



Безпілотні літальні апарати в точному землеробстві

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

КИЇВ

2026

*Рекомендовано до видання рішенням вченої ради
Національного університету біоресурсів і природокористування України
(Протокол № 13 від 21.05.2026 року)*

Рецензенти:

Сінченко В. М., доктор сільськогосподарських наук, професор, член-кореспондент НААН України;

Лукашов Д. В., доктор біологічних наук, професор, директор ННЦ «Інститут біології та медицини» Київського національного університету імені Тараса Шевченка;

Каленська С. М., доктор сільськогосподарських наук, професор, академік НААН України.

Б39 Безпілотні літальні апарати в точному землеробстві: навчальний посібник / М. Косолап, М. Биков, А. Данкевич, С. Танчик, В. Коваленко, В. Оверченко, П. Горячев, В. Воронцов, М. Байдюк, О. Приходько, В. Гуртовенко, А. Векленко – Київ: Національний університет біоресурсів і природокористування України, 2026. – 172 с.

ISBN 978-617-8928-35-3

Навчальний посібник підготовлено як частина дисципліни «Точне землеробство», що висвітлює сучасні підходи до використання безпілотних систем в аграрному виробництві. У виданні розкрито технічні, технологічні й економічні аспекти застосування безпілотних літальних апаратів у точному землеробстві, що дає можливість здобувачам освіти й фахівцям опанувати основи їх ефективного використання у професійній діяльності.

У посібнику подано структурований теоретичний матеріал щодо класифікації, технічної будови, основ аеродинаміки, налаштування, програмного забезпечення та програмної діагностики безпілотних систем. Видання містить приклади з практики, інструкції та алгоритми дій і буде корисним для здобувачів вищої освіти, інженерів, агрономів і технічних спеціалістів, які працюють у сфері впровадження інноваційних технологій у сільському господарстві.

Посібник буде корисний студентам, аспірантам та викладачам закладів вищої освіти.

УДК 629.7:631.51-021.416

При підготовці навчального посібника був використаний штучний інтелект, ChatGPT від OpenAI як допоміжний інструмент для попереднього збору інформації, формування структури й мовного редагування матеріалів. Верифікація фактів і наукове узагальнення здійснили автори самостійно.

ISBN 978-617-8928-35-3

© М. Косолап, М. Биков, А. Данкевич, С. Танчик,
В. Коваленко, В. Оверченко, П. Горячев,
В. Воронцов, М. Байдюк, О. Приходько,
В. Гуртовенко, А. Векленко, 2026
© НУБіП України, 2026

Авторський колектив:



Косолап Микола Павлович

кандидат с.-г. наук, доцент кафедри землеробства та гербології НУБіП України. Автор і співавтор 252 наукових праць, з них – 6 навчальних посібників.

E-mail: n.kosolap@gmail.com



Биков Микола Іванович

магістр з менеджменту організацій, Хмельницький національний університет; вчений агроном, НУБіП України; фахівець відділу практичного навчання та працевлаштування НУБіП України; дорадник з агрономії (свідоцтво №26/2017/2).

E-mail: agro.bykov@gmail.com



Данкевич Андрій Євгенійович

доктор екон. наук, професор, професор кафедри економіки та права, Національний університет харчових технологій; професор кафедри економічної безпеки, державного управління та адміністрування, Державний університет «Житомирська політехніка». E-mail: an.dankevich@gmail.com



Танчик Семен Петрович

доктор с.-г. наук, професор, академік Національної академії аграрних наук України, заслужений діяч науки і техніки, лауреат Премії Кабінету Міністрів України за розроблення інноваційних технологій, завідувач кафедри землеробства та гербології НУБіП України. Автор понад 250 наукових праць, у т. ч. 10 підручників, 17 навчальних посібників, 7 монографій, 9 авторських свідоцтв.

E-mail: tanchyksp@i.ua



Коваленко Віталій Петрович

доктор с.-г. наук, професор, декан агробіологічного факультету, НУБіП України.



Оверченко Віталій Віталійович

кандидат с.-г. наук, доцент кафедри землеробства та гербології, НУБіП України.

E-mail: v.overchenko@nubip.edu.ua



Горячев Павло Володимирович

інженер-системотехнік за спеціальністю «Комп'ютеризовані системи управління і автоматики». Інструктор: БПЛА Victory Drones, ГО «Центр підтримки аеророзвідки»; НРК, Victory Robots, БО БФ «Дігнітас»; технічний спеціаліст Школи НРК KillHouse.



Воронцов Віталій Михайлович

магістр з агрономії, НУБіП України; магістр менеджменту з дорадництва, НУБіП України; магістр з менеджменту організацій, КНЕУ ім. Вадима Гетьмана; дорадник з питань менеджменту сільськогосподарських підприємств та інвестиційного консалтингу (свід.714 від 27.02.20 р.).

E-mail: vit.vorontsov@gmail.com



Приходько Олександр Васильович

фахівець з економічної статистики; менеджер з розвитку аграрних ринків Програми з аграрного і сільського розвитку (АГРО).

E-mail: olprykhodko@chemonics.com



Байдюк Максим Іванович

кандидат с.-г. наук, фахівець з агрономії, керівник підрозділу «Продуктова агрономія і технічна підтримка ключових клієнтів Corteva Agriscience», дослідження з теми точного землеробства та насінництва.

E-mail: maksym.baydyuk@corteva.com



Гуртовенко Владислав Олександрович

доктор філософії зі спеціальності «Агрономія», асистент кафедри землеробства та гербології НУБіП України.

E-mail: vlad.gurtovenko@nubip.edu.ua



Векленко Антон Павлович

співзасновник і CEO навчального центру підготовки дистанційних пілотів БпЛА ТОВ «Глобал Дрон Академія», експерт з акредитації кваліфікаційних центрів Національного агентства кваліфікацій, сертифікований інструктор БпЛА.

E-mail: antonveklenko@gmail.com

ЗМІСТ

Вступ.	7
Розділ 1. Наукові основи застосування дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів у виробництві	10
1.1. Поняття про дистанційно керовані безпілотні літальні апарати, їх місце та роль у точному землеробстві	10
1.2. Технологічні основи застосування дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів у сучасному точному землеробстві	37
1.3. Класифікація за призначенням дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів.	48
1.4. Технічні рішення: апаратно-програмні комплекси та сенсорні системи дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів.	56
1.5. Типи сенсорів і камер. Порівняння RGB, мульти- й гіпер-спектральних камер.	62
1.6. Тепловізійний моніторинг у агрономії	68\
1.7. Законодавче забезпечення використання дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів в Україні	72
Висновок	83
Розділ 2. Використання дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів в агроскаутингу	84
2.1. Фізичні принципи дистанційного моніторингу, спектральні характеристики рослин і вегетаційні індекси.	84
2.2. Основи електромагнітного випромінювання та спектральні характеристики рослин, вегетаційні індекси: NDVI та інші індекси стану рослин	86
2.2. Обробка, візуалізація та інтерпретація даних дистанційного агроскаутингу в системі прийняття агрономічних рішень	97
2.3. Штучний інтелект і машинне навчання в обробці даних	104
Висновок	107
Розділ 3. Організаційно-економічні механізми управління ресурсами аграрного виробництва	109
3.1. Агроскаутинг в системі індикативного бюджетування як інструмент підвищення ефективності управління ресурсами підприємств	109
3.2. Економіка впровадження дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів і цифрових інструментів у практику агровиробництва	117
3.3. Сучасний менеджмент роботи агронома з використанням дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів	129

Висновок	137
Розділ 4. Практичні аспекти застосування дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів та супутників.....	139
4.1. Практичний досвід впровадження БПЛА в аграрному секторі України: експертні інтерв'ю	139
1. Микола Черняк, засновник компанії AGRONIX	140
2. Микола Гадіцький, керівник фермерського господарства «Золота Рибка»	141
3. Віталій Воронцов, голова сільськогосподарської дорадчої служби ГС «Зелені Агро Рішення»	142
4. Анатолій Безолук, керівник агронапрямку міжнародної групи компаній DroneUA	143
5. Радіон Сорока, керівник компанії «Дрон Агрофлот»	144
6. Компанія Corteva Agriscience.....	145
7. Олександр Зозуля, керівник групи технічних експертів компанії «Сингента», кандидат біологічних наук	146
4.2. Практичні кейси використання дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів в Україні	147
Використання дронів у дорадчій практиці «Зелені Агро Рішення»	147
Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у системі точного землеробства компанії Corteva Agriscience.....	151
Практика використання БПЛА у фермерському господарстві «Золота рибка».....	156
Практичний кейс роботи сервісної компанії AGRONIX:	158
Практичний кейс роботи сервісної компанії Dron.ua та перспективи цифрової агрономії.....	160
Термінологічний словник.....	163
Рекомендовані матеріали для самостійного вивчення.....	168
Список використаних джерел.....	169

ВСТУП

У традиційному землеробстві одиницею застосування будь-якого технологічного заходу є поле – незалежно від його площі. Водночас, відповідно до біологічних закономірностей, кожна земельна ділянка характеризується просторовою неоднорідністю родючості. Саме ця неоднорідність забезпечує ефективне функціонування природних процесів ґрунтоутворення та підтримання певного рівня родючості ґрунту.

Використання поля як єдиної «одиниці виміру» для оцінки показників родючості та ухвалення технологічних рішень щодо їх коригування може мати не лише позитивні, а й негативні наслідки: на окремих ділянках поля посилені або невідповідні норми коригувальних ресурсів (наприклад, мінеральних добрив) здатні завдати шкоди агроценозу. Вирівнювання родючості в межах поля було одним із завдань агрономії в традиційному землеробстві, проте через неможливість диференційованого застосування агрозаходів розв'язати його повною мірою було складно.

Сьогодні точне землеробство – це високотехнологічна система управління агровиробничими процесами, що базується на використанні даних про зміну стану сільськогосподарських угідь в просторі й часі. Вона охоплює широкий спектр цифрових інструментів, зокрема лабораторні дослідження полів, сенсорів, супутників та аерофотознімків, метеорологічні дані, а також алгоритми аналізу великих масивів інформації. Упровадження точного землеробства дає змогу підвищити ефективність використання ресурсів (води, добрив, пального), знизити виробничі витрати, підвищити якість урожаю та зменшити екологічні навантаження завдяки локалізованому (адресному) підходу до обробітку угідь і диференційованому застосуванню технологічних заходів у межах поля.

В умовах активного розвитку безпілотних технологій аграрний сектор України стикається з низкою системних обмежень щодо впровадження БПЛА в агровиробництві. Ключовим викликом є недостатній рівень спеціалізованої підготовки кадрів – як операторів БПЛА, так і фахівців з обробки й інтерпретації геопросторових даних, цифрової агрономії та агроаналітики. Дуже часто БПЛА використовують переважно як інструмент оглядового моніторингу, що суттєво обмежує їх потенціал у системах точного землеробства.

Експлуатація БПЛА в агровиробництві потребує не лише навичок пілотування, а й розуміння принципів агрономії, дистанційного зондування Землі, базового спектрального аналізу, побудови вегетаційних індексів,

калібрування сенсорів, фотограмметричної обробки знімків, інтеграції даних у ГІС-системи й застосування алгоритмів штучного інтелекту.

Обмеженням залишається і нормативно-правове забезпечення цивільного застосування БПЛА, що ускладнює їх інтеграцію в технологічні процеси господарювання, створює невизначеність щодо процедур погодження польотів, відповідальності операторів і вимог до сертифікації персоналу. Брак чітких стандартів підготовки фахівців також заважає сформувати єдині професійні компетентності у сфері цифрової агрономії.

Додатковим системним бар'єром є домінування уніфікованих підходів до застосування штучного інтелекту задля аналізу дистанційних даних агроскаутингу. Наразі інформація з БПЛА та супутникової платформи часто використовується лише на рівнях базових індексних карт або фрагментарного візуального аналізу, без масштабованих алгоритмів автоматизованого визначення стресових зон, прогнозування врожайності чи оптимізації агротехнологічних рішень. Це свідчить про потребу в підготовці фахівців з машинного навчання, здатних працювати з великими масивами аграрних даних.

Суттєвими стримувальними чинниками залишаються також недостатній технічний супровід експлуатації безпілотних систем, обмежена кількість сервісних центрів, залежність від імпортного обладнання та програмного забезпечення, а також недостатній рівень технічної й інформаційної безпеки, зокрема захисту каналів зв'язку, даних дистанційного моніторингу та систем управління.

Отже, ефективне впровадження БПЛА в агровиробництві неможливо без системного розвитку освітніх програм, що формують міждисциплінарні компетентності, створення стандартів професійної підготовки, удосконалення нормативно-правової бази, а також розбудови сервісної та безпекової інфраструктури. Саме підготовка кваліфікованих спеціалістів є базовою умовою переходу від епізодичного використання БПЛА до повноцінної інтеграції безпілотних систем у цифрові технології сучасного агровиробництва.

Посібник **«Безпілотні літальні апарати в точному землеробстві»** розроблено відповідно до освітньо-професійної програми **«Агрономія»** і спрямовано на формування у здобувачів вищої освіти системи теоретичних знань, практичних умінь і навичок застосування сучасних цифрових технологій у сільськогосподарському виробництві. Його зміст узгоджено з метою навчальної дисципліни **«Система точного землеробства»** задля забезпечення формування інтегральної компетентності. Посібник спрямований на формування фахової компетентності здатності оцінювати, інтерпретувати й синтезувати теоретичну інформацію та практичні, виробничі й дослідні дані у сфері сільськогосподарського виробництва. Його опрацювання сприяє

досягненню визначених освітньою програмою результатів навчання, формує вміння здійснювати спостереження й аналіз стану посівів і ґрунту, використовувати геопросторові дані, результати дистанційного моніторингу, картографічні матеріали й цифрові інструменти для обґрунтування технологічних рішень у системі точного землеробства.

Зокрема, дає змогу досягти:

ПРН 7 – через формування розуміння фізіологічних процесів рослин у зв'язку з їхнім відображенням у спектральних показниках і вегетаційних індексах;

ПРН 9 – через опанування методами спостереження, опису, ідентифікації та оцінювання стану агроценозів із використанням даних дистанційного моніторингу;

ПРН 11 – через здатність оперативно виявляти виробничі проблеми та ухвалювати доцільні рішення відповідно до конкретних польових умов;

ПРН 13 – через вміння проєктувати й організовувати технологічні заходи вирощування сільськогосподарської продукції на основі цифрових даних, карт завдань і диференційованого підходу до управління продукційним процесом.

Отже, посібник має компетентісно орієнтований характер і сприяє підготовці фахівців, здатних ефективно застосовувати безпілотні авіаційні системи в агрономічній практиці з урахуванням технічних, технологічних, економічних й екологічних аспектів.

Розділи навчального посібника підготували:

Вступ: Танчик С.

Розділ 1: Биков М., Косолап М., Горячев П., Байдюк М., Векленко А.

Розділ 2: Биков М., Косолап М., Оверченко В., Приходько О., Гуртовенко В.

Розділ 3: Биков М., Данкевич А., Коваленко В., Оверченко В.

Розділ 4: Биков М., Воронцов В., Косолап М.

РОЗДІЛ 1. Наукові основи застосування дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів у виробництві

У результаті опрацювання цієї теми здобувач освіти:

Набуде цілісного уявлення про будову і склад дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів, їх класифікацію за середовищем функціонування, конструктивними особливостями, призначенням і способом запуску, а також про роль БПЛА у сучасних виробничих, аграрних, моніторингових й інженерних системах;

Навчиться аналізувати технічні характеристики різних типів безпілотних літальних апаратів, порівнювати можливості літакових, мультироторних і гібридних платформ, оцінювати переваги та обмеження апаратів залежно від умов експлуатації та поставлених завдань, а також обґрунтовувати вибір БПЛА для конкретних практичних сценаріїв;

Опанує знання щодо принципів роботи апаратно-програмних комплексів дистанційного керування, типів сенсорів і камер (RGB, мультиспектральних, гіперспектральних, тепловізійних), їх функціональних можливостей і ролі у зборі, обробці й інтерпретації даних дистанційного моніторингу; отримає практичні навички початкового вибору безпіотної платформи й сенсорного обладнання відповідно до виробничих або агрономічних завдань, інтерпретації результатів дистанційного спостереження, а також підготовки до подальшого застосування БПЛА у задачах агроскаутингу, точного землеробства й екологічного моніторингу.

1.1. Поняття про дистанційно керовані безпілотні літальні апарати, їх місце і роль у точному землеробстві

Землеробство – це основна галузь сільського господарства, головним завданням якої є забезпечення населення продуктами харчування, тваринництва – кормами, а промисловості – сировиною; збереження і підвищення родючості ґрунту з ефективним захистом навколишнього середовища. В умовах глобального потепління роль і значення галузі землеробства для людства змінилися, що зумовлює необхідність переходу на нові системи землеробства.

Усвідомлення людством загрози екологічної катастрофи, зумовленої техногенним шляхом розвитку та неминучим руйнуванням навколишнього середовища аж до його повної непридатності для підтримання життя, спричинило формування концепції сталого еколого-економічного розвитку. Нині ця концепція має в межах ООН офіційний статус стратегії світового розвитку.

Стале зберігаюче землеробство – це не просто альтернативний метод у сільському господарстві. Воно засноване на іншому баченні й розумінні місця і ролі сільського господарства в екосистемі планети Земля. Стале зберігаюче землеробство – це система розвитку сільського господарства відповідно до законів природи, що розглядається сьогодні в усьому світі як єдино можливий спосіб існування та подальшого успішного розвитку галузі землеробства.

