

ІННОВАЦІЇ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА У ЗМЕНШЕННІ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ В АГРОЄКОСИСТЕМАХ УКРАЇНИ

А.М. Ліщук

кандидат сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник
Інститут агроєкології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: lishchuk.alla.n@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8339-9365>

А.І. Парфенюк

доктор біологічних наук, професор
Інститут агроєкології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: verespar@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0169-4262>

Н.В. Карачинська

кандидат біологічних наук
Інститут агроєкології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: karachinskan051177@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6571-8430>

І.В. Безноско

кандидат біологічних наук, старший дослідник
Інститут агроєкології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: beznoskoirina@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2217-5165>

У статті проаналізовано роль інноваційного способу господарювання — точного землеробства, у зниженні екологічного навантаження на агроєкосистеми України та в оптимізації використання природних ресурсів. Показано високий потенціал точного землеробства для підвищення ефективності аграрного виробництва та забезпечення стійкого розвитку агроєкосистем. Проаналізовано світові передові практики використання інноваційних технологій точного землеробства, які довели їхню ефективність. Визначено необхідність та актуальність розроблення механізму зниження екологічних ризиків в агроєкосистемах України за використання технологій точного землеробства. Розроблено механізм зниження екологічних ризиків в агроєкосистемах, який обумовлює порядок управління сільськогосподарськими процесами за допомогою інноваційних технологій як інструменту для оптимізації використання ресурсів і зменшення негативного впливу на довкілля, а також підвищення стійкості агроєкосистем до змін клімату. Зазначено, що впровадження технологій точного землеробства суттєво зменшує екологічні ризики, пов'язані з традиційними методами ведення сільського господарства. Моніторинг і діагностика стану агроєкосистем у рамках точного землеробства забезпечують підвищення ефективності використання ресурсів, зменшення негативного впливу на навколишнє природне середовище та підвищення стійкості аграрного виробництва. Оптимізація використання агрохімікатів, води та інших ресурсів, завдяки сучасним технологіям, сприяє збереженню природних ресурсів і покращенню екологічної стійкості агроєкосистем.

Ключові слова: сільське господарство, землеробство, агроєкосистема, мінімізація екологічного ризику, зміни клімату, екологічна безпека.

ВСТУП

В Україні точне землеробство почало набирати популярності завдяки зростаючій потребі в зниженні екологічних ризиків і покращенні ефективності агровиробництва. Точне землеробство стає дедалі актуальнішим і важливішим способом господарювання в контексті зміни клімату, деградації ґрунтів, зростаючого антропогенного тиску на природні ресурси, обумовлюючи необхідність забезпечення екобезпеки агроєкосистем. Традиційні методи ведення сільського господарства часто призводять до виникнення еко-

логічних ризиків через надмірне використання агрохімікатів, деградацію ґрунтів і забруднення водних ресурсів. Ці ризики загрожують стійкості продовольчих систем і вимагають впровадження інноваційних підходів, таких як точне землеробство. Цей спосіб землеробства використовує сучасні технології для оптимізації агрономічних практик і має потенціал для суттєвого зниження зазначених екологічних ризиків. Упровадження таких технологій дозволяє зменшити негативний вплив на довкілля, підвищуючи екологічну стійкість агроєкосистем.

Зміна клімату значно впливає на продуктивність сільського господарства. Зростання температур, зміни в кількості опадів і збільшення частоти екстремальних погодних явищ, таких як посухи та повені, ведуть до зниження врожайності та втрати родючих земель [1]. Це створює необхідність для адаптації агротехнічних практик, зокрема шляхом впровадження точного землеробства, яке дозволяє оптимізувати використання ресурсів і знижувати ризики, пов'язані з кліматичними змінами [2].

Деградація ґрунтів, яка спричинена ерозією, виснаженням поживних речовин та забрудненням, є ще одним екологічним ризиком для сільського господарства. За оцінками FAO [3], майже 33% світових ґрунтів перебувають у стані деградації, що загрожує продовольчій безпеці та екологічній стабільності. Точне землеробство, зокрема технології моніторингу стану ґрунтів та диференційованого внесення добрив, може значно зменшити темпи деградації, підвищуючи ефективність використання ресурсів та сприяючи відновленню ґрунтів [4].

Екологічна безпека агроєкосистем стає критично важливою в умовах глобалізації та збільшення інтенсивності виробництва. Екологічні ризики, спричинені поширенням шкідників, хвороб рослин і впровадженням інвазійних видів, зростають, що може мати серйозні наслідки для врожайності та біорізноманіття. Точне землеробство, яке включає системи раннього попередження, моніторинг шкідників і диференційовані методи захисту рослин, дозволяє ефективніше управляти екологічною безпекою та знижувати ризики для агроєкосистем [5].

