за показниками чисельності мікроорганізмів основних таксономічних та еколого-трофічних груп, інтенсивності емісії оксиду вуглецю та вмісту загальної мікробної біомаси. Тому було розроблено експрес-метод оцінювання токсичності пестицидів щодо ґрунтових мікроорганізмів. Метод базується на використанні спеціальних тест-культур і містить градієнт концентрацій сполуки, що

аналізується. За його допомогою можливо обробляти результати з високою точністю та швидкістю. Зокрема встановлено, що пестицидне навантаження знижує біорізноманіття мікробного угруповання ґрунту та спричиняє зростання в ньому частки токсичних та умовно патогенних мікроцистів [27–29].

Використання сучасних молекулярно-генетичних методів COMET та TUNEL для оцінювання генотоксичності пестицидів за впливом на генетичний апарат представників ґрунтової та герпетобіонтної безхребетної мезофауни продемонструвало високу чутливість останніх [26]. Усі проаналізовані нами речовини спричиняли пошкодження ДНК клітин. Було встановлено, що гербіциди сприяють утворенню селективних умов для герпетобіонтів. Своєю чергою це зумовлює істотне зменшення кількості видів різних таксономічних груп. Зменшується і чисельність дощових черв'яків, у середньому на 80% порівняно з ґрунтом природної екосистеми.

Порівняння кореляційних матриць, отриманих для досліджених ґрунтів природних екосистем, засвідчило, що кожен із них має свої специфічні властивості, сформовані

одночасно біотичною і абіотичною складовими. Узагальнення досліджених екосистем певною мірою зменшує достовірність і рівні кореляційних залежностей між дослідженими показниками, що підтверджує унікальність кожної екосистеми, тому потребує окремого розгляду кожної з екосистем, щоб уникнути узагальнення [30].

Матеріали цих досліджень увійшли у монографію «Екологічна безпека агропромислового виробництва» [31], а також до низки методичних рекомендацій, у т.ч. підготовленої за участю колег із Національного університету біоресурсів і природокористування України «Модель системи екологічного землеробства в Лісостепу України» [32], патентів та дисертаційних робіт співробітників відділу агроекології та біобезпеки.

Впровадження вищенаведених наукових розробок засвідчило, що дослідження структурно-функціональної організації мікробних угруповань ґрунту агроекосистем дає можливість вчасно корегувати агротехнологічні схеми та створювати збалансовані високопродуктивні агроекосистеми і пропонувати основи науково обґрунтованого управління цими процесами.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Дідух Я.П.* Основи біоіндикації / Я.П. Дідух. — К.: Наукова думка, 2012. — 344 с.
2. Bioindication in Soil Ecosystems / Edited by T.J. Heeger, G. Imfeld, E.A.D. Mitchell // *European Journal of Soil Biology*. — 2012. — Vol. 49. — P. 1–118.
3. *Дегодюк Е.Г.* Еколого-техногенна безпека України / Е.Г. Дегодюк, С.Е. Дегодюк. — К.: ЕКМО, 2006. — 306 с.
4. *Медведев В.В.* Мониторинг почв Украины / В.В. Медведев. — Х.: Антыква, 2002. — 428 с.
5. *Патика В.П.* Агроекологічний моніторинг та паспортизація сільськогосподарських земель / В.П. Патика, О.Г. Тараріко. — К.: Фітоцентр, 2002. — 296 с.
6. The role of microorganisms at different stages of ecosystem development for soil formation / S. Schulz, R. Brankatschk, A. Dumig et al. // *Biogeosciences*. — 2013. — No. 10. — P. 3983–3996.
7. Иерархическая система биоиндикации почв, загрязненных тяжелыми металлами / К.И. Андреев, Г.А. Иутинская, В.Е. Козырицкая и др. // *Почвоведение*. — 1997. — № 12. — С. 1491–1496.
8. *Сорокин Н.Д.* Микробиологический мониторинг лесных экосистем Сибири при различных антропогенных воздействиях / Н.Д. Сорокин // *Успехи современной биологии*. — 1993. — Т. 113, № 2. — С. 131–140.
9. *Шерстобоева О.В.* Оцінка впливу агротехнологій на стан ґрунтів агроекосистем за біодіагностичними показниками: методичні рекомендації / О.В. Шерстобоева, Я.В. Чабанюк, О.С. Дем'янюк. — К., 2007. — 25 с.
10. *Мищенко А.К.* Биохимические критерии мониторинга сельскохозяйственных земель / А.К. Мищенко, В.Г. Безуглов // *Агро XXI*. — 2003/2004. — № 7–12. — С. 98–101.
11. *Стефурак В.П.* Использование микробиологических тестов для оценки состояния наземных экосистем в условиях антропогенного загрязнения / В.П. Стефурак // *Труды I Междунар. научн.-практ. конф. «Устойчивое развитие: загрязнение окружающей среды и экологическая безопасность»*. — Днепропетровск, 1995. — Т. 2. — С. 91.
12. *Anderson T.H.* Dynamics of microbial biomass in a rainfed soil under wheat cultivation / T.H. Anderson // *Pedosphere*. — 2004. — Vol. 14, No. 1. — P. 53–62.