У рамках концепції сталого зберігаючого землеробства розроблено і впроваджується в життя значна кількість адаптованих до місцевих умов систем землеробства. Але, попри їх різноманітність, усі вони базуються на основних принципах сталого зберігаючого землеробства:

- 1) мінімальне механічне порушення ґрунту (Mini-till, Strip-till та No-till);
- 2) диверсифікація сівозмін – максимальне дотримання закону біологічного різноманіття як основи сталого розвитку екосистем;
- 3) постійне покриття поверхні ґрунту органічною масою у вигляді живої рослинності або її решток;
- 4) диверсифікація витрат коштів та ресурсів

Сучасні системи землеробства мають бути:

- інтенсивними;
- ґрунтозберігаючими;
- ресурсоощадними;
- кліматично орієнтованими;
- екологічними;
- економічно ефективними.

Важливим інструментом реалізації сучасних систем землеробства є точне землеробство. Воно не заперечує базових принципів ґрунтозберігаючого, ресурсоощадного й екологічно орієнтованого виробництва, а підсилює їх завдяки більш цілеспрямованому управлінню технологічними операціями. У такому розумінні точне землеробство доцільно розглядати як засіб підвищення ефективності використання ресурсів, збереження родючості ґрунту і посилення адаптивності сучасних систем землеробства до кліматичних і виробничих викликів.

Виконання вимог, що ставляться до сучасних систем землеробства, значно залежить від рівня теоретичної та практичної підготовки фахівців агрономічного спрямування, покликаних бути провідниками науково-технічного прогресу. Пропонований розділ покликаний озброїти фахівців знаннями про основні закономірності збереження і відтворення родючості ґрунту як основного засобу виробництва в землеробстві, його захисту від ерозії, напрями адаптації землеробства до умов глобального потепління за мінімального використання ресурсів. У сукупності ці завдання спрямовані на поліпшення

умов росту і розвитку сільськогосподарських рослин та підвищення продуктивності ріллі.

Сучасні поняття щодо сутності системи ведення сільського господарства зводяться до наукового обґрунтування організаційних, економічних і технологічних принципів побудови й заходів управління сільськогосподарським виробництвом із головним завданням задоволення потреб суспільства в продуктах харчування та промисловості в сировині. Система землеробства є основною складовою частиною системи ведення сільського господарства.

«Система землеробства» – широкий за змістом і складний для розуміння термін в агрономії. Широта його змісту зумовлена тим, що це не лише агрономічне, а й економічне поняття, сьогодні пов'язується з екологічними й соціальними чинниками. Термін складний для розуміння і вивчення ще й тому, що характеризує агроєкосистему на різних рівнях її функціонування – господарство, регіон, країна. Від зародження наукового землеробства над трактуванням, змістом, складом і розумінням терміна «система землеробства» працювало та продовжує працювати багато вчених. Можна вважати, що історія терміна відбиває історію розвитку наукового землеробства. Сьогодні, залежно від масштабу застосування, термін «система землеробства» описує як теоретичну основу наукового землеробства, так і різні варіанти практичного ведення землеробства в певних ґрунтово-кліматичних умовах. Наприклад, такі загальні назви, як самопоновлювальне землеробство, стає землеробство, консервативне землеробство, зберігаюче землеробство тощо, більше відбивають теоретичне бачення подальшого шляху розвитку землеробства, а назви кліматично орієнтована система землеробства, карбонове землеробство, ґрунтозахисне землеробство, ресурсощадне землеробство – спрямованість системи землеробства на досягнення певної мети або соціальної вимоги суспільства. На практиці для досягнення поставленої мети або дотримання певних вимог така система землеробства отримує конкретну назву за основним провідним елементом – наприклад, травопільна система землеробства, система землеробства No-till, органічна система землеробства, точне землеробство тощо.

Система землеробства складається з однакових елементів. Її окреслюють дев'ять складових елементів (підсистем), базовими з яких є система сівозмін, система удобрення, система захисту культур, система обробітку ґрунту, система насінництва, система машин. Підсистеми взаємопов'язані основною метою, і цей взаємозв'язок зумовлює їх різницю в конкретній системі землеробства. Досягнення поставленої мети передбачає цілеспрямоване управління системою, тому складові елементи системи землеробства трансформуються відповідно до поставленої мети. Відсутність єдиної класифікації і зумовлює основну проблему розуміння змісту кожної конкретної системи.

У цьому контексті точне землеробство доцільно розглядати не як окрему систему землеробства, а як підхід до організації та управління її складовими

елементами. Воно може бути інтегроване в систему сівозмін, удобрення, захисту культур, обробітку ґрунту, насінництва і машин, посилюючи узгодженість між підсистемами. Саме тому в сучасному розумінні система землеробства охоплює не лише набір агротехнічних рішень, а й рівень точності їх застосування відповідно до поставленої мети.

На сьогодні під системою землеробства розуміють комплекс взаємопов'язаних агротехнічних, меліоративних й організаційних заходів, спрямованих на ефективне використання землі та інших ресурсів, збереження і підвищення родючості ґрунту, отримання високих і стійких урожаїв сільськогосподарських культур. Це визначення, хоч і затверджене в державному стандарті термінів, уже сьогодні потребує уточнення, оскільки система землеробства, крім задоволення потреб людства в їжі та промисловості в сировині, має відповідати й іншим вимогам суспільства, які не пов'язані безпосередньо з метою та завданнями цієї виробничої галузі, але яких система землеробства має дотримуватися. Наприклад, ідеться про збереження якості навколишнього середовища. Пропонується, приміром, таке визначення: «Система землеробства – це цілісна сукупність взаємопов'язаних і цілеспрямовано взаємодіючих агробіологічних, техніко-біологічних й організаційно-економічних заходів, що здійснюються з метою ефективного використання земельних ресурсів для отримання необхідного обсягу та якості рослинницької продукції за відтворення ґрунтової родючості й збереження довкілля» (Примак І. та ін., 2013).

Нові системи землеробства базувалися і базуються передусім на нових досягненнях науки й технологічних можливостях суспільства, але всі вони беруть краще від попередників. Тож сьогодні можна сформулювати загальні вимоги до всіх сучасних систем землеробства. Вони мають характеризуватися інтенсивністю, ґрунтозберігальною та ресурсощадною спрямованістю, кліматичною орієнтованістю, екологічністю й економічною ефективністю.

Ідеальної системи землеробства, яка б максимально реалізувала всі наявні вимоги, на сьогодні не створено.

Світові тенденції та напрями розвитку систем землеробства

Виникнення і розвиток систем землеробства пов'язані з розвитком у конкретному суспільстві відповідних виробничих сил і виробничих відносин. Цей процес відбувався впродовж тривалого історичного періоду, який не зупиняється й активно продовжується в нових реаліях сьогодення. Довгий час людство розвивалося під гаслом, сформульованим біологом І. Мічурінім (1855–1935): «Ми не можемо чекати милостей від природи, взяти їх у неї – наше завдання». Сьогодні ця фраза звучить як символ споживацького ставлення до природи, зокрема й до ґрунту.

Внаслідок такого підходу Україна посіла місце лідера за розораністю сільськогосподарських угідь, що призвело до деградації ґрунтів і

спустелювання території. Наслідком цього стала втрата не тільки біологічного різноманіття, а й водних об'єктів, зокрема малих річок. За такої моделі використання ґрунтів, що базується на обробі полицевими знаряддями, збільшуються викиди в атмосферу парникових газів на 25 відсотків.

За офіційними даними, сьогодні в Україні земель, які зазнали впливу водної ерозії, – 13,3 млн га, зокрема 10,6 млн га ріллі. Вітрової ерозії щороку зазнають понад 6 млн га, а 68 тис. га повністю втратили гумусовий горизонт. Нераціональне землекористування стало чинником утворення 35–40 відсотків усіх деградованих земель і появи першої в країні реальної пустелі в Херсонській області.

За останні 20 років у середньому вміст гумусу в орному шарі зменшився на 0,22 відсотка (в абсолютних величинах – з 3,36 до 3,14 відсотка). Однією з основних причин агрофізичної деградації наших чорноземів є полицевий обробіток ґрунту. Погіршення якості ґрунтів – це глобальна світова проблема. Вона турбує не тільки вчених й аграріїв, а й усе світове співтовариство. Аграрний сектор розвинутих країн світу рухається в напрямі освоєння ґрунтозберігаючих енергоощадних систем землеробства.

Затримка з упровадженням ґрунтозберігаючих систем землеробства в Україні призведе до катастрофи внаслідок глобальної деградації ґрунтів. Енергоощадні ґрунтозберігаючі системи землеробства науково ще недостатньо вивчені, тож більшість сільгосптоваровиробників нашої країни до кінця не розуміють їх необхідності й економічної ефективності. Сьогодні Україна є одним із провідних світових експортерів продукції рільництва і для збереження свого місця у світовій торгівлі мусить прискорено переходити в землеробстві на нові енергоощадні, економічно ефективні й екологічно безпечні системи ведення рільництва.

Усвідомлення людством загрози екологічного глухого кута техногенного шляху розвитку внаслідок неминучого в такому разі руйнування навколишнього середовища до повної його непридатності для підтримки життя привело до виникнення концепції «Сталого еколого-економічного розвитку», яка на сьогодні в рамках ООН має офіційний статус «Стратегії світового розвитку». Серед принципів концепції сталого розвитку найважливішим є принцип відповідальності перед майбутнім і рівності можливостей розвитку і задоволення потреб різних поколінь. Другий принцип – кожна людина має право на здорове життя в гармонії з природою, на життя в екологічно безпечному навколишньому середовищі. Ідеї сталого розвитку людства стали переважати в 1960–1970-х рр., коли низка екологічних і соціально-економічних проблем почали загрожувати життю сучасних і майбутніх поколінь. До них належить деградація навколишнього середовища як наслідок широкого використання низькоефективних технологій: забруднення продуктів харчування хімікатами, зменшення площі лісів, опустелювання, заболочування,

забруднення поверхневих і підземних вод, зменшення видового різноманіття живих організмів, захворювання, генетичні відхилення, скорочення тривалості життя, поява кислотних дощів, руйнування озонового шару, глобальне потепління клімату й інші екологічні проблеми.

В ухваленій декларації щодо навколишнього середовища і сталого розвитку (Програма дій на XXI століття) конференції ООН за участю представників урядів 179 країн, яка відбулася в червні 1992 року в Ріо-де-Жанейро, констатується, що родючість ґрунтів і продуктивність великих регіонів, котрі виробляють продовольство, падає, тоді як попит на продукти харчування, волокно і паливо зростає. Згідно з оцінками експертів, діяльність людини щорічно призводить до втрати 26 млрд т верхнього родючого шару ґрунту, що у 2,6 рази перевищує рівень природної деградації. Щорічний збиток, якого завдає ерозія полям, водотокам, інфраструктурі та здоров'ю людини, становить приблизно 44 млрд дол. США (Pimentel D. та ін., 1995). У світі щорічно деградує 6 млн га земель сільськогосподарського призначення. Стале зберігаюче землеробство – це не просто альтернативний метод у сільському господарстві. Воно засноване на іншому баченні й розумінні місця та ролі сільського господарства в екосистемі планети Земля. Стале зберігаюче землеробство – це система розвитку сільського господарства відповідно до законів природи, що розглядається сьогодні в усьому світі як єдино можливий спосіб існування і подальшого успішного розвитку галузі землеробства.

У рамках концепції сталого зберігаючого землеробства розроблено і впроваджується в життя значна кількість адаптованих до місцевих умов систем землеробства. Але, попри їх різноманітність, усі вони базуються на основних принципах сталого зберігаючого землеробства:

1) мінімальне механічне порушення ґрунту (Mini-till, Strip-till та No-till). Обмеження механічного обробітку ґрунту зумовлене тим, що науково доведено і загальновизнано: використання ґрунту шляхом інтенсивного полицевого обробітку – тупиковий шлях розвитку землеробства. Полицевий обробіток ґрунту суперечить природному процесу ґрунтоутворення, оскільки порушення, яке він завдає, перевищує здатність ґрунтів до самопоновлення, що веде до незворотної їх деградації;

2) диверсифікація сівозмін, тобто максимальне дотримання закону біологічного різноманіття як основи сталого розвитку екосистем. Основою стійкості й здатності до самопоновлення сільськогосподарських агроєкосистем є їх біорізноманіття;

3) постійне покриття поверхні ґрунту органічною масою у вигляді живої рослинності або її решток. Засобом праці в аграрній діяльності людини є ґрунт – обмежений природний ресурс. Ґрунт є живою біокосною системою, в якій рослинність є джерелом харчування ґрунтової біоти й природним засобом захисту ґрунту від ерозії;

4) диверсифікація витрат коштів і ресурсів. Ефективне ведення землеробства передбачає раціональний і збалансований розподіл фінансових, матеріальних, технічних і трудових ресурсів між окремими елементами системи. Диверсифікація витрат дає змогу зменшити залежність виробництва від ресурсних чинників, підвищити стійкість господарювання проти економічних і природних ризиків, а також забезпечити гнучкість у прийнятті управлінських рішень. Такий підхід є ефективним завдяки економічній стабільності виробництва, оптимізації витрат і підвищенню загальної ефективності системи землеробства.

Основна мета землеробства – забезпечити людство продуктами харчування в достатній кількості. Звідси висновок: будь-яка система землеробства мусить бути ґрунтозахисною і забезпечувати стійке, стабільне й ефективне виробництво продуктів харчування без порушення якості навколишнього природного середовища існування людини.

Термін *стале (зберігаюче) землеробство* є складним, оскільки його вживають, описуючи подібні, але все ж таки різні системи сільського господарства. З іншого боку, на базову концепцію сталого землеробства часто посилаються за різними термінами. Після проголошення наряду на зниження інтенсивності механічного обробітку ґрунту у світі почав поширюватися потік нових назв для подібних технологій: нульовий або безполицевий обробіток, прямий посів, мінімальний обробіток, зберігаючі технології вирощування культур, ощадна технологія або хімічний обробіток тощо.

Терміни «безполицеве землеробство» або «зберігаюче землеробство» все ще повсюдно використовують. Провідні міжнародні організації – ФАО, ВООЗ, Європейська федерація зі зберігаючого землеробства (ECAF) систематизували й звели напрацьовані технології до терміна «безполицеве землеробство», що означав би аграрну систему, спрямовану на збільшення сільськогосподарської продукції та зниження негативних впливів на навколишнє середовище.

Отже, концепція, визначена терміном «стале (зберігаюче) землеробство», передбачає досягнення прибутку, високого і сталого рівня продуктивності без заподіяння шкоди навколишньому середовищу. На сьогодні принципи концепції зберігаючого (сталого) землеробства найбільшою мірою реалізовані в системах землеробства No-till і Strip-till. У логіці цих змін точне землеробство постає як практичний механізм реалізації вимог сталого зберігаючого землеробства. Якщо світовий розвиток систем землеробства спрямований на зменшення надмірного механічного втручання, підвищення ресурсоощадності й екологічної безпечності, то точне землеробство забезпечує більш адресне та обґрунтоване виконання таких завдань у межах конкретного поля і господарства. Отже, воно закономірно поєднується з сучасними тенденціями переходу до ґрунтозахисних й економічно ефективних систем землеробства.

Розвиток систем землеробства в Україні

На сучасному етапі розвиток систем землеробства в Україні пов'язаний не лише зі зміною способів обробітку ґрунту, а й із поступовим упровадженням елементів точного землеробства. У межах наявних систем воно виконує функцію інструмента підвищення ефективності виробництва на основі більш диференційованого використання технічних, біологічних й організаційних засобів. У такому аспекті точне землеробство слід розглядати як одну з ознак сучасного етапу трансформації аграрного виробництва.

Історія розвитку систем землеробства в Україні

Україна є великою європейською державою з площею 60,4 млн га. На суходіл припадає 58 млн га, і 71 відсоток його введено в той чи інший вид господарської діяльності. Розораність земель становить 57,5 відсотка, тоді як у Франції цей показник – 48 відсотків, в Угорщині – 37, у США – 25 відсотків.

Частка ріллі в сільськогосподарських угіддях досягає близько 80 відсотків, що є найбільшою в Європі. Площа під луками на сьогодні в Україні майже втричі менша порівняно з середньоєвропейськими показниками, лісовий покрив становить 14,3 відсотка, тоді як півтора століття тому він був удвічі більшим.

Наявний археологічний, історичний та етнографічний матеріал не засвідчує достовірно точного періоду становлення найпростіших систем землеробства, якими послуговувалися землероби в давні часи на території сучасної України. Більшість істориків, що займалися вивченням цього питання, схильні вважати, що зародження землеробства на території нашої країни відбулося в пізніший період, ніж у країнах Стародавнього Сходу і півдня Азіатського материка, що пов'язано з тривалим періодом обледеніння на території нинішньої України. У Західній Європі впродовж усього XVIII століття, а в Україні у XIX столітті системи землеробства формувалися на емпіричній основі. Будь-якого наукового підґрунтя не існувало.