Метою роботи є дослідження ролі інноваційного точного землеробства в зниженні екологічного навантаження на агроєкосистеми України та оптимізації використання природних ресурсів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Точне землеробство як сучасна агротехнологія привертає значну увагу науковців по всьому світу завдяки своїм можливостям оптимізувати використання ресурсів і знижувати екологічні ризики. Науковий доробок українських і зарубіжних учених підтверджує високу результативність цієї методики в різних напрямках сільського господарства. Зокрема, О. Нгуєнуч зі співавт. [6] вивчали шляхи підвищення ефективності сільськогосподарської діяльності за рахунок мінімальних початкових витрат матеріальних і людських ресурсів та уникнення шкідливого впливу на навколишнє середовище завдяки інноваційним технологіям. Н. Пасічник та О. Опришко [7] зосередилися на

аналізі впливу точного землеробства на екологічну безпеку агроєкосистем. Зарубіжні вчені I. Bhakta та ін. [4] активно досліджують потенціал цієї технології та її вплив на здоров'я ґрунтів і екологічну стійкість. L. Méndez-Vázquez та ін. [5] вивчають зниження витрат на пестициди та добрива за збереження врожайності сільськогосподарських культур. S. Balasundram та ін. [2] аналізують вплив точного землеробства на адаптацію сільського господарства до змін клімату.

Зазначені дослідження свідчать про високий потенціал точного землеробства для підвищення ефективності агровиробництва та забезпечення стійкого розвитку агроєкосистем. Однак постає необхідність розроблення механізму зниження екологічних ризиків в агроєкосистемах України, керуючись досвідом учених світу, які впроваджують передові практики використання інноваційних технологій точного землеробства та довели їхню ефективність в інших країнах.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

В основу дослідження покладено системний підхід, у межах якого використовували загальноприйняті наукові методи абстрактно-логічного аналізу, синтезу, аналогії, порівняння та узагальнення наукових даних у сфері землекористування. Використано монографічні, наукові публікації та матеріали періодичних видань в аграрній сфері для узагальнення інформації. Інформаційну основу досліджень становлять наукові доробки вітчизняних і зарубіжних учених у сфері залучення інноваційних агротехнологій для "зеленого" зростання сільського господарства.

Механізм зниження екологічних ризиків в агроєкосистемах України за використання інноваційних технологій точного землеробства розроблено завдяки аналізу, синтезу, узагальненню та виявленню причинно-наслідкових зв'язків, які підтверджують комплексний характер поведінкової теорії в екологічно безпечному сільському господарстві.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Точне землеробство є сучасною системою управління аграрним виробництвом, яка використовує інформаційно-комунікаційні технології для оптимізації процесів вирощування сільськогосподарських культур. Цей підхід базується на збиранні, аналізі та використанні детальної інформації про умови ґрунту, клімат, стан рослин і потреби в агрохімікатах, що дозволяє точно дозувати ресурси та мінімізувати

їх втрати, підвищуючи ефективність і стійкість аграрного виробництва.

Розроблення механізму зниження екологічних ризиків в агроєкосистемах є важливим та актуальним завданням, оскільки воно сприяє стійкому й ефективному агровиробництву, зменшенню негативного впливу сільського господарства на навколишнє середовище через використання точного землеробства, яке задовольняє екологічні, економічні, технологічні та соціальні потреби. Завдяки оптимальному використанню водних, енергетичних і хімічних ресурсів, технології в галузі точного землеробства забезпечують екологічну безпеку, збереження біорізноманіття та родючості ґрунтів в умовах глобальних кліматичних змін і екологічних ризиків деградації агроєкосистем.

Попередніми власними дослідженнями [8–10] визначено низку причин появи екологічних ризиків в агроєкосистемах. Вони виникають в умовах деградації ґрунтів, ерозії, втрати їхньої родючості, засолення та опустелювання. Ці проблеми стають дедалі серйознішими та потребують упровадження технологій для їхнього попередження. Надмірне використання мінеральних добрив і пестицидів призводить до забруднення ґрунтів, води та повітря, відбуваються не лише деградація ґрунтів і зниження їхньої родючості, але й втрати біорізноманіття. Це створює необхідність для впровадження нових підходів у землеробстві шляхом інноваційного точного землеробства, яке дозволяє більш раціонально використовувати ресурси та знижувати негативний вплив на навколишнє природне середовище [11].

Зміни клімату викликають збільшення частоти екстремальних погодних умов, включаючи часті посухи, повені, що ставить під загрозу стабільність урожайності сільськогосподарських культур. Це спонукає аграріїв до розроблення та впровадження агротехнологій, які дозволяють швидко адаптуватися до нових умов, мінімізувати екологічні ризики втрати врожаю і забезпечити стале виробництво продовольства [12].

До економічних передумов належить зростання вартості води, добрив, засобів захисту рослин і палива, що вимагає більш ефективного використання ресурсів для зниження витрат на виробництво [13]. На глобальному ринку зростає конкуренція. Щоб зберегти конкурентоспроможність, аграрні виробники повинні підвищувати ефективність виробництва, якої можливо досягти за допомогою сучасних інноваційних технологій точного землеробства. Технологічне вдосконалення ГІС-технологій, супутникових систем спостереження, дронів і сенсорних мереж створює можливість для

детального моніторингу стану агроєкосистем та впровадження точного землеробства [14]. Сучасні сільськогосподарські машини, оснащені системами автоматичного керування та внесення ресурсів, дозволяють підвищити точність та ефективність агротехнічних заходів.