13. *Brookes P.C.* The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals / P.C. Brookes // *Biol. Fertil. Soils.* — 1995. — Vol. 19, No. 4. — P. 269–279.
14. *Hofman J.* Novel approach to monitoring of the soil biological quality / J. Hofman, J. Bezchlebova, L. Dusek // *Environ. Int.* — 2003. — Vol. 28, No. 88. — P. 771–778.
15. *Margesin R.* Monitoring of bioremediation by soil biological activities / R. Margesin, A. Zimmerbauer, F. Schinner // *Chemosphere.* — 2000. — Vol. 40, No. 3. — P. 339–340.
16. *Мишустин Е.Н.* Микробиологическая диагностика состояния почвы / Е.Н. Мишустин // *Советская агрономия.* — 1946. — № 10. — С. 61–67.
17. Функціонування мікробних ценозів ґрунту в умовах антропогенного навантаження / К.І. Андрулюк, Г.О. Іутинська, А.Ф. Антипчук та ін. — К.: Обереги, 2001. — 240 с.
18. *Яковлев А.С.* Биологическая диагностика и мониторинг состояния почв / А.С. Яковлев // *Почвоведение.* — 2000. — № 1. — С. 70–73.
19. *Степанов А.М.* Биоиндикация на уровне экосистем / А.М. Степанов // *Биоиндикация и биомониторинг.* — М.: Наука, 1991. — С. 59–64.
20. *Демкина Т.С.* Определение скорости минерализации гумусовых веществ в почве / Т.С. Демкина, Б.Н. Золотарева // *Почвоведение.* — 1997. — № 10. — С. 1217–1221.
21. *Корсун С.Г.* Спосіб визначення екологічної стійкості ґрунтів в агроландшафтах / С.Г. Корсун // *Вісник аграрної науки.* — 2006. — № 6. — С. 61–63.
22. А.с. 900185 СССР, М.Кл.З G01N 33/24. Способ определения фитотоксичности почвы / Ю.М. Мочалов, Н.К. Шерстобоев. — № 2937051/30-15; заявл. 17.03.80; опубл. 23.01.82, Бюл. № 3.
23. Наукові основи сталого розвитку агроєкосистем України: у 2-х т. / За наук. ред. О.І. Фурдичка. — К.: ДІА, 2012. — 700 с.
24. Вплив гідротермічного режиму вегетації на урожайність кукурудзи і екологічний стан ґрунту / О.С. Дем'янюк, О.В. Шерстобоева, А.М. Клименко, Я.В. Чабанюк // *Агроєкологічний журнал.* — 2016. — № 3. — С. 45–50.
25. Пат. 26942 Україна, МПК (2006) G01N 33/24. Спосіб визначення антимікробної активності ґрунту / О.В. Шерстобоева, Г.О. Іутинська, А.Ф. Антипчук та ін.; заявник та патентовласник Інститут агроєкології УААН. — № 200706367; заявл. 07.06.2007; опубл. 10.10.2007.
26. Молекулярно-генетичні методи для визначення різноманіття ґрунтових мікроорганізмів: Методичні рекомендації / О.В. Шерстобоева, Я.В. Чабанюк, А.А. Бунас та ін. — К., 2014. — 39 с.
27. Визначення біологічної ефективності пестицидів і агрохімікатів: Методичні рекомендації / Я.В. Чабанюк, О.В. Шерстобоева, Є.Д. Ткач та ін. — К., 2013. — 36 с.
28. Екологічна оцінка впливу пестицидів і агрохімікатів на цільові об'єкти навколишнього природного середовища: Методичні рекомендації / Я.В. Чабанюк, О.В. Шерстобоева, Є.Д. Ткач та ін. — К., 2013. — 62 с.
29. Екологічна оцінка впливу пестицидів та агрохімікатів на ґрунтові мікроорганізми: Методичні рекомендації / Я.В. Чабанюк, О.В. Шерстобоева, В.В. Чайковська та ін. — К., 2015. — 63 с.
30. *Чабанюк Я.В.* Науково-методичне обґрунтування біодіагностики ґрунтів агроєкосистем Лісостепу України: Автореф. ... д-ра с.-г. наук / Я.В. Чабанюк. — К., 2015. — 40 с.
31. Екологічна безпека агропромислового виробництва: Монографія / За наук. ред. О.І. Фурдичка. — К.: ДІА, 2013. — 416 с.
32. Модель системи екологічного землеробства в Лісостепу України: Методичні рекомендації / Ю.П. Манько, О.А. Цюк, О.П. Кроїнинов та ін. — К.: Аграрна освіта, 2008. — 36 с.