За останні два сторіччя в Україні були запропоновані й випробувані революційні ідеї в галузі землеробства. Наприкінці XIX – на початку XX століття Іван Овсинський, учений-агроном, розробив нову систему землеробства, в якій довів непотрібність плуга не тільки теоретично, а й уперше особистими дослідженнями на полях. Його ідеї мають велику популярність і нині. Вперше І. Овсинський презентував свої десятирічні виробничі дослідження як нову систему землеробства 27 серпня 1898 року на засіданні секції агрономії Десятого З'їзду природодослідників і лікарів, що відбувся у Києві. Він уперше в історії дав обґрунтування безплужного обробітку ґрунту, розробив струнку систему поверхневого обробітку і сівби сільськогосподарських культур смугами. І. Овсинський підійшов до ґрунту як до об'єкта, що постійно розвивається, а не як до мінерального субстрату. Система землеробства І. Овсинського передбачала якнайменше «переробляти» природу, оскільки

дослідник був глибоко переконаний, що це економічно дорого, небезпечно і хибно з соціального погляду. Розроблену І. Овсинським систему землеробства сьогодні назвали б самовідновлюваним органічним землеробством (Анікіна О. П., 2010).

У цій системі землеробства не застосовували хімічні засоби захисту, а мінеральні добрива могли використовувати лише в разі потреби коригування властивостей ґрунту. Усі проблеми захисту рослин від шкідників, хвороб і бур'янів вирішували агротехнічними заходами та правильним підбором культур у сівозміні й способом сівби. Дослідник спрямовував розвиток землеробства на біологічний шлях. Головною перевагою його системи була виняткова стійкість посівів проти посух. З роками, за постійного застосування, родючість ґрунту зростала, про що свідчило збільшення врожаїв. Агроном доводив, що за глибини обробітку 5 см у ґрунті нагромаджується конденсаційна волога – «сухий полив», що лише недавно теоретично обґрунтували вчені. Систему І. Овсинського випробовували п'ять років на Полтавській і два роки на Плотянській дослідних станціях України, але її переваги над традиційними методами обробітку ґрунту не підтвердилися. Перевіряли його метод і багато інших господарств, але бажаних результатів також не отримали. Відомий український вчений-ґрунтознавець, засновник наукової школи з ґрунтозахисного і біологічного землеробства, професор кафедри ґрунтознавства і охорони ґрунтів Національного аграрного університету (нині НУБіП) Микола Шикуча, навпаки, високо оцінив праці І. Овсинського. Біологізація землеробства вимагала високого і широкого рівня знань, яких землекористувачі того часу часто не мали.

Історія землеробства України у XX столітті тісно пов'язана з соціальними катаклізмами, які пережила країна: соціалістична революція змінила форму власності на землю і відбулася зміна систем землеробства. Довоєнна та повоєнна стратегія розвитку землеробства країни була побудована на залученні в обробіток усе нових і нових земельних угідь. Така стратегія за роки радянської влади вивела Україну на безпрецедентне перше у світі місце за рівнем розораності. До 1990-х років системи землеробства змінювалися за рішеннями керівних органів. Запроваджена повсюдно травопільна система землеробства не дала очікуваних результатів і була замінена на різні форми промислової інтенсивної системи землеробства.

Отже, сучасний стан земель в обробітку об'єктивно відбиває той шлях, який пройдено за монополії тривалого екстенсивного землеробства.

У цих умовах науковці України продовжували активно напрацьовувати нові підходи й системи землеробства. Територія України характеризується складним рельєфом і високою потенційною небезпекою прояву ерозійних процесів за високоінтенсивного ведення сільськогосподарського виробництва. Науковці вперше системно підійшли до розв'язання проблеми формування

екологічно стійких агроландшафтів, запобігання водноерозійним процесам, зарегулювання поверхневого стоку, підвищення родючості ґрунтів, поліпшення природного середовища, створення сприятливих умов для відтворення дикої флори та фауни. У результаті в Інституті землеробства у співдружності з іншими науковими установами впродовж 1975–1985 рр. була розроблена і реалізована на практиці в одному з господарств Обухівського району Київської області ґрунтозберігаюча система землеробства з контурно-меліоративною організацією території, яку було покладено в основу концепції розвитку землеробства держави на період до 2005 року. Її суть полягає в тому, що система землеробства розробляється і впроваджується в органічному взаємозв'язку з організацією території. Клітково-прямокутна організація території сівозміни реконструюється в контурно-меліоративну, за якої лінійні елементи організації території – межі полів і робочих ділянок, лісосмуги, польові дороги, наорні вали, тераси з широкою основою, вали, канави тощо – розміщуються паралельно по контуру вздовж горизонталей з урахуванням поділу земель на технологічні групи. Структура посівних площ, кількість, види й типи сівозмін визначаються не планом або держзамовленням на виробництво і продаж продукції, а ґрунтово-кліматичними умовами господарства. Упровадження комплексної програми ґрунтозахисної системи землеробства з контурно-меліоративною організацією території мало знизити змив ґрунту з 18,7 до 3,5 т/га на рік, а втрати врожаю – з 5,1 до 1,2 ц/га зернових одиниць порівняно з еродованими сільськогосподарськими угіддями. На жаль, через різні соціально-економічні причини вона не була реалізована.

У другій половині ХХ століття ідеї І. Овсинського розвивали Микола Шикуча та Федір Моргун, які впродовж 1973–1988 рр. керували великомасштабним експериментом у Полтавській області на площі близько 2 млн га. Суть експерименту полягала в адаптації ґрунтозахисного землеробства до умов Полтавської області. Ґрунтозахисні технології вирощування сільськогосподарських культур, засновані на безполицевому плоскорізному обробітку ґрунту, були спрямовані на подолання залежності сільськогосподарського виробництва від несприятливих погодних умов (Моргун Ф., 1982; Панас Р., 2008). Таку систему безполицевого обробітку ґрунту часто називали плоскорізною, позаяк основними знаряддями були різні моделі плоскорізів.

Упродовж 1980–1984 рр. ґрунтозахисне землеробство впровадили в усіх господарствах Полтавської області, що перетворило її з відсталої на передову аграрну область України. Застосування плоскорізних знарядь на 31 відсоток зменшувало витрати паливо-мастильних матеріалів, тому ґрунтозахисне землеробство позитивно впливало на зниження собівартості зерна і підвищення рентабельності виробництва. Застосування безполицевого обробітку ґрунту під озимі зернові культури виявилось навіть на 20 відсотків ефективнішим, ніж упровадження нових сортів озимої пшениці. Використання ґрунтозахисного

землеробства в Полтавській області забезпечило його стабілізацію та зробило менш залежним від несприятливих чинників: посухи, заморозків, вітрової та водної ерозії. За період упровадження ґрунтозахисного землеробства якість ґрунтів у Полтавській області зросла з 70,6 бала у 1971–1975 рр. до 85,7 бала у 1986–1990 рр., а після повернення 1996 року до полицевого обробітку рівень родючості ґрунтів знизився впродовж 2001–2005 рр. до 76,2 бала.

З набуттям у 1991 році незалежності в країні змінилася форма власності на землю та форми організації ведення сільського господарства.

Глобалізація економіки й ринкові умови сприяли швидкому поширенню в країні зарубіжних інтенсивних технологій і систем землеробства на базі нового технічного оснащення. Сьогодні у виробництві поряд із традиційною системою землеробства поширені органічне землеробство, системи No-till, Strip-till і різні варіанти мінімального безполцевого обробітку ґрунту. Крім цього, в усіх названих системах землеробства застосовуються елементи точного землеробства.

Якщо попередні етапи розвитку землеробства в Україні визначалися переважно зміною форм обробітку ґрунту, сівозмін й організації території, то сучасний етап доповнюється впровадженням елементів точного землеробства. У цьому сенсі воно є продовженням історичного процесу вдосконалення систем землеробства, але вже на основі нового технічного оснащення та вищих вимог до ефективності, екологічної збалансованості й точності управління виробництвом. Отже, точне землеробство логічно вбудовується в загальну історію переходу від екстенсивних і жорстко регламентованих моделей до більш адаптивних систем господарювання.

Розвиток точного землеробства доцільно розглядати в загальному контексті еволюції системи землеробства. У попередньому тексті показано, що землеробство історично пройшло тривалий шлях від емпірично сформованих систем до науково обґрунтованих моделей ведення господарства, в межах яких дедалі більшого значення набували організаційні, технологічні й економічні засоби управління виробництвом. Саме така логіка розвитку аграрної науки та практики створила підґрунтя для переходу до більш точного, диференційованого та цілеспрямованого управління складниками системами землеробства. Передумовою становлення точного землеробства стало ускладнення самої системи землеробства. Будь-яка система землеробства складається з взаємопов'язаних підсистем, зокрема системи сівозмін, удобрення, захисту культури, обґрунтування заробітку, насінництва і машин, а досягнення поставленої мети передбачає цілеспрямоване управління системою. У цьому контексті точне землеробство стає закономірним етапом розвитку, за якого зростає роль узгодженого керування окремими елементами виробництва.

Зі здобуттям незалежності розвиток точного землеробства пов'язаний із переходом до сучасного етапу трансформації аграрного виробництва. Після зміни форм власності на землю й реорганізації сільського господарства в країні відбулося впровадження зарубіжних інтенсивних технологій і систем землеробства на базі нового технічного оснащення. Саме в цей період, поряд із традиційною системою землеробства, органічним виробництвом, технологіями No-till, Strip-till та різними варіантами мінімального безвідвального обробітку ґрунту, почали впроваджуватися елементи точного землеробства.

Отже, еволюцію точного землеробства можна подати як результат поступового переходу від екстенсивних і переважно механістичних моделей господарювання до сучасних систем, в яких визначальними стають наукова обґрунтованість, технічна оснащеність, ресурсобезпечність і точність управління виробничими процесами. Таке розуміння узгоджується і з загальними тенденціями розвитку системи землеробства: зростанням інтенсивності, посиленням захисту ґрунтів, екологізацією та вдосконаленням технологічних підходів.

Причини зміни систем землеробства

Серед багатьох чинників, що впливають на виробничу діяльність і визначають напрями розвитку як окремого господарства, так і землеробської галузі країни загалом, особливе місце посідає розвиток систем землеробства. Тому, дедалі більшого значення набуває потреба в точнішому управлінні виробничими процесами. За зростання вимог до економічної результативності, екологічної безпечності й раціонального використання ресурсів точне землеробство стає одним із засобів узгодження технологічних рішень з конкретними умовами господарства. Тому його розвиток слід розглядати як закономірний наслідок еволюції систем землеробства.

Соціальні складники впливу на розвиток систем землеробства в Україні

Формування і використання трудових ресурсів у сільському господарстві має особливості. З розвитком продуктивних сил суспільства протягом ХХ століття постійно зменшувалася абсолютна чисельність працівників у галузі та зростав їх середній вік. Змінювалися позитивно освітній рівень, матеріальне становище і соціальні умови жителів села. Відповідно змін зазнавали й системи землеробства в бік збільшення застосування всіх чинників інтенсифікації, що допомагало зменшувати трудомісткість одиниці виробленої продукції за одночасного збільшення її загальної кількості.

Землеробство України характеризується значним просторовим розсередженням виробництва. Найкращі природні умови для життя і виробничої діяльності населення в країні склалися в лісостеповій зоні. Тут найвища густина населення і найінтенсивніша система землеробства. Найменша щільність населення спостерігається в районах з менш сприятливими ґрунтово-

кліматичними умовами для сільськогосподарських культур. Через природні чинники в таких регіонах не можна отримати продуктивність рослин, однакову з районами зі сприятливими кліматичними умовами. На ринкових засадах у таких умовах економічно ефективно землеробство можна вести лише за низьких витрат і низької трудомісткості виробленої продукції.

В умовах планової економіки система землеробства нав'язувалася виробництву керівними органами, а її ефективність оцінювалася не за економічними показниками, а за відповідністю виробленої продукції плановим показникам.

При зростанні наукоємності систем землеробства важливою є проблема підвищення якості робочої сили. За останні 100 років спостерігався позитивний тренд збільшення кількості спеціалістів в аграрному секторі, але частка спеціалістів із вищою освітою була і залишається найнижчою порівняно з іншими галузями економіки країни. На жаль, і рівень оплати праці в сільському господарстві був і сьогодні залишається також найнижчим. Загалом це зумовлює перехід господарств на нові менш трудомісткі, але більш наукомісткі й економічно ефективні системи землеробства.

Водночас запровадження нових технологій або систем землеробства, передусім у густонаселених регіонах, може загострити проблему зайнятості сільського населення внаслідок швидкого вивільнення надлишкової робочої сили, що призведе до підвищення соціальної напруженості в регіоні. Отже, до впровадження сучасних мінімальних і нульових технологій слід підходити досить виважено, враховуючи всі можливі позитивні та негативні соціальні наслідки.

У соціальному вимірі точне землеробство пов'язане з подальшим зниженням трудомісткості виробництва та підвищенням ролі кваліфікації працівників. Воно відповідає загальній тенденції переходу до менш трудомістких, але більш наукомістких систем землеробства. Водночас його впровадження потребує виваженого підходу, оскільки, як і інші сучасні технології, воно може посилювати вимоги до професійної підготовки кадрів і впливати на структуру зайнятості в сільській місцевості.

Екологічні складники впливу на розвиток систем землеробства в Україні

Екологічна незбалансованість сільськогосподарського виробництва призводить до посилення руйнівних тенденцій у використанні найціннішого багатства українського народу – землі. Прикладом того, як технічний прогрес у землеробстві може обернутися регресом, є інтенсифікація механічного обробітку ґрунту. Виявилося, що підвищення інтенсивності механічного обробітку ґрунту порушує його макроструктуру, негативно позначається на врожайності й стимулює ерозію ґрунту. Застосування потужнішої, а відповідно і важчої, техніки призводить до збільшення механічного тиску на ґрунт. Маса

самохідних зернозбиральних комбайнів у розрахунку на 1 м ширини захвату за останні 30 років зросла більш ніж у 1,5 раза.

Ущільнення ґрунту є однією з причин посилення процесів ерозії. Спостерігаємо певний парадокс: що більше обробляють ґрунт, то більше зростає проблема його переущільнення. Хімізація землеробства призводить до забруднення навколишнього середовища. Таке техногенне забруднення родючих ґрунтів негативно позначається на якості сільськогосподарської продукції. Широке застосування пестицидів породжує специфічні проблеми, пов'язані з набуттям бур'янами, шкідниками та збудниками хвороб стійкості проти препаратів.

Внаслідок цього точне землеробство набуває екологічного значення як засіб зменшення надмірного антропогенного навантаження на ґрунт. За своєю логікою воно узгоджується з вимогами ґрунтозахисту, оскільки орієнтує систему землеробства на більш обґрунтоване й адресне застосування її технологічних елементів. Саме тому точне землеробство доцільно розглядати як складник екологізації сучасного землеробства, особливо в поєднанні з мінімальними й нульовими системами обробітку ґрунту.

Дослідження В. Медведєва та інших свідчать, що ґрунтовий покрив України загалом є сприятливим для впровадження мінімальних технологій його обробітку. Була проведена класифікація ґрунтів щодо можливості застосування мінімального і нульового обробітків, визначено такі класи та обраховано їх площі: I – оптимальний; II – сприятливий; III – задовільний; IV – незадовільний; V – торфовища та водойми.

Вивчення систем землеробства науковцями України є на сьогодні абсолютно недостатнім хоча б з тих міркувань, що екологічні аспекти застосування таких технологій залишаються поки що поза їх увагою. Проте досвід виробників, а також дані обмеженої кількості наукових досліджень, проведених в Україні, свідчать про позитивний екологічний ефект щодо захисту ґрунту від ерозії та відтворення його природної родючості.

Економічні складники впливу на розвиток систем землеробства в Україні

Система землеробства може претендувати на визначену їй роль і бути впровадженою у виробництво лише у випадках її технологічної доцільності й економічної ефективності. Оцінити економічну ефективність будь-якої системи є досить проблемним завданням через складність самої системи й залежність кінцевого результату від значної кількості змінних величин.

З економічного погляду точне землеробство – це важливий засіб підвищення ефективності системи землеробства, оскільки підсилює її здатність до раціонального використання ресурсів. У межах сучасних систем господарювання такий підхід відповідає загальній тенденції до зниження витрат, підвищення керованості виробничих процесів і зростання прибутку з одиниці

площі. Тому поширення точного землеробства закономірно пов'язується з вимогою економічної доцільності сучасних систем землеробства.

Оскільки система землеробства має безпосередній вплив на продуктивність сільськогосподарських культур й опосередкований вплив на стан навколишнього середовища, при розрахунку економічної ефективності системи землеробства треба обов'язково враховувати й витрати на підтримання належного стану навколишнього середовища в межах певного регіону.

На рівні господарства економічну ефективність системи землеробства можна оцінити за рівнем прибутку, який отримують з 1 га ріллі. За даними F. Tebrügge й A. Böhrnsen (1997), переваги систем землеробства No-till і Strip-till перед традиційною в умовах Німеччини можна продемонструвати такими розрахунковими показниками:

- капіталовкладення в сільгосптехніку менші на 39 відсотків;
- потреба в потужності тракторів нижча на 75 відсотків;
- затрати праці знижуються на 80 відсотків;
- витрати пального менші на 84 відсотки.

Отже, сучасним й особливо прогнозованим на перспективу умовам – соціальним, екологічним й економічним – ведення землеробства в Україні здебільшого відповідають системи землеробства No-till і Strip-till. Для переходу на них є об'єктивні природні умови: половина площі покрита ґрунтами, на яких можна і доцільно відмовитися від механічного обробітку ґрунту або максимально його скоротити. Це допоможе зменшити дефіцит основного лімітуючого чинника в рослинництві – вологи.