Зростаючий тиск із боку міжнародних організацій та урядів щодо дотримання екологічних стандартів у сільському господарстві, зокрема в контексті Європейського “зеленого” курсу, стимулює розроблення та впровадження механізмів, спрямованих на зниження екологічних ризиків. Точне землеробство відповідає цим вимогам, забезпечуючи дотримання стандартів сталого розвитку [15]. Зрештою, зростає усвідомлення соціальним суспільством екологічних проблем і це створює попит на більш екологічно чисте та стає сільське господарство.

А отже, інноваційні технології управління сільськогосподарськими процесами за допомогою методів точного землеробства обумовлюють необхідність створення механізму зниження екологічних ризиків в агроєкосистемах, який охоплює напрями оптимізації використання ресурсів і зменшення негативного впливу на агроєкосистеми.

Розроблено механізм зниження екологічних ризиків в агроєкосистемах за використання технологій точного землеробства, який складається з п'яти ключових напрямів, що забезпечують зниження екологічних ризиків у сільському господарстві за використання технологій точного землеробства (рис. 1).

Перший напрям включає проведення моніторингу та діагностики екологічного та агрохімічного стану ґрунту в агроєкосистемі. Такі дослідження є ключовими під час ведення точного землеробства, оскільки дозволяють виявляти проблеми на ранніх стадіях і здійснювати адаптивне управління сільськогосподарськими практиками. За використання дронів, супутникових знімків, датчиків та IoT-технологій відбувається збір даних про стан ґрунтів, вологість, вміст поживних речовин, стан рослин, кліматичні умови та наявність шкідників [5]. На етапі аналізу проводиться обробка зібраних даних із застосуванням геоінформаційних систем (ГІС) і моделей прогнозування, які забезпечують виявлення потенційних проблем, таких як ерозія ґрунтів, нестача вологи або розповсюдження хвороб рослин.

В Україні моніторинг і діагностика стану агроєкосистем проводиться за допомогою безпілотних літальних апаратів (дронів), які використовуються для зйомки полів у реальному часі. Так, дослідники Н. Пасічник та О. Опришко [7] використовували мультиспектральну та термографічну зйомку для аналізу стану рос-

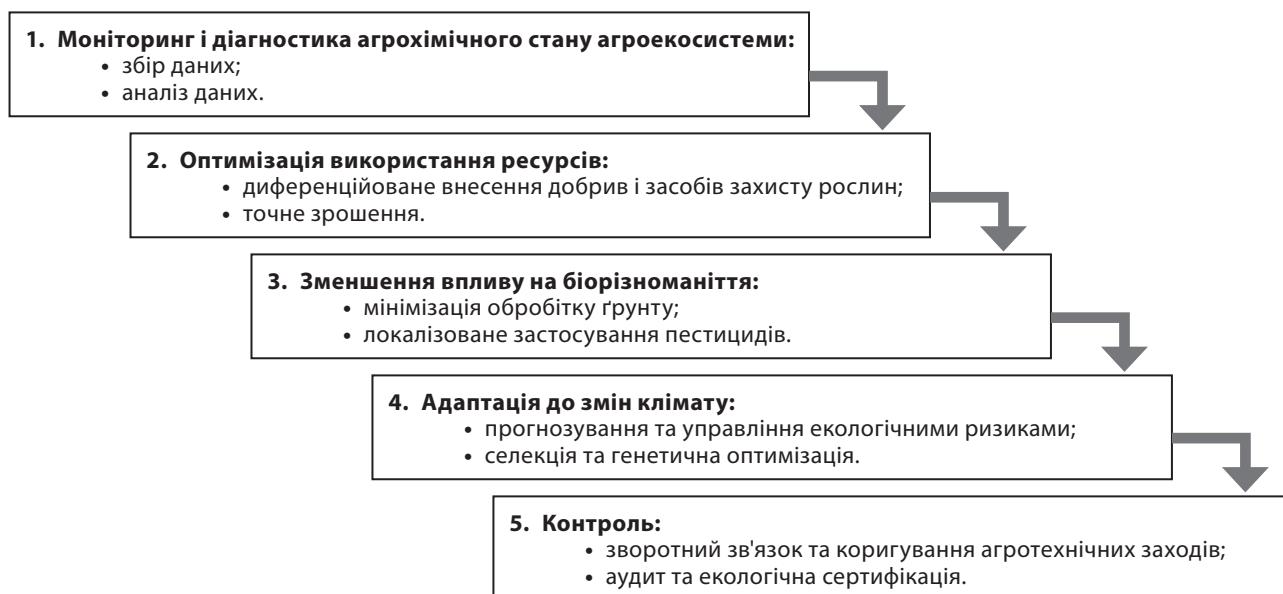


Рис. 1. Механізм зниження екологічних ризиків в агроєкосистемах за використання технологій точного землеробства

Джерело: розроблено авторами.

лин і виявлення стресових факторів, таких як нестача води, дефіцит поживних речовин або наявність хвороб. Їхні дослідження показали, що такий підхід дозволяє значно скоротити час реакції на проблеми й забезпечує своєчасне внесення коригуючих заходів, що приводить до підвищення врожайності та зниження витрат на виробництво.