REFERENCES

1. Didukh, Ya.P. (2012). *Osnovy bioindykatsii [Foundations of bioindication]*. K.: Naukova dumka [in Ukrainian].
2. Heger, T.J., Imfeld, G., Mitchell, E.A.D. (Ed.). (2012). Bioindication in Soil Ecosystems. *European Journal of Soil Biology*, 49, 1-118 [in English].
3. Dehodiuk, E.H. (2006). *Ekoloho-tekhnohenna bezpeka Ukrainy [Environmental and Technological safety of Ukraine]*. Kyiv: EKMO [in Ukrainian].
4. Medvedev, V.V. (2002). *Monitorynh pochv Ukrainy [Soil monitoring of Ukraine]*. Kharkiv: Antykva [in Russian].
5. Patyka, V.P., & Tarariko, O.H. (2002). *Ahroekolohichnyi monitorynh ta pasportyzatsiia silskohospodarskykh zemel [Agroecological monitoring and certification of agricultural land]*. Kyiv: Fitotsentr [in Ukrainian].
6. Schulz, S., Brankatschk, R., Dumig, A. et al. (2013). The role of microorganisms at different stages of ecosystem development for soil formation. *Biogeosciences*, 10, 3983–3996 [in English].
7. Andreiuk, K.Y., Iutyńskaia, H.A., Kozyrityskaia, V.E., et al. (1997). Hierarkhicheskaia sistema bioindykatsii pochv, zahriaznennykh tiazhelymy metalamy [Hierarchical system of bioindication of soils contaminated with heavy metals]. *Pochvovedenye — Pedology*, 12, 1491–1496 [in Russian].
8. Sorokin, N.D. (1993). Mykrobiolohycheskyi monitorynh lesnykh ekosystem Sybiru pry razlichnykh antropohennykh vozdeistviakh [Microbiological monitoring of forest ecosystems in Siberia under various anthropogenic influences]. *Uspekhi sovremennoi biologii — Successes of modern biology*, 113 (2), 131–140 [in Russian].
9. Sherstoboieva, O.V., Chabaniuk, Ya.V., & Demianiuk, O.S. (2007). *Otsinka vplyvu ahrotekhnolohii na stan gruntiv ahroekosystem za biodiagnostychnymy pokaznykamy [Assessing the impact of agricultural*