Можна відзначити такі загальні тренди розвитку систем землеробства:

1) за способом й інтенсивністю механічного обробітку ґрунту прогрес розвитку систем землеробства йшов у такій послідовності: нульовий обробіток, поверхневе розпушення ґрунту без перевертання оброблюваного шару, обробіток ґрунту плугом із перевертанням скиби, безпліцевий різноглибинний обробіток без перевертання скиби, мінімальний поверхневий обробіток без перевертання скиби, нульовий обробіток із застосуванням сівалок прямої сівби;

2) відмова від механічного обробітку ґрунту зумовила корегування тренду способу відновлення родючості ґрунту. Якщо раніше абсолютна перевага належала антропогенним способам підтримання та відновлення родючості ґрунту, то в системі No-till суттєву роль відіграють природні механізми її відтворення.

3) за рівнем інтенсифікації відбувається зростання інтенсивності використання самопоновлювальних механізмів ґрунотворчого процесу з посиленням використання біологічних антропогенних засобів інтенсифікації;

4) за рівнем впливу на навколишнє середовище тренд змін сьогодні спрямований на підвищення захисту ґрунту і зменшення кількості й інтенсивності

застосування таких чинників інтенсифікації, як мінеральні добрива, засоби захисту рослин і генетично модифіковані сорти і гібриди.

Окремим сучасним трендом розвитку слід вважати посилення ролі точного землеробства в межах різних систем господарювання. Якщо раніше відмінності між системами землеробства визначалися насамперед способом обробітку ґрунту, рівнем інтенсифікації та характером впливу на довкілля, то сьогодні дедалі більшого значення набуває точність управління всіма складниками виробничого процесу. У такому розумінні точне землеробство не замінює існуючі системи, а підвищує їхню технологічну, економічну й екологічну результативність.

Сьогодні в усіх сучасних системах землеробства реалізуються такі принципи:

- захист ґрунту від деградації – усі системи землеробства мають бути ґрунтозахисними;
- екологізація, тобто формування системи землеробства, яка не завдає шкоди навколишньому середовищу, забезпечує людей і тварин біологічно повноцінними продуктами харчування, сприяє відновленню ґрунту та посиленню його екологічної функції, зокрема забезпеченню чистоти води й повітря та зменшенню негативних наслідків глобального потепління;
- біологізація – збільшення застосування біологічних засобів і максимальної реутилізації та рециркуляції всіх відходів господарства в межах господарства;
- економічна доцільність – нові системи землеробства мають бути економічно конкурентоздатними й забезпечувати задовільні рівні врожайів.

Важливість точного землеробства зумовлюється тим, що сучасна система землеробства має бути одночасно інтенсивною, ґрунтозберігаючою, ресурсощадною, кліматично орієнтованою, екологічною й економічно ефективною. За такої сукупності вимог особливого значення набуває не просто застосування окремих агротехнологічних заходів, а саме точність їх реалізації відповідно до поставленої мети. У цьому сенсі точне землеробство є не допоміжним чи випадковим елементом, а дієвим інструментом сучасного агровиробництва.

Не менш важливою є роль точного землеробства у підвищенні керованості системи землеробства. Зокрема її складові елементи взаємопов'язані між собою та трансформуються відповідно до поставленої мети. Це підвищує значення тих підходів, які дають змогу оптимізувати роботу всіх підсистем. Саме тому точне землеробство можна розглядати як важливий засіб підвищення внутрішньої цілісності й адаптивності системи землеробства та ефективності її функціонування.

Важливість точного землеробства посилюється також сучасними екологічними та виробничими викликами. Слід враховувати причини деградації, ерозійних процесів, втрати гумусу, високу розораність земель і необхідність

переходу до ґрунтозберігаючих й енергоощадних систем землеробства. За таких умов точне землеробство набуває значення як підхід, що логічно поєднується з прагненням до збереження родючості ґрунту, раціонального використання ресурсів і зменшення негативного впливу на довкілля. Крім того, важливість точного землеробства полягає в його відповідності загальним напрямкам розвитку сучасного землеробства. Сьогодні в усіх сучасних системах землеробства реалізуються принципи захисту ґрунтів від деградації, екологізації, біологізації та економічної доцільності. У такій логіці точне землеробство слід розглядати як один із дієвих механізмів практичного втілення цих принципів.

Упровадження точного землеробства є принциповим кроком насамперед тому, що сучасне аграрне виробництво потребує переходу до ефективніших систем господарювання. Глобалізація економіки й ринкові умови сприяли поширенню нових інтенсивних технологій і систем землеробства на базі нового технічного оснащення, а елементи точного землеробства застосовуються в усіх сучасних системах, поширених у виробництві. Це означає, що його впровадження є не другорядним явищем, а складником сучасного етапу розвитку землеробства.

Важливість упровадження точного землеробства особливо відчутна в умовах України, де поєднуються висока розораність земель, значне поширення ерозійних процесів, втрата якості ґрунту і потреба у впровадженні ґрунтозберігаючих технологій. За таких умов перехід до точного управління агротехнологічними процесами є логічною відповіддю на потребу забезпечення збереження родючості ґрунту й підвищення стійкості виробництва.

Не менш вагомий і економічний аспект упровадження точного землеробства. Нові системи землеробства з додатковими витратами на нові технічні засоби мають бути економічно ефективними. Розвиток землеробства загалом відбувається в напрямі зростання ресурсозабезпеченості при зниження витрат на одиницю продукції і підвищення та сталості отримання урожайності з одиниці площі. Упровадження точного землеробства в цьому контексті є закономірним і доцільним, оскільки узгоджується з вимогою більш раціонального використання основного ресурсу - ґрунту.

Точне землеробство важливо впроваджувати і внаслідок соціальних змін в аграрному секторі. Зменшення трудомісткості виробництва, зростання ролі освітнього рівня працівників і перехід до більш наукомісткої системи землеробства – це складники загального процесу модернізації аграрного виробництва, що потребує вищого рівня знань, кращої організації та сучасних форм управління.

Наукові основи

Наукові основи застосування дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів (ДК БПЛА) в агрономії формуються на базі досягнень

фізіології рослин, ґрунтознавства, агрохімії, дистанційного зондування Землі й геоінформаційних систем (ГІС). Для агронома БПЛА є інструментом оперативної діагностики стану агроценозів – штучно сформованих агроєкосистем, у яких продуктивність визначається балансом між генетичним потенціалом культури, кліматично-ґрунтовими характеристиками й умовами вирощування. Застосування БПЛА дає змогу перейти від «маршрутного», суб'єктивного огляду посівів до системного аналізу просторової мінливості поля, що є основою точного землеробства та ресурсоощадного управління.

Наукову основу ефективного використання БПЛА в агрономії також становить аналітична робота з отриманими даними, яка базується на принципах просторового аналізу і статистичного моделювання. Кожне поле характеризується гетерогенністю – неоднорідністю ґрунтового покриву, рельєфу, вологозабезпечення й агрофону. Математичний апарат обробки даних отриманих за допомогою БПЛА допомагає створювати цифрові моделі рельєфу (ЦМР), карти щільності рослин, карти забур'яненості й карти врожайності. За результатами аналізу проводиться диференційоване внесення добрив, засобів захисту рослин і регуляторів росту. В агрономічній практиці такий підхід мінімізує витрати ресурсів, зменшує екологічне навантаження та підвищує економічну ефективність виробництва.

Отже, для всіх фахівців агрономічних спеціальностей дистанційно керовані БПЛА є не лише технологічним засобом внесення різних препаратів і добрив, а також обов'язковим складником сучасної цифрової агрономії – засобом отримання об'єктивної просторової інформації стану агроєкосистеми. Їх ефективне використання базується на фундаментальних знаннях фізіології рослин, спектрального аналізу, математичного моделювання й управління агроценозами. Підготовка майбутнього агронома має поєднувати вміння інтерпретувати індексні карти, оцінювати просторову мінливість поля, формувати технічні завдання на аерозйомку й інтегрувати отримані дані в систему управління господарством. Саме такий підхід забезпечує перехід від традиційного до науково обґрунтованого, адаптивного і сталого землеробства.

БПЛА як елемент точного землеробства

Одним із ключових технічних елементів функціонування системи точного землеробства є безпілотні апарати, які *забезпечують агромоніторинг сільськогосподарських угідь (отримання оперативної інформації про стан агроєкосистеми поля)* не в середньому по полю, а по окремих його локаціях (зонах), на основі якої приймаються відповідні агротехнічні рішення.

Застосування дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів (БПЛА) дає змогу здійснювати високоточне картографування полів, моніторинг стану рослин, контроль вологості, фітосанітарної ситуації, виявляти осередки прояву ерозій, забур'яненості й зони дефіциту елементів живлення тощо. Це в

поєднанні з картою урожайності сільськогосподарських культур на конкретному полі допомагає провести комплексний аналіз і виявити причини різниці в урожайності. Для усунення виявлених причин зниження врожайності в певних зонах поля розробляють відповідні технологічні заходи або уточнюють такі їхні параметри, як норма висіву, вид і норма внесення добрив. Ці заходи можуть бути реалізовані за допомогою інших технічних засобів землеробства – сівалок, розкидачів мінеральних добрив, обприскувачів тощо.

Крім інформаційного забезпечення БПЛА слугують **засобом технічного виконання** ряду технологічних заходів – цільове внесення певного виду добрив або засобів контролю рівня присутності біологічних факторів ризику – бур'янів, шкідників і хвороб у межах поля або окремих його зон (технологічних ділянок).

Використання БПЛА дає змогу завчасно виявляти проблемні ділянки ще до появи видимих симптомів у межах усього поля, що надає можливість своєчасно застосувати корегувальні заходи управління на малій площі з високою точністю, наприклад, внесення інсектициду тощо. У результаті оптимізуються ресурсовитрати й досягається максимальний ефект від проведених обробітків, що підвищує загальну ефективність виробництва й сталість землекористування.

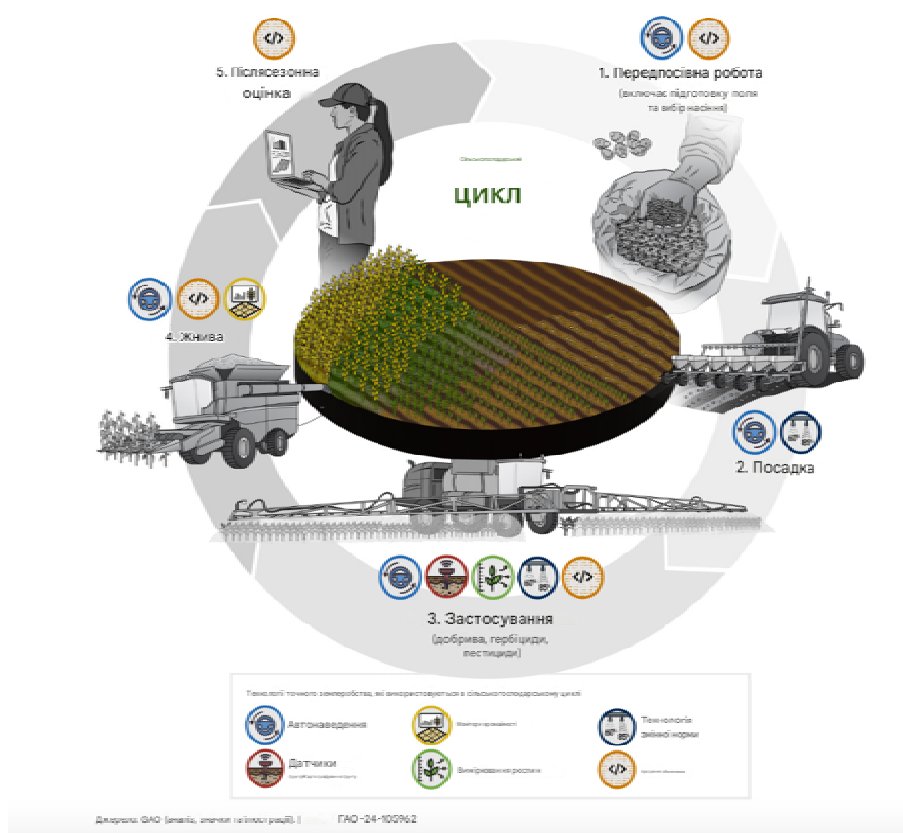


Рис 1.1. Використання елементів точного землеробства в технології вирощування сільськогосподарських культур. Джерело: [1]

Сьогодні точне землеробство охоплює практично весь сільськогосподарський цикл (рис.1.1). Елементи точного землеробства застосовуються в передпосівній підготовці ґрунту, посіві, внесення добрив і засобів захисту, жнивях та в міжсезонний період. На кожному етапі реалізуються різні засоби й технології – автопілот, датчики, змінні норми внесення, моніторинг рослин й аналітичне програмне забезпечення.

БПЛА є інструментом дистанційного агроскаутингу, в основу якого покладено закономірності відбивання рослинним покривом електромагнітного випромінювання різних спектральних діапазонів залежно від стану культури. Листкова поверхня по-різному відбиває електромагнітне випромінювання у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах залежно від фази розвитку і стану рослин. На цьому базується розрахунок вегетаційних індексів (NDVI, NDRE, MSAVI, CWSI), які є математичним вираженням встановлених залежностей між станом культури та її спектральною відбивною здатністю в різних діапазонах електромагнітного випромінювання. За цими індексами можна визначити й оцінювати інтенсивність фотосинтезу, рівень хлорофілу, біомасу і водний статус рослин.

Основні типи БПЛА у сільському господарстві та їх поширення

Упродовж останнього десятиліття спостерігається стійке зростання кількості дистанційно керованих безпілотних апаратів (БПЛА) в агросередовищі. За даними звіту DJI, до кінця 2024 року у світі використовувалося близько 400 000 сільськогосподарських БПЛА, що на 33% більше порівняно з 2023 роком і на 90% більше, ніж у 2020 році. [2]

У Європі ринок сільськогосподарських БПЛА оцінювався у 2023 році в 1,27 мільярда доларів США. За прогнозами до 2035 року він зросте до 17,64 мільярда доларів, що відповідає середньорічному темпу зростання 24,46% (рис.1.2).

Це свідчить про стабільне впровадження і поширення БПЛА у агросекторі як інструменту точного землеробства, що дозволяє підвищити ефективність агровиробництва. Найбільш стрімке зростання прогнозується після 2030 року, що може бути пов'язано з технологічним проривом і ширшим доступом до інноваційних рішень.

В таблиці 1.1. представлені основні типи безпілотників, які використовуються в сільському господарстві. **Коптери** (мультироторні) БПЛА призначені для точкового обприскування, внесення добрив і моніторингу на складних ділянках. **Літакові БПЛА** (fixed-wing) охоплюють великі площі, виконують аерофотозйомку та створюють карти рельєфу. **Гібридні БПЛА (VTOL)** поєднують маневровість коптера з тривалим польотом літака, підходять для універсальних завдань.

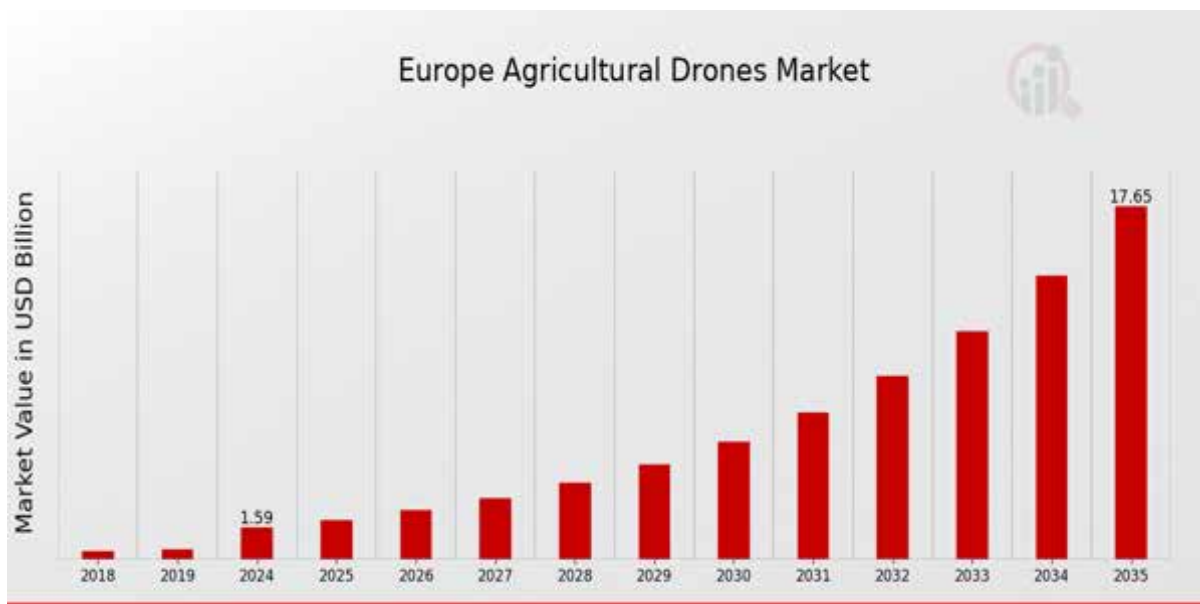


Рис. 1.2. Динаміка обсягу ринку БПЛА в Європі Джерело: [3]

Таблиця 1.1. Основні типи БПЛА у сільському господарстві

Тип БПЛА	Конструкція	Функції в агросфері
Коптери (мультироторні)	4–8 гвинтів, вертикальний зліт	Здійснення детального моніторингу посівів за допомогою RGB та мультиспектральних камер, локальне обприскування ЗЗР, точкове внесення добрив, оперативне виявлення фітосанітарних загроз, моніторинг важкодоступних ділянок і виконання завдань в умовах обмеженого простору або складного рельєфу
Літакові типи (fixed-wing)	Крила, горизонтальний політ	Масштабна аерофотозйомка великих територій, створення ортофотопланів і цифрових моделей рельєфу, виявлення зон вологозабезпечення та ерозійних процесів, побудова карт висот і ухилів, довготривале картографування з високою точністю
Гібридні (VTOL)	Поєднання коптера та літака	Універсальні завдання – моніторинг великих площ з можливістю вертикального зльоту/посадки, швидке реагування на локальні зміни, обстеження полів у складних умовах, комбінація маневровості коптера та тривалості польоту літака