Другий напрям окреслює оптимізацію використання ресурсів, за якої проводиться диференційоване внесення добрив і засобів захисту рослин, проєктується точне зрошення. Використання систем для точного визначення потреб рослин у добривах і засобах захисту з урахуванням просторової варіативності в полі зменшує надлишкове використання хімічних речовин, запобігає забрудненню ґрунтів і водних ресурсів. Упровадження систем крапельного та підповерхневого зрошення дозволяє подавати воду безпосередньо до кореневої зони рослин у потрібних обсягах, мінімізуючи втрати води через випаровування та інфільтрацію, що знижує ризики деградації ґрунтів [16]. Так, О. Нгуєвуч та ін. [6], зосередили свої дослідження на використанні сенсорних мереж для моніторингу вологісного режиму ґрунту за допомогою системи бездротових датчиків для вимірювання вологості ґрунту на різних глибинах у режимі реального часу. Вони встановили, що застосування точного зрошення на основі даних із датчиків дозволяє знизити витрати води на 20–30%, що також сприяє зменшенню ризиків деградації ґрунтів.

Точне дозування добрив і пестицидів допомагає поліпшити якість ґрунту та його структуру, сприяє утриманню в ньому органічної речовини, запобігає ерозії, підвищує його родючість. Водночас завдяки сенсорам та автоматизованим системам поливу покращуються водоутримуючі властивості ґрунту і знижуються ризики виснаження водних ресурсів, на 30% зменшуються витрати на водопостачання за збереження врожайності [17].

Проаналізовані наукові досягнення вчених світу підтверджують ефективність точного землеробства в зниженні екологічних ризиків в агроєкосистемах в умовах використання агрохімікатів в агротехнологіях сільського господарства. Так, дослідниками I. Bhakta та ін. [4], на основі багаторічних моніторингових супутникових знімків і даних ГІС-технологій щодо оцінки ризиків ерозії ґрунтів та їх родючості, встановлено, що точне управління агротехнічними заходами в землекористуванні забезпечило зменшення ерозії та деградації ґрунтів до 40%. Дослідження вчених Balasundram та ін. [2] показали, що застосування сенсорних мереж для моніторингу рівня поживних речовин у ґрунтах у різних агрокліматичних умовах дозволило ефективно коригувати агротехнічні заходи та оптимізувати внесення добрив, що знизило витрати на добрива до 25% та одночасно підвищило врожайність на 10–15%. Водночас зменшилися викиди нітратів у водні системи.

Одним із важливих досягнень точного землеробства в Україні є зменшення витрат

на агрохімікати, що одночасно суттєво знижує ризики забруднення довкілля. За твердженням Н. Пасічник та О. Опришко [7], диференційоване внесення добрив та отрутохімкатів забезпечує зниження їх використання на 15–20% та одночасно зменшує ризики забруднення ґрунтів і водних ресурсів важкими металами, пестицидами без шкоди для врожайності. Використання спеціалізованих сенсорів для моніторингу стану рослин і ґрунту допомагає точно визначити потреби у внесенні мінеральних добрив, що сприяє зменшенню нітратного забруднення агроєкосистем.

Технології точного землеробства особливо важливі в критичні періоди засухи, оскільки вони в таких умовах забезпечують покращення водоутримуючих властивостей ґрунту та відповідно його якості. Зокрема, завдяки точному внесенню органічних добрив і компостів в агрогосподарствах України, де застосовували зазначені агротехнології, вдалося зменшити ерозію ґрунтів на 30% та підвищити їх родючість. А використання системи крапельного поливу з автоматичним регулюванням забезпечило зниження водоспоживання на 30–40% зі збереженням врожайності, що особливо актуально в умовах змін клімату та зростання водних дефіцитів [18].

Третім напрямом зниження екологічних ризиків є зменшення впливу на біорізноманіття за рахунок мінімізації обробітку ґрунту та локалізованого застосування пестицидів. Мінімізація обробітку ґрунту досягається впровадженням методів нульового або мінімального обробітку ґрунту, що зберігає його структуру, сприяє збереженню ґрунтової біоти та запобігає ерозії. Локалізоване застосування пестицидів, якому передують використання датчиків та програмного забезпечення для точного виявлення зон, де необхідно застосовувати пестициди, дозволяє мінімізувати їх використання та знижувати негативний вплив на корисних комах і біорізноманіття.

Результати, отримані науковцями Великої Британії та Німеччини S. Higgins та ін. [19], засвідчили зменшення витрати пестицидів на 20% та зниження їхнього впливу на нецільові організми завдяки точному землеробству. Водночас О. Вишневська та Ю. Гаркуша [20] довели, що оптимізація використання агрохімкатів за точного внесення добрив і зменшення їх надмірного використання сприяла зменшенню викидів парникових газів діоксиду азоту та метану на 15–20%, а точне управління викидами аміаку та інших забруднювальних речовин — зменшенню їх впливу на навколишнє природне середовище. Отже, точне управління дозуванням агрохімкатів, поливу органічними відходами

сприяє зниженню екологічних ризиків в агроєкосистемах.