- technologies on the state of soil agroecosystems by bio-diahnostychnymy indicators*]. Kyiv [in Ukrainian].
10. Mynenko, A.K. & Bezuhlov, V.H. (2003–2004). Biokhimicheskiie kryterii monitorynha selskokhoziaistvennykh zemel [Biochemical criteria for monitoring agricultural land]. *Ahro XXI – Agro XXI*, 7, 98–101 [in Russian].
 11. Stefurak, V.P. (1995). Ispolzovaniie mikrobiolohicheskyykh testov dlia otsenky sostoianniia nazemnykh ekosystem v usloviakh antropohennoho zahriazneniia [Use of microbiological tests to assess the state of terrestrial ecosystems in anthropogenic pollution]. Proceeding from The sustainable development: environmental pollution and environmental safety: *I Mezhdunar. nauchn.-prakt. Konf – 1st International Scientific and Practical Conference*, 2, (p. 91). Dnepropetrovsk [in Russian].
 12. Anderson, T.H. (2004). Dynamics of microbial biomass in a rainfed soil under wheat cultivation. *Pedosphere*, 14 (1), 53–62 [in English].
 13. Brookes P.C. (1995). The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals. *Biol. Fertil. Soils*, 19 (4), 269–279 [in English].
 14. Hofman, J., Bezchlebova, J., Dusek L. (2003). Novel approach to monitoring of the soil biological quality. *Environ. Int.*, 28 (88), 771–778 [in English].
 15. Margesin, R., Zimmerbauer, A., Schinner, F. (2000). Monitoring of bioremediation by soil biological activities. *Chemosphere*, 40 (3), 339–340 [in English].
 16. Myshustin, E.N. (1946). Mykrobiolohicheskaia dyahnostika sostoianniia pochvy [Microbiological diagnostics of soil]. *Sovetskaia ahronomiia – Soviet agronomy*, 10, 61–67 [in Russian].
 17. Andreiuk, K.I., Iutynska, H.O., Antypchuk A.F. et al. (2001). *Funktsionuvanniia mikrobynykh tseoziv gruntu v umovakh antropohennoho navantazhennia [The functioning of soil microbial communities under conditions of anthropogenic load]*. Kyiv: Oberehy [in Ukrainian].
 18. Yakovlev, A.S. (2000). Byolohicheskaia diagnostika i monitorynh sostoiannia pochv [Biological diagnosis and monitoring of soil]. *Pochvovedeniie – Pedology*, 1, 70–73 [in Russian].
 19. Stepanov, A.M. (1991). Bioindykatsiia na urovne ekosystem [Bioindication at ecosystems level]. *Bioindykatsiia i biomonitoring*. Moscow: Nauka [in Russian].
 20. Demkina, T.S., & Zolotareva, B.N. (1997). Opredeleniye skorosti myneralizatsii humusovykh veshchestv v pochve [Determination of the rate of mineralization of humic substances in soil]. *Pochvovedeniie – Pedology*, 10, 1217–1221 [in Russian].
 21. Korsun, S.H. (2006). Sposib vyznachennia ekolohichnoi stiikosti gruntiv v ahrolandshaftakh [Method for determining soil environmental sustainability in agricultural landscapes]. *Visnyk aharnoi nauky – Journal of Agricultural Science*, 6, 61–63 [in Ukrainian].
 22. Mochalov, Yu.V., & Sherstoboev, N.K. Sposob opredeleniia fitotoksichnosti pochvy – Avtorskoe svi-detelstvo SSSR № 90085 [in Russian].
 23. Furdychko, O.I. (Eds.). (2012). *Naukovi osnovy staloho rozvytku ahroekosystem Ukrainy [Scientific basis for sustainable development of agro-ecosystems of Ukraine]*. (Vols. 1-2). Kyiv: DIA [in Ukrainian].
 24. Demianiuk, O.S., Sherstoboieva, O.V., Klymenko, A.M. & Chabaniuk, Ya.V. (2016). Vplyv hidrotermichnoho rezhymu vebetatsii na urozhainist kukurudz i ekolohichni stan gruntu [Effect of hydrothermal treatment on vegetation productivity of maize and soil environmental condition]. *Ahroekolohichni zhurnal – Agroecological journal*, 3, 45–50 [in Ukrainian].
 25. Sherstoboieva, O.V., Iutynska, H.O., Antypchuk, A.F., et al. (2006). Sposib vyznachennia antymikrobnoi aktyvnosti gruntu [Method of determining the antimicrobial activity of the soil]. *Pat. 26942* [in Ukrainian].
 26. Sherstoboieva, O.V., Chabaniuk, Ya.V., Bunas, A.A. et al. (2014). *Molekuliarno-henetychni metody dlia vyznachennia riznomanittia gruntovykh mikroorhanizmiv [Molecular genetic techniques to determine the diversity of soil microorganisms]*. Kyiv [in Ukrainian].
 27. Chabaniuk, Ya.V., Sherstoboieva, O.V., Tkach, Ye.D., et al. (2013). *Vyznachennia biolohichnoi efektyvnosti pestytsydiv i ahrokhimikativ [Determining the biological effectiveness of pesticides and agrochemicals]*. Kyiv [in Ukrainian].
 28. Chabaniuk, Ya.V., Sherstoboieva, O.V., Tkach, Ye.D., et al. (2013). *Ekolohichna otsinka vplyvu pestytsydiv i ahrokhimikativ na tsilovi obiekty navkolysnnoho pryrodnoho seredovyschcha [Environmental impact assessment of pesticides and agrochemicals on target objects Environment]*. Kyiv [in Ukrainian].
 29. Chabaniuk, Ya.V., Sherstoboieva, O.V., Chaikovska, V.V., et al. (2015). *Ekolohichna otsinka vplyvu pestytsydiv ta ahrokhimikativ na gruntovi mikroorhanizmy [Environmental impact assessment of pesticides and agrochemicals on soil microorganisms]*. Kyiv [in Ukrainian].
 30. Chabaniuk, Ya.V. (2015). *Naukovo-metodychne obgruntuvanniia biodiagnostyky gruntiv ahroekosystem Lisostepu Ukrainy [Scientific and methodical study of soil agroecosystems biodiagnosticity steppes of Ukraine]*. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Kyiv [in Ukrainian].
 31. Furdychko, O.I. (Eds.). (2013). *Ekolohichna bezpeka ahropromyslovoho vyrobnytstva [Environmental safety of agroindustrial production]*. Kyiv: DIA [in Ukrainian].
 32. Manko, Yu.P., Tsiuk, O.A., Krotynov, O.P., et al. (2008). *Model systemy ekolohichnoho zemlerobstva v Lisostepu Ukrainy [Model of Ecological Agriculture in the steppes of Ukraine]*. Kyiv [in Ukrainian].