Прогнозується розширення послуг від компаній, які володіють багатофункціональними автономними БПЛА. **Наприклад**, парк БПЛА компанії ZenaTech включатиме ZenaDrone 1000 та серію IQ для надання різноманітних сервісних рішень – від геодезії до інспекції ліній електропередач або миття під тиском теплиць чи сонячних батарей. Ці рішення доступні та економічно ефективні завдяки бізнес-моделі, на основі звичайної підписки або оплати за їх використання. Клієнти зможуть зручно отримувати доступ до БПЛА, щоб уникнути ручного або трудомісткого виконання завдань та досягати найкращих результатів, в таких напрямках як геодезична зйомка, різноманітні інспекції, служба безпеки та правопорядку або точне землеробство, без необхідності купувати, експлуатувати та обслуговувати самі БПЛА. [4]

Використання БПЛА як технологічний засіб в землеробстві

Дистанційно керовані безпілотні літальні апарати, можуть здійснювати такі технологічні операції в землеробстві:

Обприскування рослин засобами захисту. БПЛА-обприскувачі можуть працювати за заданим маршрутом з автоматичним розрахунком витрати робочої рідини відповідно до карти поля. Зональне обприскування здійснюється на попереднього виявлених зонах ураження хворобами або шкідниками. На основі мультиспектрального аналізу результатів моніторингу створюються карти-завдання, БПЛА-обприскувачі (наприклад, DJI Agras T40, XAG V40) отримують маршрут із чітко визначеними координатами обробки, що дозволяє уникнути обробки не уражених ділянок та суттєво знизити обсяг використаних препаратів. Такий підхід зменшує витрати ЗЗР на 30–50% у порівнянні з суцільним методом внесення і знижує хімічне навантаження на екосистему поля. Окрім економії ресурсів, точкове обприскування сприяє точнішому менеджменту захисту рослин і покращенню загального фітосанітарного стану посівів;

Посів дрібнонасінневих культур або сидератів. Посів проводиться з використанням БПЛА - розкидачів, (рис.1.4) що забезпечують рівномірний розподіл насіння навіть у важкодоступних зонах або в період фізичної неможливості проїзду наземних агрегатів по полю. Посів БПЛА застосовується для висіву сидератів та дрібнонасінневих культур (наприклад, люцерни, фацелії, гірчиці) розкидним способом. Посів із використанням БПЛА особливо ефективний у важкодоступних зонах, на схилах і ділянках із надмірною вологістю, де механізована техніка не може працювати без пошкодження ґрунту. БПЛА-розкидачів, як-от XAG P100 Pro, забезпечують рівномірний поверхневий розподіл з точним дозуванням. Посів може виконуватись за заздалегідь підготовленими картами-завданнями, що дозволяє точно дотримуватись норми висіву та мінімізувати витрати насіння. Такий підхід

дозволяє пришвидшити агрономічний цикл, запобігти ерозії ґрунтів і уникнути непродуктивної втрати вологи.

Внесення рідких та твердих добрив. БПЛА (рис.1.3) дозволяють проводити диференційоване внесення добрив на основі попереднього аналізу карт продуктивності та зон живлення. Для внесення рідких добрив застосовують БПЛА-обприскувачі (наприклад, DJI Agras T40, XAG V20), які здатні рівномірно вносити рідкі мінеральні добрива, мікроелементи або біопрепарати з урахуванням зонального підходу до живлення культур. БПЛА використовують попередньо згенеровані карти зон живлення на основі NDVI, на основі мультиспектральної зйомки, для диференційованого внесення, що дозволяє скорочувати витрати добрив на 25–40% без зниження врожайності. Завдяки точному GPS-позиціонуванню, автоматичному контролю витрати та адаптивному алгоритму висоти польоту, забезпечується однакова концентрація робочого розчину на всіх оброблюваних ділянках незалежно від рельєфу. Це підвищує ефективність засвоєння поживних речовин, знижує ризик перенасичення ґрунту мінеральними добривами та зменшує навантаження на навколишнє середовище.

Десикація та обробка біопрепаратами. За допомогою БПЛА можна забезпечити своєчасну підготовку посівів до збирання та знизити фітопатологічний тиск біологічних факторів ризику на культуру. Внесення десикантів є важливим технологічним процесом, що дає змогу зменшити втрати під час збирання врожаю, підвищити його якість і скоротити витрати на досушування. Використання БПЛА для проведення десикації зарекомендувало себе як надійне технологічне рішення.

Контроль поширення фітопатогенів є важливою складовою системи захисту рослин, оскільки дає змогу зменшити ризик розвитку захворювань і втрат урожаю. Використання біологічних методів захисту сприяє обмеженню чисельності збудників хвороб із мінімальним негативним впливом на агроєкосистему. Застосування БПЛА забезпечує зонування ділянок із підвищеним фітопатогенним фоном і локальне внесення мікробіологічних препаратів у зони, що потребують першочергової обробки.

Про обсяг використання БПЛА в Україні як технічних засобів виконання технологічних операцій можна судити з наведених нижче даних: згідно з опитуванням 50 агропідприємств України, 59% з них вже використовують БПЛА для внесення засобів захисту рослин (ЗЗР). БПЛА дозволяють проводити обробку у важкодоступних місцях та на перезволожених ґрунтах, коли наземна техніка не може зайти в поле.



Рис. 1.3. Внесення добрив повітряними ДБКА (дронами). Джерело: [5]



Рис. 1.4. Прямий посів рису дронами в Індії запатентована, як нова технологія. Джерело: [6]

У період з 2021 по 2023 роки агродронами було оброблено 3,1 млн га сільськогосподарських земель. AgTech-сектор України налічує приблизно 70 стартапів, що працюють у різних напрямках: управління земельним банком, точне землеробство, використання БПЛА та інші інноваційні рішення. За останні роки кількість стартапів та інвестицій значно зросла, що свідчить про динамічний розвиток галузі навіть у складних умовах війни. [7]

Використання БПЛА у сільському господарстві дозволяє значно знизити витрати на воду, паливо та засоби захисту рослин. Наприклад, норма внесення робочого розчину під час роботи дрона становить 8 л/га, тоді як для наземного

обприскувача – 200 л/га. Це дозволяє зменшити витрати на підвезення води з 40 тис. грн до 5 тис. грн на 1000 га. Крім того, БПЛА не пошкоджують посіви, що дозволяє уникнути втрат урожаю на суму від 1,5 до 3 млн грн. [8]

Інтеграція БПЛА в агротехнологічний моніторинг

Сьогодні БПЛА відіграють ключову роль у моніторингу сільськогосподарських угідь. Для збору широкого спектру інформації про стан агрофітоценозів сучасні БПЛА оснащуються мультиспектральними камерами, термосенсорами, системами позиціонування та автоматичної навігації. Збір різноманітної інформації та визначення зв'язків між показниками, наприклад між рівнем ураження хворобами й кількістю опадів, а також попередня обробка цих даних полегшують аграріям оцінювання результатів моніторингу та дають змогу оперативно приймати технологічні рішення в режимі реального часу. Застосування оперативних технологічних рішень для вирішення виявлених проблем в певних точках поля, підвищує стійкість і вирівняність агрофітоценозу в змінних умовах, що в цілому підвищує загальну продуктивність агросистем.

БПЛА здатні виконувати широке коло завдань завдяки використанню різноманітного обладнання для спостереження:

Збирання високоточних просторових даних, включно з використанням комплексних методів аерофотозйомки, спектрального аналізу та тривимірного моделювання, що забезпечують об'єктивну кількісну оцінку просторової неоднорідності сільськогосподарських угідь. *Картографування полів* здійснюється за допомогою БПЛА, оснащених високоточними камерами та GPS-навігацією, що дозволяє створювати ортофотоплани з високою точністю. На їх основі генеруються цифрові моделі рельєфу (DSM), карти висот і ухилів, що є критично важливим для планування зрошення, меліорації, розрахунку ерозійних ризиків, систем обробітку ґрунту та підбір техніки. Окремо будуються карти щільності ґрунту на основі даних з сенсорів або проб ґрунту, отриманих за допомогою наземних дистанційних безпілотних систем. Інтеграція цих карт в ГІС дозволяє проводити диференційований обробіток полів, прогнозувати зони продуктивності, оптимізувати логістику використання техніки та планування польових операцій. Ці дані стають основою для прийняття рішень у точному землеробстві, і забезпечують зменшення витрат ресурсів і підвищення врожайності.

Мультиспектральні та гіперспектральні знімки. Такі знімки дозволяють проводити спектральний аналіз стану рослин завдяки розширеному діапазону довжин хвиль, які вловлюють не лише видиме світло, а й інфрачервоне та ультрафіолетове випромінювання. Це забезпечує високу точність у визначенні біофізичних параметрів рослин – вмісту хлорофілу, вологи, ступеня ушкодження патогенами або шкідниками. На основі таких знімків будуються карти

вегетації, зони потенційної продуктивності, карти дефіциту елементів живлення, температурних аномалій, а також проводиться точне зонування полів для диференційованого внесення добрив і пестициди. Гіперспектральна зйомка, що містить сотні вузьких спектральних каналів, дозволяє виявляти навіть мінімальні зміни у стані рослин, які не можна зафіксувати традиційними методами, що особливо цінно в ранній діагностиці хвороб і стресових чинників.

3D-моделювання та ортофотоплани – створення цифрових моделей рельєфу місцевості (Digital Surface Model, DSM) та ортофотопланів, які являють собою геоприв'язані аерофотознімки, виправлені з урахуванням спотворень рельєфу. Ці інструменти дозволяють отримати точне уявлення про морфологію поля, визначити ухили, пониження та підвищення, спрогнозувати шляхи стоку води, зони можливого підтоплення чи ерозії. 3D-моделі є основою для розробки планів дренажу, террасування, проектування інженерної інфраструктури, а також оптимізації маршрутів руху техніки.

Моніторинг стану посівів. БПЛА, оснащені мультиспектральними камерами, використовуються для створення індексів вегетації (NDVI, GNDVI, SAVI), за якими можна проводити кількісний аналіз біомаси, оцінювати фотосинтетичну активність, виявляти ділянки з аномальною вегетацією та прогнозувати потенційний урожай. Також такі БПЛА виявляють ознаки біотичних і абіотичних стресів (зневоднення, ураження шкідниками, грибкові інфекції), що дозволяє аграріям оперативно коригувати систему живлення, захисту або зрошення. Дані моніторингу інтегруються з ГІС та аграрним програмним забезпеченням, що дає змогу створювати карти-завдання для точкового втручання і зменшення витрат на добрива та ЗЗР. Використання NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) та інших вегетаційних індексів дає змогу оцінювати фотосинтетичну активність рослин, виявляти стресові стани, дефіцит вологи й інші фізіологічні порушення. RGB-зображення, отримані у видимому спектрі, забезпечують візуальне оцінювання щільності рослинного покриву, пошкоджень рослин, забур'яненості та поширення шкідників.

Отже, завдяки застосуванню БПЛА, фотограмметрії, тривимірного моделювання поля, створенню хмар точок та автоматизованому аналізу отриманих даних аграрії можуть точно оцінювати стан поля, його рельєф, наявність проблемних зон і перешкод. Це дозволяє ще до виїзду техніки на поле чітко спланувати маршрути, визначити обсяги робіт, вибрати потрібне обладнання та уникнути зайвих витрат пального, часу чи ресурсів.

Обмеження та ризики використання БПЛА в землеробстві

Технічні обмеження: обмежений час роботи БПЛА (у середньому 20–40 хвилин), потреба у частій заміні та підзарядці акумуляторів, складність експлуатації в умовах сильного вітру, дощу або туману, а також залежність від точності налаштування бортових сенсорів і стабілізаційних систем.

Юридичні обмеження: обмеження польотів у прифронтових, міських або прикордонних зонах, вимоги до сертифікації операторів, ведення польотної документації та дотримання регламенту безпечного використання авіапростору (наприклад, не перевищувати висоту 120 м без спеціального дозволу).

Економічна доцільність: висока вартість БПЛА сільськогосподарського призначення (від \$5000 до \$300000 і більше), необхідність щорічного обслуговування, закупівлі змінних елементів (батареї, насоси, форсунки), платне програмне забезпечення для обробки даних та навчання персоналу знижують доступність для дрібних фермерів.

Кадровий фактор: нестача фахівців, здатних ефективно керувати БПЛА, проводити технічне обслуговування та інтерпретувати дані. Навіть після навчання, оператори потребують практичного досвіду, щоб працювати з картами-завданнями, калібрувати камери, уникати помилок при польоті, а також інтегрувати результати у систему управління господарством.

Технічні ризики: імовірність відмови апаратного забезпечення (двигуни, ESC, контролери), помилки навігації через втрату сигналу GPS у лісових або пересічених місцевостях, ризик зіткнення з перешкодами (лінії електропередач, дерева), можливі хакерські атаки на систему управління або перехоплення сигналу зв'язку. ПЗ може дати збій при обробці великих обсягів даних, або бути несумісним із форматом іншого обладнання (сенсори, тракторні системи тощо).

Перспективи розвитку застосування БПЛА в точному землеробстві

Подальший розвиток застосування БПЛА пов'язаний як з розвитком техніки безпілотних летальних апаратів, розширенням спектру їх оснащення різноманітними датчиками і приладами дистанційного зондування, так і збільшенням сфери їх застосування як технічного знаряддя управління ростом і розвитком сільськогосподарських культур та родючістю ґрунту в сучасних системах землеробства.

Інтеграція з ШІ/АІ та машинним навчанням: автоматична обробка даних з БПЛА - для точного прогнозування захворювань, потреб у зрошенні, дефіциту елементів живлення. Системи штучного інтелекту аналізують великі обсяги даних із супутників, метеостанцій, БПЛА і сенсорів, надаючи аграріям точні рекомендації щодо локального втручання. ШІ/АІ використовується для побудови прогнозних моделей урожайності, ідентифікації хвороб за зображеннями листків, автоматичної класифікації культур та фаз розвитку рослин.

IoT-мережі (Internet of Things networks) та наземні автономні платформи (UGV). Перспективним напрямом є поєднання БПЛА із наземними безпілотниками, які здійснюють міжрядну культивуацію, точкове підживлення, збір проб ґрунту, інспекцію культур на рівні ґрунтового покриття. Наземні

системи, як-от Ecorobotix або FarmDroid FD20, дозволяють повністю автоматизувати рутинні операції, мають низьке енергоспоживання і точну прив'язку до ГІС. У поєднанні з повітряними апаратами ці системи забезпечують замкнений цикл збору даних і виконання технологічних операцій.

Розширення автономності: поява повністю автономних систем з автозаправками, автозавантаженням добрив, злітно-посадковими модулями. Такі станції, як DroneDock чи Hyllo HUB, дають змогу розгортати цілодобові безпілотні операції в полі без участі людини, значно підвищуючи продуктивність та оперативність обробки великих площ.

Розвиток єдиних цифрових екосистем: інтеграція БПЛА, тракторів, сенсорів, метеостанцій і агроплатформ у єдині цифрові агроєкосистеми з централізованим управлінням. Це дозволить побудувати повноцінні системи «розумного поля» (Smart Field), у яких БПЛА діятимуть у тісній синхронізації з іншими елементами агровиробництва, підвищуючи ефективність і стійкість господарства до зовнішніх ризиків. IoT-мережі: поєднання БПЛА із сенсорними системами на полі для створення повноцінних цифрових агросистем.

З огляду на зазначені перспективи розвитку безпілотних літальних і наземних апаратів, за даними MarketsandMarkets, у 2023–2028 роках очікується зростання ринку послуг для сільського господарства більш ніж на 30 %. Зростає сегмент сервісних компаній, які надають «БПЛА як послугу» – від моніторингу до обприскування. Це дозволяє дрібним і середнім господарствам користуватись передовими технологіями без необхідності капітальних інвестицій.

1.2. Технологічні основи застосування дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів у сучасному точному землеробстві

Використання БПЛА у точному землеробстві дозволяє отримувати оперативну, високоточну та просторово деталізовану інформацію про стан агроєкосистем. На відміну від традиційних польових обстежень, які споживають значні витрати часу та людських ресурсів, безпілотні системи здатні забезпечити моніторинг великих площ за короткий проміжок часу, формуючи цифрові моделі посівів, ортофотоплани та карти вегетаційних індексів. Такі дані є основою для прийняття агрономічних рішень щодо оптимізації внесення добрив, засобів захисту рослин, зрощення та інших технологічних операцій.

Технологічна цінність БПЛА стає не лише у можливості аерофотозйомки, але й у їх здатності інтегруватися з іншими елементами цифрової аграрної інфраструктури, системами дистанційного зондування Землі, платформами обробки великих даних та алгоритмами штучного інтелекту. Завдяки цьому безпілотні апарати виступають складовою частиною комплексної системи

цифрового моніторингу агроландшафтів, у якій дані з різних джерел об'єднуються для формування інтегрованої моделі управління агровиробництвом.