Четвертий напрям характеризує здатність агроєкосистем до адаптації до змін клімату, оскільки вони впливають на продуктивність агроєкосистем, стабільність врожаю та здоров'я рослин. Точне землеробство, завдяки своїм технологіям та підходам, надає ефективні інструменти для адаптації агроєкосистем до кліматичних змін. У цьому контексті важливу роль відіграють прогнозування та управлінні ризиками, а також селекція та генетична оптимізація культур. Вектор адаптації агроєкосистем спрямовано на прогнозування кліматичних умов та екстремальних погодних явищ й управління екологічними ризиками. Для цього використовуються кліматичні моделі та системи раннього попередження для передбачення екстремальних погодних явищ і планування агротехнічних заходів, що дозволяє зменшити негативний вплив посух, повеней, спеки або заморозків. Наприклад, китайські вчені A. Lakhari з колегами [16] довели, що в умовах загрози посухи система прогнозування може заздалегідь попередити фермерів про необхідність коригування поливальних стратегій або зміни графіку посівів, щоб забезпечити оптимальні умови для росту рослин. Такі підходи зменшують вплив стресових умов на рослини, підвищують стійкість агроєкосистем до кліматичних змін і забезпечують стабільність урожаю навіть у посушливих умовах за зміни клімату.

Використання сенсорів вологості ґрунту, супутникових даних і прогнозів погоди дозволяє створювати високотехнологічні іригаційні системи, які автоматично регулюють подачу води залежно від потреб рослин. Це мінімізує втрати води та забезпечує оптимальні умови для росту культур. Методи крапельного зрошення та мікроіригації забезпечують точне подання води безпосередньо до кореневої зони рослин, що зменшує випаровування та стоки, а також підвищує ефективність використання води. У поєднанні з точним землеробством крапельне зрошення може бути налаштоване на основі реальних потреб рослин, визначених завдяки моніторингу [17].

Управління ґрунтовими ресурсами в умовах точного землеробства спрямоване на оптимізацію використання ґрунту та підтримання його родючості шляхом точного аналізу та управління. Моніторинг стану ґрунту, за використання сенсорів, супутникових даних і дронів, дозволяє регулярно оцінювати основні його показники (вологість, структуру ґрунту, вміст поживних речовин), що допомагає виявляти проблеми на ранніх стадіях і вчасно їх усувати [11].

На основі аналізу ґрунтових даних проводиться зонування полів і розроблення карт для точного диференційованого внесення добрив і засобів захисту рослин. Це знижує надмірне використання хімікатів, мінімізуючи їхній вплив на навколишнє середовище. Збереження ґрунтової структури забезпечують застосовані фермерами методи обробітку, які мінімізують ерозію, ущільнення ґрунту та втрати органічної речовини. Визначення оптимальних умов за точного землеробства сприяє у вирощуванні покровних культур, які збагачують ґрунт і захищають його від деградації [19]. Загалом, зазначені підходи дозволяють забезпечити стале використання ґрунтових ресурсів, підвищити врожайність і зменшити негативний вплив на екосистеми.

Ще один не менш важливий вектор у межах адаптації до зміни клімату спрямовано на селекцію та генетичну оптимізацію за впровадження стійких до стресових умов сортів культур, які краще адаптовані до специфічних умов вирощування, таких як посуха, підвищені температури або підвищена солоність ґрунтів. Завдяки точному моніторингу та аналізу даних про кліматичні умови, ґрунти та потреби рослин можна створювати нові адаптовані сорти з покращеними характеристиками, ефективніше використовувати ресурси й підвищувати врожайність [21].

Зрештою, завершальним, *н'ятим*, напрямом у механізмі зниження екологічних ризиків в агроєкосистемах є контроль та коригування агротехнічних заходів точного землеробства, які дозволяють оперативно реагувати на зміни в стані агроєкосистем і вносити корективи до планів посіву, зрошення, внесення добрив або обробки від шкідників. Автоматизоване коригування агротехнічних заходів забезпечує реагування системи автоматичного зрошення на зміну рівня вологості ґрунту, а дрони з розпилувачами можуть точно обробляти тільки ті ділянки поля, де це необхідно. Це забезпечує

оптимальне використання ресурсів і зменшення екологічного навантаження. Аудит технологічних процесів в умовах точного землеробства включає: оцінку впливу аграрних практик на навколишнє середовище, зокрема, на якість ґрунтів, водних ресурсів і біорізноманіття; оцінку ефективності та відповідності агротехнічних заходів екологічним стандартам та економічним показникам [20]. Екологічна сертифікація підтверджує, що виробничі процеси відповідають міжнародним стандартам, таким як ISO 14001, або стандартам органічного виробництва [22]. Це дозволяє визначити, наскільки використані методи вирощування відповідають принципам сталого розвитку та забезпечують мінімізацію екологічних ризиків.