Особливі значення БПЛА мають для агроскаутингу – систематичного обстеження для оцінки стресових факторів, осередків уражень хворобами та шкідниками, дефіциту елементів живлення або водного стресу. Оснащення безпілотних платформ мультиспектральними, гіперспектральними та тепловізійними сенсорами дозволяє аналізувати спектральні характеристики рослинності, які відображають фізіологічний стан рослин. На основі таких вимірювань формуються вегетаційні індекси (наприклад, NDVI, NDRE, SAVI), які використовують для оцінки біомаси, активності фотосинтезу та рівня розвитку культури.

Водночас застосування БПЛА в аграрному секторі неможливо без розуміння технологічних принципів їхньої роботи. До таких принципів належать: конструктивні особливості безпілотних платформ (БПЛА), системи навігації та позиціонування, типи сенсорів і камер, методи планування польотів, а також алгоритми обробки отриманих зображень. Саме поєднання цих елементів формує технологічну основу ефективного використання безпілотних систем у точному землеробстві.

Класифікація за середовищем функціонування:

Повітряні (UAV) БПЛА: це апарати, які здійснюють політ у повітряному просторі без екіпажу на борту. Працюють у повітрі, зазнаючи впливу змінних атмосферних умов, що вимагає високого рівня стабілізації та точності керування. Основними особливостями їхньої експлуатації є потреба в безпечному зльоті й посадці, контроль за вітром, обмеження щодо тривалості польоту через ємність акумуляторів, а також потреба в безперебійному зв'язку з наземною станцією управління. БПЛА можуть виконувати як автоматичні, так і дистанційно керовані польоти. Такі апарати широко застосовуються для моніторингу, аерофотозйомки, сільського господарства, логістики, рятувальних операцій, військових та наукових досліджень.

Основними характеристиками повітряних БПЛА є їхня маневреність, здатність працювати на великій висоті та в умовах, недоступних для наземних транспортних засобів. БПЛА часто використовуються на різній висоті – від кількох метрів до сотень, що визначає вимоги до систем навігації та сенсорного обладнання. Важливо дотримуватися авіаційного законодавства, включаючи обмеження польотів у контрольованих повітряних зонах.

До повітряних належать БПЛА літакового, гвинтокрилого та мультироторного типу.

Літакового типу (Fixed-Wing UAV): мають нерухоме крило, що створює підйомну силу завдяки руху вперед. Характеризуються високою тривалістю

польоту, великою дальністю та ефективністю при моніторингу великих територій. Часто використовуються в агросекторі для картографування та агроскаутингу.

Гвинтокрилого типу (Helicopter UAV): обладнані одним основним і одним хвостовим ротором. Забезпечують стабільний зліт, посадку та зависання, підходять для точкових інспекцій і вертикальних злетів у складних умовах. Потребують більше технічного обслуговування.

Мультироторного типу (Multirotor UAV): мають кілька (4–8) роторів, що дозволяють злітати вертикально, зависати й маневрувати на місці. Це найпоширеніший тип для початкового навчання, відеозйомки, рятувальних операцій, інспекцій будівель і дрібномасштабних досліджень.



Рис 1.5. Планер: Finwing Universeye Penguin. Джерело: [9]

Tiger Drone (Finwing platform) (рис 1.5.) – це безпілотний літальний апарат фіксованого крила, розроблений для довготривалих польотів, аерофотозйомки та місій спостереження. Оснащений широким фюзеляжем для розміщення електроніки та сенсорів, він підтримує встановлення автопілотів (ArduPilot, PX4) і телеметричних модулів, а також камер з високою роздільною здатністю. Завдяки аеродинамічній формі корпусу й стабільним льотним характеристикам, Tiger Drone забезпечує плавний горизонтальний політ із хорошою економічністю та дальністю. [9]

Цей тип БПЛА використовується переважно в місіях, де важлива тривалість перебування у повітрі та якість збору візуальних і навігаційних даних: агромоніторинг, екологічні дослідження, картографування, пошукові операції. Конструкція апарата дозволяє його легко адаптувати під різні завдання завдяки змінному корисному навантаженню та гнучкій конфігурації

живлення. Tiger Drone є прикладом ефективного використання платформи фіксованого крила в інженерних і науково-дослідницьких проектах.

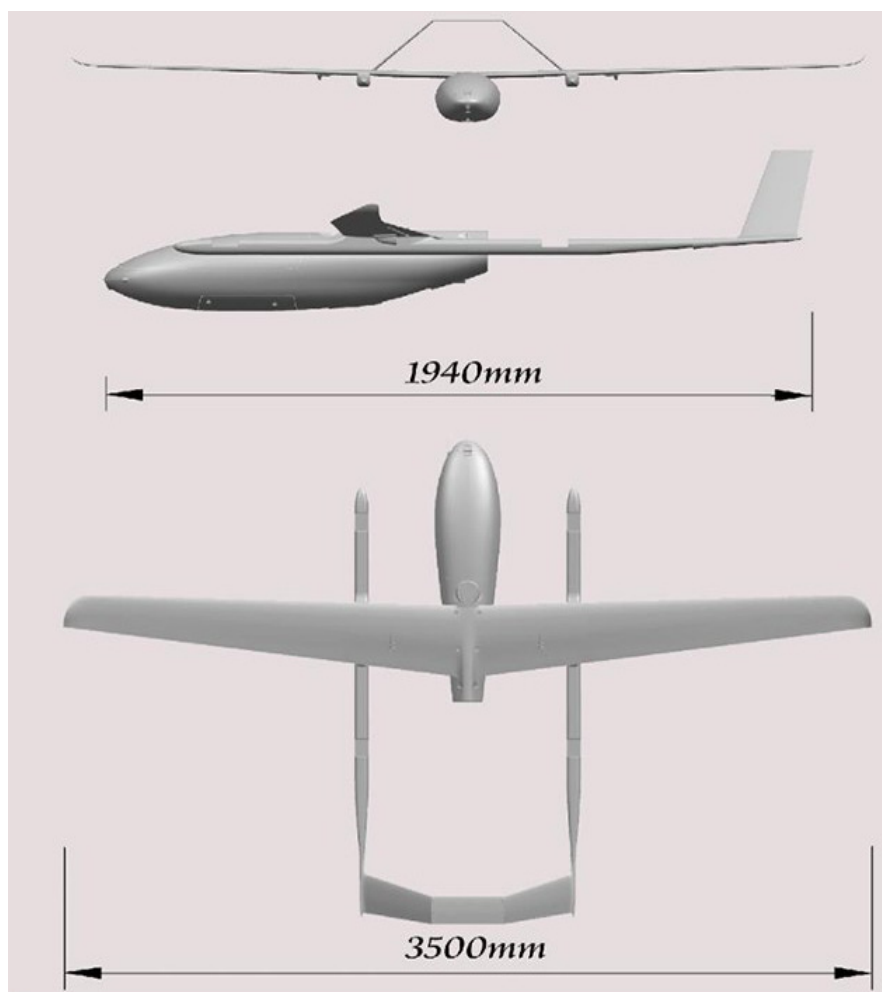


Рис 1.6. Tiger Shark VTOL 3500 мм. Джерело: [10]

Tiger Shark VTOL 3500 мм (рис 1.6.) – це гібридний безпілотний літальний апарат типу VTOL (vertical take-off and landing), що поєднує переваги вертикального зльоту/посадки та аеродинамічної ефективності фіксованого крила. Така конструкція дозволяє апарату злітати та сідати у вертикальному режимі як мультиротор, а після набору висоти переходити у горизонтальний політ, як класичний літак. Tiger Shark призначений для тривалих місій з великою дальністю, таких як аерофотозйомка, моніторинг посівів, картографування великих територій, спостереження або патрулювання. [10]

Платформа має розмах крила 3500 мм, оснащена окремими двигунами для вертикального та горизонтального польоту, і виготовлена з легких композитних матеріалів, що забезпечують оптимальне співвідношення ваги та жорсткості. Вона сумісна з автопілотними системами типу Pixhawk/ArduPilot, підтримує встановлення сенсорного обладнання, камер і телеметричних модулів. Завдяки такій універсальності, Tiger Shark VTOL ефективний як у сільському

господарстві, так і в оборонних чи наукових цілях, де необхідна висока автономність і гнучкість розміщення.

Застосування повітряних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у різних галузях

Повітряні безпілотні літальні апарати, або БПЛА, належать до ключових технологій сучасної цифрової трансформації. Їх застосування вже не обмежується окремими технічними, військовими чи експериментальними завданнями. Сьогодні БПЛА активно використовуються в сільському господарстві, лісовому господарстві, екологічному моніторингу, геодезії, картографії, будівництві, енергетиці, промисловості, логістиці, сфері надзвичайних ситуацій, медіа, охороні об'єктів та громадській безпеці. Така широта застосування пояснюється тим, що БПЛА є не лише літальним апаратом, а мобільною інформаційно-вимірювальною платформою, здатною збирати просторові, візуальні, спектральні, теплові та інші види даних.

У сучасному розумінні БПЛА слід розглядати як частину безпілотної авіаційної системи. До неї входять сам літальний апарат, наземна станція керування, оператор або дистанційний пілот, система навігації, канал зв'язку, бортові сенсори, програмне забезпечення для планування польоту та обробки отриманих матеріалів. Саме системний підхід дає змогу використовувати БПЛА не тільки для спостереження, а й для формування аналітичних висновків, картографічних матеріалів, моделей місцевості, індексних карт, карт-завдань і управлінських рішень.

За функціональним призначенням застосування БПЛА можна поділити на кілька основних типів: моніторингове, картографічне, діагностичне, інспекційне, технологічне, пошуково-рятувальне, логістичне та аналітико-прогностичне. Моніторингове застосування полягає у спостереженні за станом територій, об'єктів або процесів у динаміці. Картографічне застосування спрямоване на створення ортофотопланів, цифрових моделей рельєфу, цифрових моделей поверхні та тривимірних моделей. Діагностичне застосування передбачає виявлення дефектів, стресових станів рослин, пошкоджень, аномалій або проблемних зон. Інспекційне застосування характерне для будівництва, енергетики, промисловості та інфраструктурного контролю. Технологічне застосування пов'язане з безпосереднім виконанням виробничих операцій, наприклад обприскуванням посівів або розселенням ентомофагів. Пошуково-рятувальне застосування передбачає використання БПЛА для пошуку людей, тварин, тощо. Логістичне застосування пов'язане з доставкою невеликих вантажів, а аналітико-прогностичне використання – з використанням зібраних даних для моделювання, прогнозування та підтримки прийняття рішень.

Однією з найважливіших сфер застосування БПЛА є сільське господарство. У цій галузі вони використовуються для цифрового агроскаутингу, моніторингу стану посівів, оцінки густоти рослин, виявлення забур'яненості, фітосанітарної діагностики, контролю водного стресу, оцінки наслідків посухи, підтоплення, пошкодження шкідниками або хворобами. За допомогою RGB-камер можна отримувати деталізовані візуальні зображення поля, виявляти пропуски в посівах, сліди техніки, нерівномірність розвитку рослин і видимі пошкодження. Мультиспектральні камери дозволяють розраховувати вегетаційні індекси, зокрема NDVI, NDRE, GNDVI, SAVI та інші, які використовуються для оцінки біомаси, фотосинтетичної активності, стану хлорофілу, водного режиму та загального розвитку рослин. У сучасній цифровій агрономії БПЛА доповнюють супутниковий моніторинг і наземні обстеження, забезпечуючи вищу просторову деталізацію та можливість оперативного аналізу конкретного поля.

Особливе значення в агровиробництві має використання БПЛА для диференційованого управління полем. На основі отриманих знімків і розрахованих індексів формуються карти неоднорідності посівів, які можуть бути використані для уточнення норм внесення добрив, засобів захисту рослин, десикантів або регуляторів росту. Проте важливо розуміти, що індексна карта не є готовим агрономічним рішенням, вона лише показує просторову відмінність у стані рослин, а причини цієї відмінності мають бути встановлені шляхом наземної перевірки. Низьке значення індексу може бути спричинене нестачею азоту, ущільненням ґрунту, дефіцитом вологи, хворобою, шкідниками, фітотоксичністю, підтопленням або іншими чинниками. Тому ефективно застосування БПЛА в аграрній сфері потребує поєднання дистанційних даних, польової діагностики та професійного агрономічного аналізу.

У лісовому господарстві БПЛА застосовуються для інвентаризації лісових ресурсів, моніторингу санітарного стану насаджень, виявлення сухостою, осередків хвороб і шкідників, незаконних рубок, пожеж, вітровалів та інших пошкоджень. RGB-зйомка дає змогу оцінити загальний стан деревостану, зміну кольору крон, наявність прогалів або пошкоджених ділянок. Мультиспектральні камери допомагають оцінювати фізіологічний стан рослинності, а тепловізійні – виявляти температурні аномалії, пов'язані з пожежною небезпекою або залишковими осередками займання. Особливо перспективним у лісовому господарстві є використання LiDAR-сканування, яке дозволяє створювати тривимірні моделі лісу, визначати висоту дерев, структуру крон, щільність насаджень і рельєф під лісовим покривом.

У геодезії, картографії та кадастрі БПЛА використовуються для створення високодетальних ортофотопланів, цифрових моделей рельєфу, цифрових моделей поверхні, хмар точок і тривимірних моделей місцевості. Такі матеріали застосовуються у землеустрої, плануванні територій, моніторингу забудови,

аналізі фактичного землекористування, контролі меж земельних ділянок і документуванні змін ландшафту. Перевага БПЛА полягає у швидкому отриманні актуальної просторової інформації з високою роздільною здатністю. Водночас для юридично значущих кадастрових або геодезичних робіт необхідно дотримуватися вимог до точності, використовувати наземні опорні точки, RTK/PPK-навігацію та професійне програмне забезпечення.

У будівництві БПЛА застосовуються для контролю ходу будівельних робіт, документування стану об'єктів, створення тривимірних моделей, оцінки обсягів земляних робіт, інспекції дахів, фасадів, мостів, башт, труб та інших важкодоступних конструкцій. Вони дозволяють порівнювати фактичний стан будівельного майданчика з проєктною документацією, контролювати строки виконання робіт, оцінювати переміщення ґрунту або сипучих матеріалів. Використання БПЛА зменшує потребу в небезпечних висотних роботах, риштуваннях або автовишках, а також підвищує якість візуального контролю.

В енергетиці та промисловості БПЛА виконують переважно інспекційні та діагностичні функції. Вони використовуються для обстеження ліній електропередач, трансформаторних підстанцій, сонячних електростанцій, вітрових турбін, трубопроводів, резервуарів, промислових споруд і важкодоступного обладнання. Під час огляду ліній електропередач БПЛА допомагають виявляти пошкодження ізоляторів, провисання проводів, механічні дефекти опор, небезпечне наближення рослинності або ознаки перегріву. На сонячних електростанціях тепловізійні сенсори дають змогу виявляти несправні або перегріті панелі. На вітрових турбінах БПЛА використовуються для огляду лопатей, де можуть виникати тріщини, ерозія або інші пошкодження. У промисловості така технологія підвищує безпеку праці, оскільки дозволяє обстежувати небезпечні об'єкти без безпосередньої присутності людини.

В екологічному моніторингу БПЛА використовуються для спостереження за станом природних територій, водних об'єктів, берегових ліній, ґрунтів, рослинності, ерозійних процесів і територій, що зазнали антропогенного впливу. Вони дають змогу оцінювати замулення водойм, зміну берегової лінії, поширення інвазійних видів, наслідки пожеж, деградацію ґрунтів, розвиток ярів, зсувів і промоїн. У природоохоронній діяльності БПЛА можуть використовуватися для моніторингу біорізноманіття, обліку тварин, контролю незаконної діяльності та документування стану заповідних територій. Водночас польоти над природними територіями мають проводитися з урахуванням можливого впливу на тварин, особливо в періоди гніздування, розмноження або міграції.

У сфері надзвичайних ситуацій БПЛА мають важливе значення для оперативного реагування. Вони використовуються під час пожеж, повеней, зсувів, руйнувань, техногенних аварій і пошуково-рятувальних операцій. Під час пожеж БПЛА допомагають визначати межі поширення вогню, знаходити осередки займання та залишкові термічні зони. Під час повеней вони дають

змогу швидко оцінити масштаби затоплення, стан доріг, мостів, житлових територій і сільськогосподарських угідь. У пошуково-рятувальних операціях тепловізійні камери можуть використовуватися для виявлення людей уночі, у лісах, полях, горах або зонах руйнувань. Головна перевага БПЛА в таких умовах полягає у можливості отримати інформацію з небезпечної території без ризику для рятувальників.

У логістиці БПЛА використовуються або тестуються для доставки невеликих вантажів, зокрема медичних препаратів, вакцин, крові, лабораторних зразків, документів, запчастин або гуманітарної допомоги. Особливо перспективним цей напрям є для важкодоступних територій, гірських районів, островів, зон стихійного лиха або територій із пошкодженою транспортною інфраструктурою. Проте логістичне застосування БПЛА має суттєві обмеження: невелику вантажопідйомність, залежність від погодних умов, потребу в безпечних маршрутах, складність польотів над населеними пунктами та високі нормативні вимоги.

У сфері медіа, журналістики, кіно та культурної спадщини БПЛА використовуються для аерозйомки, створення документальних матеріалів, репортажів, рекламних відео, туристичних роликів і кінематографічних кадрів. Вони дають змогу отримувати ракурси, які раніше потребували використання вертольотів, кранів або іншого складного обладнання. У журналістиці БПЛА можуть використовуватися для документування наслідків стихійних лих, екологічних проблем, інфраструктурних змін або масштабних подій. У сфері культурної спадщини вони застосовуються для створення тривимірних моделей пам'яток, фіксації руйнувань, моніторингу реставраційних робіт і формування цифрових архівів.

У сфері громадської безпеки БПЛА застосовуються для патрулювання територій, охорони об'єктів, моніторингу масових заходів, контролю дорожнього руху, пошуку зниклих осіб і підтримки ситуаційної обізнаності. Вони дають змогу швидко отримувати оглядову інформацію, координувати дії служб і зменшувати ризики для персоналу. Водночас таке застосування потребує суворого дотримання законодавства, захисту персональних даних, поваги до приватності громадян і безпеки польотів.

У таблиці 1.2. представлено ключові напрями застосування повітряних дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів БПЛА (UAV), які охоплюють як комерційні, так і гуманітарні сфери. Від аерофотозйомки, фотограмметрії та точного землеробства до рятувальних операцій, моніторингу екологічного стану, інспекції критичної інфраструктури та задач безпеки – БПЛА демонструють свою універсальність і високу ефективність. Для кожного типу використання надано стисле функціональне пояснення й наведено посилання на ілюстративні матеріали, що візуалізують реальні приклади використання в практиці.

Таблиця 1.2. Застосування повітряних безпілотних літальних апаратів БПЛА (UAV) у різних галузях з прикладами візуалізації

Тип застосування БПЛА	Опис застосування	Корисні посилання
Аерофотозйомка та фотограмметрія	Створення карт, 3D-моделей та ортофотопланів	Pix4Dmapper https://www.pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software/
Сільське господарство та обприскування	Внесення добрив, захист посівів, моніторинг стану рослин	https://ag.dji.com/newsroom/agras-t50-and-t25-global-launch
Рятувальні операції та надзвичайні ситуації	Пошуково-рятувальні роботи, оцінка наслідків стихійних лих	https://enterprise.dji.com/public-safety
Інспекція інфраструктури	Моніторинг стану мостів, трубопроводів, промислових споруд	https://www.flyability.com/
Моніторинг екологічного стану	Вивчення дикої природи, оцінка екосистем, висадка лісів	https://enterprise.dji.com/public-safety/wildlife-protection
Безпека та оборона	Розвідка, моніторинг та забезпечення безпеки	DJI Enterprise



Характеристика DJI AGRAS T50

DJI AGRAS T50 використовує систему подвійного розпилення, передній та задній фазовані решітчасті радари та систему біноккулярного зору.

Джерело: <https://ag.dji.com/t50/specs>

Порівняння технічної характеристики.

Таблиця 1.3. Технічні характеристики основних типів БПЛА

Тип	Маса	Швидкість	Тривалість роботи	Дальність дії	Вантажопідйомність	Живлення
БПЛА (літакового типу)	5–500 кг	60–300 км/год	до 24 год	до 1500 км	до 100 кг	акумулятор / бензин
БПЛА (мультиротор)	1–40 кг	30–150 км/год	20–60 хв	до 40 км	до 50 кг	акумулятор/бензин

У таблиці 1.3. подано порівняльні технічні характеристики різних типів дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів БПЛА, для кожного типу вказано основні параметри: масу, швидкість руху, тривалість автономної роботи, максимальну дальність дії, вантажопідйомність, тип живлення.

В таблиці 1.4. представлено порівняльний аналіз п'яти основних типів дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів (БПЛА), залежно від їхніх переваг і недоліків.

БПЛА літакового типу мають значну дальність і тривалість польоту, що робить їх ефективними для широкомасштабного моніторингу, однак вони потребують спеціальних умов для зльоту. Мультироторні апарати відзначаються маневреністю та точністю, але обмежені коротким часом роботи та вразливістю до вітру.

Таблиця 1.4. Порівняння типів БПЛА

Тип	Переваги	Недоліки
Літакові	велика дальність і тривалість польоту	потребують злітної смуги або катапульти
Мультироторні	точне зависання, маневреність	мала тривалість роботи, чутливість до вітру

Класифікація за конструкцією дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів.

Моноблочні: характеризуються цілісною конструкцією, у якій всі елементи (механічні, електронні, енергетичні) інтегровані в одному корпусі. Такі апарати відзначаються високою жорсткістю конструкції, простотою в експлуатації та обмеженою можливістю модернізації. Часто застосовуються для масового виробництва або в умовах, де не потрібна зміна конфігурації.

Модульні: складаються з окремих функціональних блоків (модулів), які можна замінювати або оновлювати без необхідності змінювати всю конструк-

цію. Модульна система забезпечує гнучкість налаштувань для виконання різних завдань – наприклад, зміна камери, сенсора або блока живлення. Це зручно для наукових цілей, тестування, навчання.

Складні (для транспортування): мають складну або розбірну конструкцію, що дозволяє зменшити габарити апарата для зручного перевезення. Зазвичай включають складні пропелери, шарнірні з'єднання або змінні вузли. Підходять для оперативного використання у польових умовах.

В таблиці 1.5. представлено приклади дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів БПЛА, класифікованих за типом конструкції – моноблочна та складна (транспортабельна). Для кожного типу наведено конкретну модель, що демонструє її особливості та сферу застосування.

Таблиця 1.5. Класифікація безпілотних літальних апаратів за типом конструкції

Тип конструкції	Назва/приклад	Посилання на сторінку з фото	Опис
Моноблочна	DJI Inspire 3	https://www.mynewsdesk.com/uk/dji/images/dji-inspire-3-car-shoot-horizontal-close-up-2789086	DJI Inspire 3 – це високотехнологічний кінематографічний дрон із моноблочною конструкцією. Усі елементи (сенсори, електроніка, камера, антени) інтегровані в єдиний аеродинамічний корпус. Такий підхід забезпечує жорсткість, зменшує кількість з'єднань, підвищує надійність і спрощує експлуатацію.
Складна (транспортабельна)	Finwing Universeye Penguin	https://conservationdrones.org/2013/03/17/tiger-drone-test-flight-video/	Finwing Tiger – це безпілотний літальний апарат з можливістю складання основних елементів, таких як крила та опори. Завдяки цьому дрон зручно транспортувати навіть у польових умовах або на великі відстані. Підходить для тактичних місій, польових досліджень і мобільного моніторингу.

1.3. Класифікація за призначенням дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів.

Розвідувальні: призначені для збору інформації про місцевість, об'єкти, стан інфраструктури. Часто використовуються у військовій сфері, під час надзвичайних ситуацій або для картографічної зйомки. Обладнуються камерами денного та нічного бачення, тепловізорами, сенсорами руху, іноді – передавачами даних у режимі реального часу.

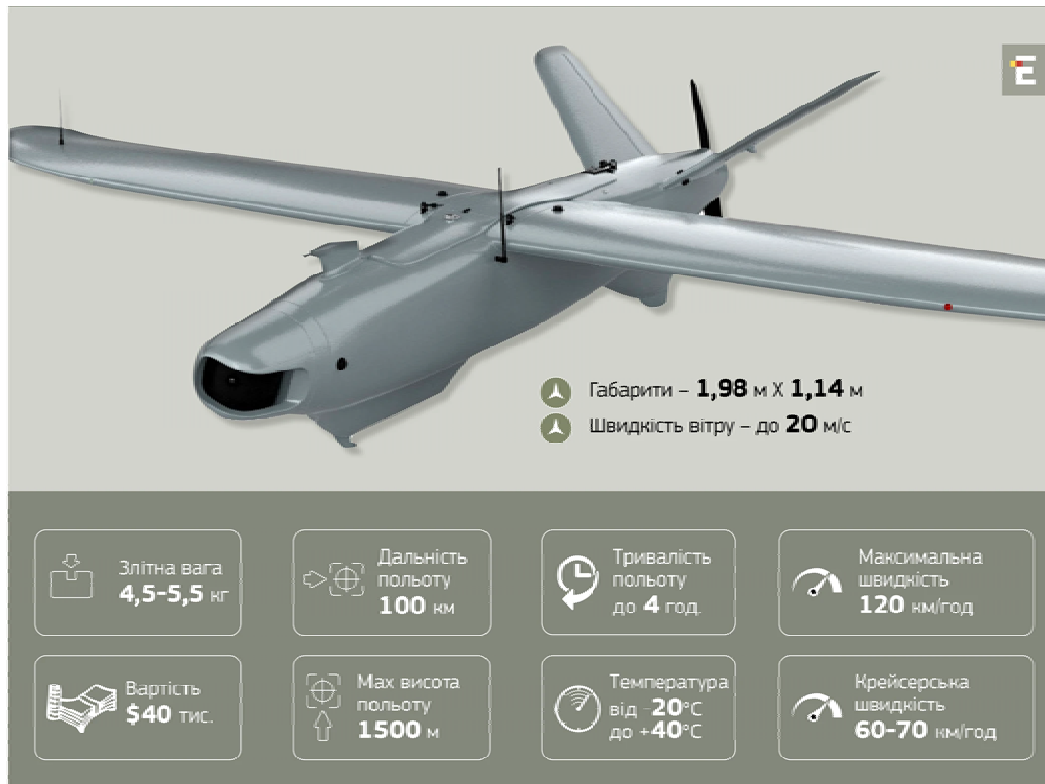


Рис.1.7. Характеристика БПЛА «Лелека-100». Джерело: [11]

На рис. 1.7. представлено БПЛА "Лелека-100", який може використовуватися як у військовій сфері, так і в цивільному застосуванні. Це багатфункціональний безпілотний літальний апарат українського виробництва, створений компанією DeViro. "Лелека-100" входить до складу програмно-апаратного комплексу для збору, передачі та обробки даних у режимі реального часу. Його корпус виготовлений із сучасних композитних матеріалів (скловуглеволокно), а силова установка базується на електродвигуні, що забезпечує низький рівень шуму та екологічність польотів. Безпілотник призначений для аерофотозйомки, патрулювання та картографування, з точним визначенням координат місця зйомки. Він може працювати вдень і вночі, навіть у складних погодних умовах – при щільній хмарності та невеликому дощі (до 20 хв у повітрі). Система керування адаптована до роботи в умовах

радіоелектронного протистояння: з перебоями зв'язку, спробами глушіння GPS або активних радіозавад. [11]

Моніторингові: призначені для тривалого спостереження за змінами в навколишньому середовищі, станом об'єктів інфраструктури, атмосферними явищами, рівнем води, викидами забруднювальних речовин та іншими показниками. Застосовуються в екології, метеорології, геології, урбаністиці, енергетиці, сільському господарстві. Такі апарати можуть бути обладнані спектральними камерами, газоаналізаторами, тепловізорами, лазерними далекомірами, ультразвуковими сенсорами, погодними модулями. Моніторинг може відбуватися як у реальному часі (через потік даних), так і у вигляді періодичного збору інформації для подальшого аналізу.



Рис. 1.8. Mavic 3 Multispectral. Джерело: [12]

На рис.1.8. представлено БПЛА DJI Mavic 3 Multispectral, який можна використовувати для моніторингу сільськогосподарських угідь. Апарат оснащений 20 МП RGB-камерою та мультиспектральним модулем із чотирма сенсорами (зелений, червоний, червона крайка, NIR), а також RTK-модулем для точного позиціонування та геоприв'язки зображень. Завдяки системі уникнення перешкод, датчику освітлення та часу автономної роботи до 43 хвилин, дрон дозволяє ефективно проводити обліт до 200 га за один виліт, що робить його зручним інструментом для створення карт вегетаційних індексів та агромоніторингу. [12]

Сільськогосподарські: використовуються для виконання завдань у сфері агровиробництва, таких як внесення добрив і засобів захисту рослин, аналіз вологості ґрунту, картографування ділянок, контроль росту культур, виявлення

шкідників і хвороб. Часто застосовуються багатороторні БПЛА з системами точкового розпилення або розсіювання. Також використовуються дрони з мультиспектральними камерами для виявлення стресу рослин та оптимізації сівозміни. Завдяки зменшенню витрат ресурсів і підвищенню точності обробки ділянок, агродрони сприяють розвитку точного землеробства, покращенню врожайності та зниженню екологічного навантаження.



Рис 1.9. БПЛА-обприскувач TALOS T60X. Джерело: [13]

На рис. 1.9 представлено БПЛА Talos T60X, який використовується для обприскування сільськогосподарських культур у системах точного землеробства. Апарат належить до класу важких мультироторних платформ і призначений для виконання технологічних операцій із внесення засобів захисту рослин, рідких добрив та біопрепаратів.

БПЛА оснащений баком місткістю до 60 л і продуктивною системою розпилення зі швидкістю подачі робочого розчину до 28 л/хв. Це забезпечує високу продуктивність обробки – до 70 акрів за годину (≈ 28 га/год) залежно від норми внесення, висоти польоту та умов роботи. Використання багатофорсункової системи розпилення дозволяє формувати рівномірне покриття листової поверхні з контрольованим розміром краплі, що є критично важливим для ефективності застосування засобів захисту рослин.

Конструктивно апарат виконаний за мультироторною схемою, що забезпечує стабільність польоту, можливість вертикального зльоту і посадки (VTOL), а також роботу на малих висотах (зазвичай 2–4 м над рослинним покривом). Така висота обробки сприяє зменшенню зносу робочого розчину та підвищенню точності внесення.[13]

Рятувальні: застосовуються у надзвичайних ситуаціях – пошуково-рятувальних операціях, доставці медикаментів або вантажів у зони, недоступні для людини, а також у зонах стихійних лих (повені, землетруси, пожежі). Такі апарати можуть бути оснащені тепловізорами, гучномовцями, прожекторами, сенсорами пошуку людей, маніпуляторами для евакуації постраждалих. Перевагами рятувальних БПЛА є швидке розгортання, доступ до важкодоступних територій, автономність дій та можливість роботи у складних умовах з мінімальним ризиком для рятувальників.



Рис 1.10. DJI Mavic 3E Enterprise. Джерело: [14]

На рис. 1.10 представлено квадрокоптер DJI Mavic 3E, призначений для виконання рятувальних завдань у складних умовах. Завдяки потужній 20 МП камері з 56× зумом він дозволяє швидко виявляти людей або об'єкти з великої висоти, а вбудований RTK-модуль забезпечує точне визначення координат для оперативного реагування. Система всенапрямого уникання перешкод, можливість нічної зйомки та робота в умовах низької освітленості дають змогу ефективно діяти під час аварій, катастроф або пошукових робіт у важкодоступній місцевості. Вбудований гучномовець дає змогу передавати голосові повідомлення потерпілим або координувати дії груп на землі. [14]

Військові: застосовуються для виконання бойових, розвідувальних, логістичних та охоронних завдань у збройних силах. Військові БПЛА можуть бути повітряними (ударні дрони, розвідники, носії), наземними (роботи-розвідники, сапери, платформи доставки боєприпасів, евакуаційні машини), надводними (патрульні дрони для охорони узбережжя, ударні БПЛА-камікадзе, носії озброєння) або підводними (розвідка, міношукачі). Оснащуються передовими сенсорами, криптозахищеним зв'язком, системами автоматичного виявлення та розпізнавання цілей, високоточним озброєнням, засобами РЕБ (радіоелектронної боротьби) та штучним інтелектом. Переваги включають

скорочення ризику для особового складу, здатність діяти в умовах радіозаглушень, автономність і точність удару.



Рис 1.11. Bayraktar TB2. Джерело: [15]

На рис. 1.11. представлено Bayraktar TB2 – Bayraktar TB2 від турецької компанії Baykar Makina – оперативно-тактичний, багатоцільовий безпілотний літальний комплекс, який може проводити розвідку на значній відстані від станції управління, відстежувати та самостійно знищувати цілі. Bayraktar TB2 має дві основні функції: ударну та розвідувальну.

Керовані бомби з лазерним наведенням MAM-L мають дальність ураження цілі до 8 км. При цьому похибка в наведенні становить до одного метра. Один «Байрактар» може нести дві керовані протитанкові ракети UMTAS або чотири високоточні авіабомби Roketsan MAM-C, Bozok чи Roketsan MAM-L. З обладнанням та озброєнням, встановленими на борту, безпілотник здатний підніматися на висоту до 8 км і виконувати бойові завдання протягом 27 годин.

Bayraktar TB2, окрім рекордної тривалості польоту, дійсно має досить високі характеристики для БПЛА свого класу: злітна маса 560 кг і 55 кг корисного навантаження. Дрон оснащений надпотужною оптичною станцією, здатною виявляти цілі на відстані в десятки кілометрів, та має можливість самостійно завдавати ударів високоточними боєприпасами.

Дальність дії радіоканалу управління та телеметрії – 150 км від однієї станції управління, що є вагомим бойовим радіусом дії під час бойових місій. А максимальна дальність польоту Bayraktar TB2 становить 4000 км, які він може долати, керуючись програмою або перемикаючись між станціями управління.[15]

Таблиця 1.6. Класифікація за призначенням дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів БПЛА.