ВИСНОВКИ

Механізм зниження екологічних ризиків в агроєкосистемах обумовлює порядок управління сільськогосподарськими процесами за допомогою використання інноваційних технологій точного землеробства. Механізм охоплює напрями оптимізації використання ресурсів, зменшення негативного впливу на довкілля та підвищення стійкості агроєкосистем до змін клімату. Упровадження точного землеробства суттєво зменшує екологічні ризики, пов'язані з традиційними методами ведення сільського господарства. Моніторинг і діагностика стану агроєкосистем у рамках точного землеробства дозволяють значно підвищити ефективність використання ресурсів, зменшити негативний вплив на навколишнє природне середовище і підвищити стійкість агровиробництва. Оптимізація використання агрохімікатів, води та інших ресурсів завдяки сучасним технологіям сприяє збереженню природних ресурсів та покращенню екологічної стійкості агроєкосистем. Це робить точне землеробство важливим інструментом у перспективі використання новітніх прогресивних технологій для забезпечення сталого розвитку аграрного сектору.

ЛІТЕРАТУРА

1. Lesk C., Rowhani P., Ramankutty N. Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*. 2016. Vol. 529 (7584). P. 84–87. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature16467>.
2. Balasundram S.K., Shamshiri R.R., Sridhara S., Rizan N. The role of digital agriculture in mitigating climate change and ensuring food security: An overview. *Sustainability*. 2023. Vol. 15 (6). 5325. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15065325>.
3. FAO. Status of the World's Soil Resources (SWSR) — Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2015. URL: <http://www.fao.org/3/i5199e/I5199E.pdf> (accessed: 21.08.2024).
4. Bhakta I., Phadikar S., Majumder K. State of the art technologies in precision agriculture: a systematic review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2019. Vol. 99 (11). P. 4878–4888. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.9693>.
5. Méndez-Vázquez L.J., Lira-Noriega A., Lasa-Covarrubias R., Cerdeira-Estrada S. Delineation of site-specific management zones for pest control purposes: Exploring precision agriculture and species distribution modeling approaches. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. Vol. 167. 105101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105101>.

6. Hrynevych O., Blanco Canto M., Jiménez García M. Tendencies of precision agriculture in Ukraine: Disruptive smart farming tools as cooperation drivers. *Agriculture*. 2022. Vol. 12 (5). 698. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12050698>.
7. Пасічник Н., Опришко О. Методичні підходи щодо ідентифікації рослин на знімках високого розрізнення за мультиспектрального моніторингу за допомогою БПЛА. *Plant & Soil Science*. 2021. Vol. 12. Issue 2. P. 47. DOI: <https://doi.org/10.31548/agr2021.02.047>.
8. Lishchuk A., Parfenyuk A., Furdychko O., Boroday V., Beznosko I., Drebot O., Karachinska N. Ecotoxicological hazard of pesticide use in traditional agricultural technologies. *Journal of Ecological Engineering*. 2024. Vol. 25 (2). P. 274–289. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/177275>.
9. Lishchuk A., Parfenyuk A., Horodyska I., Boroday V., Ternovyi Y., Tymoshenko L. Environmental Risks of the Pesticide Use in Agroecosystems and their Management. *Journal of Ecological Engineering*. 2023. Vol. 24 (3). P. 199–212. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/158537>.
10. Ліщук А.М., Парфенюк А.І., Городиська І.М., Бородай В.В., Драга М.В. Основні важелі управління екологічними ризиками в агроєнозах. *Агроєкологічний журнал*. 2022. № 2. С. 74–85. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2022.263320>.
11. Basso B., Antle J. Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. *Nature Sustainability*. 2020. Vol. 3 (4). P. 254–256. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0510-0>.
12. IPCC Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
13. Karunathilake E.M.B.M., Le A.T., Heo S., Chung Y.S., Mansoor S. The path to smart farming: Innovations and opportunities in precision agriculture. *Agriculture*. 2023. Vol. 13 (8). 1593. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13081593>.
14. Zaman Q.U. Precision agriculture technology: A pathway toward sustainable agriculture. Chapter 1. In: *Precision Agriculture Academic Press*. 2023. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18953-1.00013-1>.
15. European Commission Farm to Fork Strategy. 2020. URL: https://ec.europa.eu/food/farm2fork_en (accessed: 22.08.2024).
16. Lakhari I.A., Yan H., Zhang C., Wang G. et al. A Review of Precision Irrigation Water-Saving Technology under Changing Climate for Enhancing Water Use Efficiency, Crop Yield, and Environmental Footprints. *Agriculture*. 2024. Vol. 14 (7). 1141. DOI: [10.3390/agriculture14071141](https://doi.org/10.3390/agriculture14071141)
17. Bwambale E., Abagale F.K., Anornu G.K. Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review. *Agricultural Water Management*. 2022. Vol. 260. 107324. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107324>
18. Ласло О.О. Впровадження технологій точного землеробства в Україні. *Вісник ПДАА*. 2011. № 1. С. 49–50. URL: <https://dspace.pdau.edu.ua/server/api/core/bitstreams/b2607ebe-1dc1-4b82-9e48-22b71d72cacd/content> (дата звернення: 21.08.2024).
19. Higgins S., Schellberg J., Bailey J. S. Improving productivity and increasing the efficiency of soil nutrient management on grassland farms in the UK and Ireland using precision agriculture technology. *European Journal of Agronomy*. 2019. Vol. 106. P. 67–74. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.04.001>
20. Вишневіська О.М., Гаркуша Ю.В. Інформаційні технології землеробства у концепції сталого розвитку аграрного сектора. *Інвестиції: практика та досвід*. 2013. № 19. С. 32–36. URL: http://www.investplan.com.ua/pdf/19_2013/9.pdf (дата звернення: 21.08.2024).
21. Baylis A. Advances in precision farming technologies for crop protection. *Outlooks on Pest Management*. 2017. Vol. 28 (4). P. 158–161. DOI: https://doi.org/10.1564/v28_aug_04
22. Гарафонова О., Маргасова В. Перспективи впровадження інноваційних технологій розвитку агропромислового комплексу України. *Socio-economic relations in the digital society*. 2022. Vol. 3 (45). P. 19–28. DOI: <https://doi.org/10.55643/ser.3.45.2022.475>

INNOVATIONS OF PRECISION AGRICULTURE IN REDUCING ENVIRONMENTAL RISKS IN AGROECOSYSTEMS OF UKRAINE

Lishchuk A.

Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher
Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS (Kyiv, Ukraine)
e-mail: lishchuk.alla.n@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8339-9365>

Parfeniuk A.

Doctor of Biological Sciences, Professor
Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS (Kyiv, Ukraine)
e-mail: vereskpar@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0169-4262>

Karachynska N.

Candidate of Biological Sciences, Researcher
Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS (Kyiv, Ukraine)
e-mail: karachinskan051177@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6571-8430>

Beznosko I.

Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher
Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS (Kyiv, Ukraine)
e-mail: beznoskoirina@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2217-5165>

The article analyzes the role of an innovative method of management — precision agriculture, in reducing the ecological burden on agroecosystems of Ukraine and in optimizing the use of natural resources. The high potential of precision agriculture for increasing the efficiency of agricultural production and ensuring the sustainable development of agroecosystems is shown. The global best practices of using innovative technologies of precision agriculture, which proved their effectiveness, were analyzed. The need and relevance of developing a mechanism for reducing environmental risks in agroecosystems of Ukraine using precision farming technologies was determined. A mechanism for reducing environmental risks in agroecosystems is developed, which outlines the management of agricultural processes using innovative technologies as a tool for optimizing resource use, reducing negative environmental impacts, and increasing the resilience of agroecosystems to climate change. It is noted that the implementation of precision agriculture technologies significantly reduces the environmental risks associated with traditional farming methods. Monitoring and diagnostics of agroecosystems within the framework of precision agriculture improve resource efficiency, reduce the negative impact on the natural environment, and enhance the sustainability of agricultural production. The optimization of agrochemicals, water, and other resources through modern technologies contributes to the conservation of natural resources and the improvement of agroecosystems ecological stability.

Keywords: agriculture, farming, agroecosystem, environmental risk minimization, climate change, environmental safety.

REFERENCE

1. Lesk, C., Rowhani, P., & Ramankutty, N. (2016). Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, 529 (7584), 84–87. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature16467> [in English].
2. Balasundram, S.K., Shamshiri, R.R., Sridhara, S., & Rizan, N. (2023). The role of digital agriculture in mitigating climate change and ensuring food security: An overview. *Sustainability*, 15 (6), 5325. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15065325> [in English].
3. FAO (2015). Status of the World's Soil Resources (SWSR) — Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations. URL: <http://www.fao.org/3/i5199e/I5199E.pdf> [in English].
4. Bhakta, I., Phadikar, S., & Majumder, K. (2019). State of the art technologies in precision agriculture: a systematic review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99 (11), 4878–4888. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.9693> [in English].
5. Méndez-Vázquez, L.J., Lira-Noriega, A., Lasa-Covarrubias, R., & Cerdeira-Estrada, S. (2019). Delineation of site-specific management zones for pest control purposes: Exploring precision agriculture and species distribution modeling approaches. *Computers and Electronics in Agriculture*, 167, 105101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105101> [in English].
6. Hrynevych, O., Blanco Canto, M., & Jiménez García, M. (2022). Tendencies of precision agriculture in Ukraine: Disruptive smart farming tools as cooperation drivers. *Agriculture*, 12 (5), 698. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12050698> [in English].
7. Pasichnyk, N., Opryshko, O. (2021). Metodichni pidkhody shchodo identyfikatsii roslyn na znimkakh vysokoho rozrznennia za multispektralnoho monitorynhu za dopomohoiu BPLA [Methodical approaches to the identification of plants on high-resolution images under multispectral monitoring using a UAV]. *Plant & Soil Science*, 12 (2), 47. DOI: <https://doi.org/10.31548/agr2021.02.047> [in Ukrainian].
8. Lishchuk, A., Parfenyuk, A., Furdychko, O., Boroday, V., Beznosko, I., Drebot, O., & Karachinska, N. (2024). Ecotoxicological hazard of pesticide use in traditional agricultural technologies. *Journal of Ecological Engineering*, 25 (2), 274–289. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/177275> [in English].
9. Lishchuk, A., Parfenyuk, A., Horodyska, I., Boroday, V., Ternovyi, Y., & Tymoshenko, L. (2023). Environmental Risks of the Pesticide Use in Agroecosystems and their Management. *Journal of Ecological Engineering*, 24 (3), 199–212. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/158537> [in English].
10. Lishchuk, A.M., Parfenyuk, A.I., Horodyska, I.M., Borodai, V.V., & Draga, M.V. (2022). Osnovni vazheli upravlinnia ekolohichnyimi ryzykamy v ahrotsenozakh [The main levers of environmental risk management in agroecosystems]. *Ahroekolohichnyi zhurnal — Agroecological journal*, 2, 74–85. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2022.263320> [in Ukrainian].
11. Basso, B., & Antle, J. (2020). Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. *Nature Sustainability*, 3 (4), 254–256. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0510-0> [in English].
12. IPCC (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157896> [in English].
13. Karunathilake, E.M.B.M., Le, A.T., Heo, S., Chung, Y.S., & Mansoor, S. (2023). The path to smart farming: Innovations and opportunities in precision agriculture. *Agriculture*, 13 (8), 1593. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13081593> [in English].

14. Zaman, Q.U. (2023). Precision agriculture technology: A pathway toward sustainable agriculture. Chapter 1. In: *Precision Agriculture Academic Press*. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18953-1.00013-1>
15. European Commission (2020). Farm to Fork Strategy. URL: https://ec.europa.eu/food/farm2fork_en [in English].
16. Lakhari, I.A., Yan, H., Zhang, C., Wang, G. et al. (2024). A Review of Precision Irrigation Water-Saving Technology under Changing Climate for Enhancing Water Use Efficiency, Crop Yield, and Environmental Footprints. *Agriculture*, 14 (7), 1141. DOI: 10.3390/agriculture14071141 [in English].
17. Bwambale, E., Abagale, F.K., & Anornu, G.K. (2022). Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review. *Agricultural Water Management*, 260, 107324. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107324> [in English].
18. Laslo, O.O. (2011). Vprovadzhennia tekhnolohii tochnoho zemlerobstva v Ukraini [Implementation of precision farming technologies in Ukraine]. *Visnyk Poltavskoi derzhavnoi ahrarnoi akademii — Bulletin of the Poltava State Agrarian Academy*, 1, 49–51. URL: <https://dspace.pdau.edu.ua/server/api/core/bitstreams/b2607ebe-1dc1-4b82-9e48-22b71d72caed/content> [in Ukrainian].
19. Higgins, S., Schellberg, J., & Bailey, J.S. (2019). Improving productivity and increasing the efficiency of soil nutrient management on grassland farms in the UK and Ireland using precision agriculture technology. *European Journal of Agronomy*, 106, 67–74. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.04.001> [in English].
20. Vyshnevskaya, O.M., & Harkusha, Yu.V. (2013). Informatsiini tekhnolohii zemlerobstva u kontseptsii staloho rozvytku ahrarnoho sektora [Information technologies of agriculture in the concept of sustainable development of the agricultural sector]. *Investytsii: praktyka ta dosvid — Investments: Practice and Experience*, 19, 32–36. URL: http://www.investplan.com.ua/pdf/19_2013/9.pdf [in Ukrainian].
21. Baylis, A. (2017). Advances in precision farming technologies for crop protection. *Outlooks on Pest Management*, 28 (4), 158–161. DOI: https://doi.org/10.1564/v28_aug_04 [in English].
22. Harafonova, O., & Marhasova, V. (2022). Perspektyvy vprovadzhennya innovatsiynykh tekhnolohiy rozvytku ahropromysloвого комплексу Ukrainy [Prospects for the introduction of innovative technologies for the development of the agro-industrial complex of Ukraine]. *Socio-economic relations in the digital society*, 3 (45), 19–28. DOI: <https://doi.org/10.55643/ser.3.45.2022.475> [in Ukrainian].

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Ліщук Алла Миколаївна, кандидат сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник лабораторії біоконтролю агроєкосистем і органічного виробництва відділу агробіоресурсів та екологічно безпечних технологій, Інститут агроєкології і природокористування НААН (вул. Метрологічна, 12, м. Київ, Україна, 03143; e-mail: lishchuk.alla.n@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8339-9365>)

Парфенюк Алла Іванівна, доктор біологічних наук, професор, завідувач відділу агробіоресурсів та екологічно безпечних технологій, Інститут агроєкології і природокористування НААН (вул. Метрологічна, 12, м. Київ, Україна, 03143; e-mail: vereskpar@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0169-4262>)

Карачинська Надія Василівна, кандидат біологічних наук, науковий співробітник лабораторії біоконтролю агроєкосистем і органічного виробництва відділу агробіоресурсів та екологічно безпечних технологій, Інститут агроєкології і природокористування НААН (вул. Метрологічна, 12, м. Київ, Україна, 03143; e-mail: karachinskan051177@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6571-8430>)

Безноско Ірина Володимирівна, кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник лабораторії біоконтролю агроєкосистем і органічного виробництва відділу агробіоресурсів та екологічно безпечних технологій, Інститут агроєкології і природокористування НААН (вул. Метрологічна, 12, м. Київ, Україна, 03143; e-mail: karachinskan051177@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6571-8430>)