Категорія призначення	Типовий приклад	Опис	Посилання на джерела
Розвідувальні	<i>Лелека-100, Фурія, Shark</i>	Українські БПЛА, призначені для ведення аеророзвідки, спостереження та збору даних у режимі реального часу. Оснащені оптико-електронними системами, здатні працювати в умовах радіо-електронної боротьби.	Лелека-100 в роботі , Фурія в небі, Shark на випробуваннях
Моніторингові	<i>DJI Mavic 3 Multispectral</i>	Квадрокоптер з високоякісною камерою та мультиспектральним камери, використовується для тривалого спостереження за об'єктами, інфраструктурою та навколишнім середовищем. Оснащений GPS та можливістю передачі даних у реальному часі.	DJI Mavic 3M в дії
Сільськогосподарські	<i>DJI Agras T40</i>	Безпілотник для точного землеробства: обприскування, внесення добрив, моніторинг стану посівів. Оснащений мультиспектральними камерами та системами RTK-навігації.	DJI Agras T40 в роботі
Рятувальні	<i>DJI Mavic 3T</i>	Дрон, обладнаний тепловізором, гучномовцем та системами виявлення, використовується для пошуку та порятунку людей у важкодоступних місцях, під час стихійних лих.	DJI Mavic 3T в дії
Військові	<i>Bayraktar TB2</i>	Бойовий безпілотник для виконання ударних, розвідувальних та спеціальних операцій. Оснащений високоточними боєприпасами, системами РЕБ та ІІІ для автономного виконання завдань.	Bayraktar TB2 в операції

В таблиці 1.6. представлено класифікацію дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів БПЛА за функціональним призначенням, з прикладами типових моделей для кожної категорії, описом їхнього застосування у практичних умовах та посиланнями на зображення апаратів у реальному середовищі експлуатації. Це дозволяє студентам візуально зіставити технічне призначення БПЛА з їх фактичним використанням у військовій, рятувальній, аграрній та моніторинговій сферах.

Класифікація за способом запуску/переміщення:

Вертикальний зліт і посадка (VTOL) – це здатність повітряного безпілотного апарата злітати та сідати вертикально, без необхідності у злітній смузі. Конструктивно VTOL-дрони можуть бути мультикоптерами, літаками з відкидними пропелерами або гібридними системами з вертикальними та горизонтальними двигунами. Вони особливо ефективні в умовах обмеженої інфраструктури, наприклад у міській забудові, лісовій місцевості або на кораблях.

Ручний запуск – це найпростіший спосіб запуску повітряним безпілотного апарата, при якому оператор тримає апарат у руках і здійснює його запуск шляхом кидання в повітря або активації двигуна з рук. Такий метод переважно використовується для легких БПЛА, які мають достатню аеродинаміку для миттєвого підйому після кидка. Переваги ручного запуску включають мобільність, простоту реалізації та відсутність потреби в додатковому обладнанні. Проте він вимагає певних навичок від оператора та не підходить для важких або великих апаратів.

Запуск із катапульти – це спосіб старту повітряний безпілотного апарата, при якому спеціальний пристрій (катапульта) надає апарату необхідне прискорення для польоту. Катапульти можуть бути механічними (пружинні), пневматичними, гідравлічними або електромагнітними. Вони дозволяють запускати БПЛА з обмежених ділянок місцевості, де відсутня злітна смуга. Такий спосіб особливо актуальний для апаратів літакового типу, які потребують початкової швидкості для створення підйомної сили. Переваги включають безпечний та стабільний запуск навіть у складних погодних умовах, точність старту і можливість автоматизації процесу.

Автоматичний (дистанційний старт із платформи) – це спосіб запуску безпілотного апарата, при якому ініціація запуску відбувається за допомогою попередньо запрограмованої команди або команди оператора з контрольного пункту, без безпосередньої фізичної взаємодії з апаратом. Зазвичай використовується з наземною стартовою платформою або мобільною станцією. Такий запуск може бути реалізований з використанням автопілотної системи або через інтерфейс програмного забезпечення. Перевагами є висока точність старту, мінімізація людського фактора, можливість запуску у важкодоступних місцях, а також інтеграція з автоматизованими сценаріями місії (наприклад, зльотами за графіком або після аналізу погодних умов).

В таблиці 1.7. представлено класифікацію дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів БПЛА за способом запуску або переміщення, включаючи вертикальний зліт і посадку (VTOL), ручний запуск, старт із катапульти та автоматичний запуск з платформи. Для кожного способу наведено короткий опис, приклад апарата з посиланням на його зображення та

технічна характеристика, що відображає умови використання і функціональні переваги. Таблиця ілюструє різноманіття технічних підходів до запуску БПЛА залежно від їх конструкції, маси та середовища експлуатації.

Таблиця 1.7. Класифікація за способом запуску/переміщення дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів БПЛА

Спосіб запуску / переміщення	Опис	Приклад апарата (з фото)	Опис апаратів, які представлені як приклад
Вертикальний зліт і посадка	Здатність БПЛА злітати та сідати вертикально без злітної смуги. Поєднує ефективність польоту літака та маневреність коптера.	https://wingtra.com/	Професійний VTOL-дрон для геодезії. Має вертикальний зліт і посадку, оснащений камерою Sony RX1RII, підтримує RTK-навігацію. Призначений для високоточного картографування на великих площах.
Ручний запуск	Оператор запускає легкий БПЛА, кидаючи його в повітря або активуючи двигун з рук. Підходить для легких літаків з хорошою аеродинамікою.	https://www.unmannedsystemstechnology.com/company/tekever/ar4-modular-uas/#product-gallery-1	Надкомпактний квадрокоптер із запуском з руки. Оснащений камерою 12 Мп, GPS-стабілізацією, жестовим управлінням. Ідеальний для оперативного фото- і відеозахоплення.
Запуск із катапульт	Катапульта надає БПЛА початкову швидкість для польоту. Застосовується для запуску без злітної смуги, особливо в польових умовах.	https://ukrspeccsystems.com/drones/shark-m-uas	Українська пневматична катапульта для запуску БПЛА до 20 кг. Швидко розгортається, працює незалежно від місцевості. Використовується військовими та рятувальниками.
Автоматичний запуск з платформи	Запуск ініціюється дистанційно або за розкладом без участі людини. Працює з автопілотом або хмарними системами управління.	https://www.targetarm.com/?utm_source=chatgpt.com	Автоматична станція для запуску дронів DJI Matrice 30. Оснащена зарядкою, зв'язком, термоконтролем. Дає змогу запускати дрони цілодобово без присутності оператора.

1.4. Технічні рішення: апаратно-програмні комплекси та сенсорні системи дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів.

Апаратно-програмні комплекси – це сукупність технічних засобів та програмного забезпечення, які забезпечують отримання, обробку та аналіз даних про стан рослин і ґрунтів, без фізичного контакту з об’єктом спостереження. Основою роботи таких систем є описані вище принципи взаємодії електромагнітного випромінювання з рослинними тканинами та ґрунтовою поверхнею. Ключова особливість таких комплексів – поєднання апаратної частини (сенсори, камери, дрони, станції) та програмної частини (системи обробки зображень, розрахунку спектральних індексів, генерації карт і рекомендацій). Це дозволяє перетворювати великі масиви даних про відбиття у різних спектральних діапазонах на практичну інформацію: карти стану посівів, виявлення зон стресу, прогнозування врожайності та оптимізація використання ресурсів. Таким чином, апаратно-програмні комплекси є інструментальним втіленням усіх фізичних, біологічних та математичних принципів, описаних у попередніх розділах, і забезпечують практичну реалізацію концепцій точного землеробства.

Основні типи апаратно-програмних комплексів для дистанційного моніторингу полів:

Супутники — це орбітальні апарати, оснащені мультиспектральними та гіперспектральними камерами, які здійснюють регулярне знімання великих площ із різною періодичністю та просторовою роздільною здатністю. До систем супутникового моніторингу належать як комерційні, так і відкриті платформи. Супутниковий моніторинг дозволяє отримувати інформацію про стан рослинності, ґрунту, вологи та температури з великою частотою оновлення та на значних територіях.

Переваги:

Охоплюють великі площі (від кількох гектарів до цілих країн).

Можна аналізувати зміни в динаміці (моніторинг за місяць, сезон, рік).

Дані багатьох супутників відкриті та безкоштовні (наприклад, Sentinel-2, Landsat-8).

Обмеження:

Залежність від хмарності – неможливо “бачити” поле коли хмарна погода.

Просторова роздільна здатність зазвичай не дозволяє виявити дрібні деталі (від 10 до 30 м для популярних безкоштовних супутників).

Інтервал зйомки – кілька днів (або й тижнів).

Приклад:

«...Перші супутники для моніторингу ресурсів Землі (наприклад, Landsat-1, запущений у 1972 році) відкрили нову епоху у спостереженні за сільським господарством, картографією, лісовим господарством, геологією тощо. На

сучасних супутниках, як правило, встановлені багатоспектральні камери для збору й аналізу даних про стан земель.» [31]

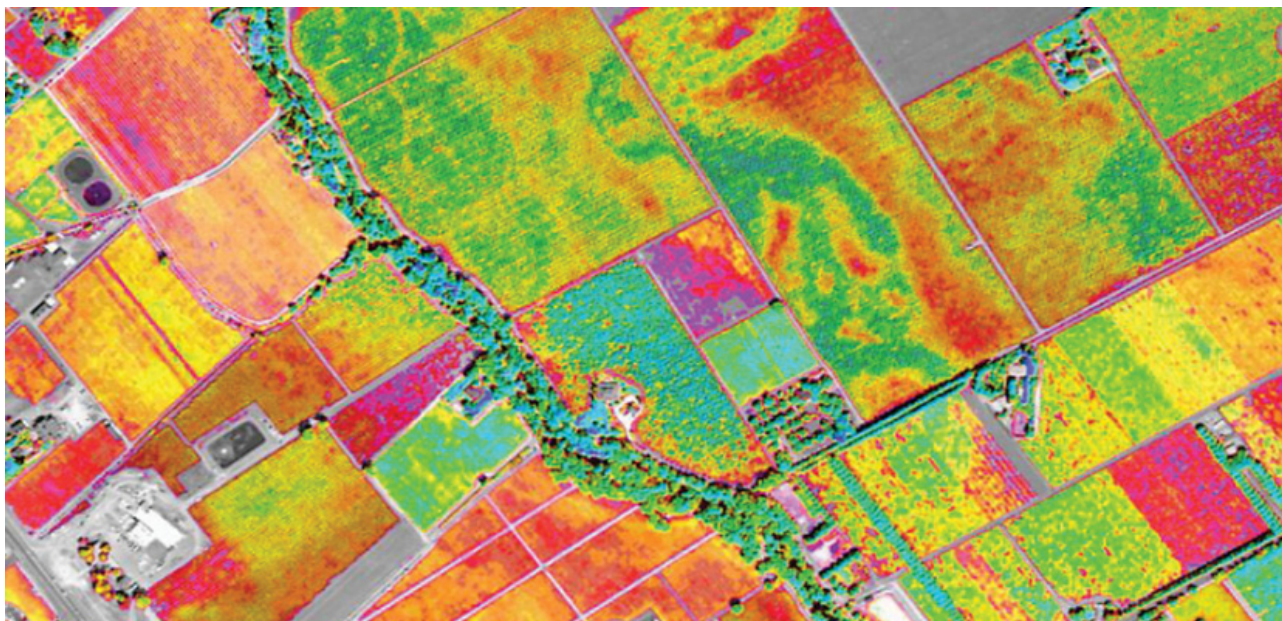


Рис.1.12. Супутниковому знімку від DigitalGlobe зеленим кольором позначено здорові посіви, а червоним – нездорові. Фото надано DigitalGlobe.

Джерело: <https://www.xyht.com/enviroag/satellite-imagery-precision-agriculture/>

На рис 1.12 представлено супутникове зображення полів, оброблене для оцінки стану рослинності. На ньому застосовано індекси вегетації (наприклад, NDVI), що дозволяє виділити зони за рівнем біомаси й здоров'ям культур.

Безпілотні літальні апарати (БПЛА): це повітряні апарати, що оснащуються різноманітними сенсорами (RGB, мульти- чи гіперспектральні камери, тепловізори) для отримання детальних знімків та даних локальних ділянок поля. Дрони дозволяють швидко, гнучко та з високою роздільною здатністю збирати дані для аналізу стану посівів, пошуку стресових зон, обліку шкідників, хвороб чи бур'янів.

Переваги:

Висока просторово-часова точність (можна обстежити конкретну ділянку в будь-який момент)

Знімки з роздільною здатністю до 2-5 см на піксель

Можна літати під хмарами, отримувати дані «точно під задачу»

Можливість підвішувати різні типи сенсорів – від звичайної RGB-камери до мульти- чи гіперспектральної, тепловізора

Обмеження:

Використання БПЛА потребує кваліфікованого оператора, який має належні навички керування апаратом, а також спеціалізованого програмного забезпечення для планування польотної місії та оброблення даних. Обмежений

час польоту (20–60 хвилин), залежність від погоди й регуляторних вимог на польоту.

Охоплює менші площі за один виліт: до 100–200 га за день.

Дрон Typhoon Q500 – це більше, ніж просто радіокерований мультиротор, він призначений для APV – аерофотозйомки та відеозйомки. Для цього він оснащений CGO3-GB, 3-осьовою камерою зі стабілізованим карданом, здатною записувати відео 4K, записувати відео 1080p зі швидкістю до 120 кадрів/с та знімати фотографії з роздільною здатністю 16 мегапікселів.



Рис. 1.13. БПЛА Q500 від Yuneec з камерою 4k. Джерело: <https://www.integraldrones.com.au/yuneec-q500-drone-review/>

Приклад:

«Використання квадрокоптерів з RGB- та спектральними камерами дозволяє отримувати оперативну й детальну інформацію про стан посівів, виявляти бур'яни, хвороби, нестачу вологи чи елементів живлення, проводити точкове внесення препаратів. Наприклад, Parrot Sequoia, DJI Phantom 4 Multispectral – популярні моделі для агросфери» (рис. 1.13) [31].

Наземні сенсорні системи: це стаціонарні або мобільні пристрої, розміщені безпосередньо в полі, які постійно або періодично реєструють параметри середовища та рослинності (температура, вологість, вміст елементів, фотосинтетична активність тощо) (рис. 1.14). До них належать агрометеостанції, ґрунтові датчики, сенсори NDVI для розміщення в рядках посіву чи на кромці поля.

Переваги:

Можуть цілодобово вимірювати окремі параметри: температуру, вологість, освітленість, електропровідність ґрунту, концентрацію CO₂.

Висока точність і можливість калібрування, інтеграція з системами зрошення або поливу.

Дані надходять в режимі онлайн за встановленими параметрами.



Рис. 1.14. Польові сенсори для отримання цифрової інформації.

Джерело: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169913001579>

Обмеження:

Отримані дані актуальні тільки для конкретної точки або невеликої ділянки.

Потрібна періодична технічна підтримка, обслуговування обладнання.

Приклад:

«Наземні сенсорні комплекси фіксують мікрокліматичні показники, стан ґрунту й атмосфери, слугують для калібрування супутникових та аерознімків. Вони є складовою частиною “розумного поля”» (рис.1.14).

Мобільні комплекси (сенсори на тракторах, автомобілях, ручні сканери, наземні безпілотні апарати - роботи) - це транспортні засоби, оснащені сенсорами та сканерами, які здійснюють збір даних у процесі руху полем. Мобільні комплекси можуть бути змонтовані на тракторах, автомобілях, квадроциклах або пересувних безпілотних платформах, а також виконані у вигляді ручних сканерів. Вони дозволяють здійснювати зондування посівів і ґрунту з високою деталізацією та оперативністю безпосередньо під час

виконання агротехнологічних операцій (обробіток, підживлення, полив) (рис.1.15).

Переваги:

Дозволяють інтегрувати збір даних у процес обробітку (наприклад, під час обприскування, сівби чи збирання).

Можуть поєднувати GPS, спектральні сенсори, камери високої роздільної здатності.



Рис. 1.15. Принципова схема робототехнічної системи з інтелектуальною візуальною функцією. Джерело: <https://www.mdpi.com/2075-1702/10/10/913>

Обмеження:

- Для експлуатації мобільних комплексів потрібен підготовлений технічний персонал.
- Технічне рішення потребує постійного контролю та обслуговування.
- Не покривають великі площі “безперервно”, як супутники.

Роз’яснення: Роздільна здатність – це розмір площі, яку показує один піксель на знімку. Наприклад, при 10×10 м один піксель охоплює 100 м², де може бути до 50 000 рослин пшениці. Ми бачимо лише середнє значення для всієї цієї площі. Через це супутник фіксує проблему вже тоді, коли вона поширилася на велику ділянку, але не може «побачити» маленькі вогнища на початку.

Таблиця 1.8 Порівняння комплексів

Платформа	Площа, га	Роздільна здатність	Частота знімків	Вартість	Приклади
Супутник	1000 – 1 000 000	10–30 м (безкоштовно)	5–16 днів	Мінімальна	Sentinel, Landsat
Дрон (БПЛА)	1–200	2–20 см	В будь-який час	Середня (разова)	DJI Phantom, Parrot
Наземні сенсори	0,01–1	Точкова	цілодобово	Середня/висока	Metos, iMetos
Мобільні комплекси	1–1000	1–50 см	під час роботи	Висока	Trimble, CropScan

Як вибрати комплекси для задач агронома?

- **Великі поля, довготривалий моніторинг:** супутникові дані (недорого, але менш деталізовано), забезпечує виявлення проблем для подальшої деталізації.
- **Швидке виявлення проблем, точкові задачі:** дрони з RGB або мультиспектральними камерами, забезпечує більш детальне оцінювання проблем
- **Точковий контроль, калібрування:** наземні станції й ручні сенсори, виявлення точних агрономічних показників.
- **Інтеграція із технікою:** мобільні платформи (сенсори на тракторах, комбайнах), що дозволяє отримування більш конкретних даних.

Приклади реального застосування:

- Супутниковий NDVI-картування для планування підживлення зернових (без виїзду в поле)
- Обстеження посівів дронами після буревію – виявлення поламаних і знищених площ із точністю до квадратного метра
- Наземні датчики для автоматичного керування поливом в теплицях
- Встановлення мультиспектральних камер на самохідних обприскувачах для “розумного” диференційованого внесення

Важливо пам’ятати: вибір апаратно-програмного комплексу дистанційного моніторингу агроценозів залежить від поставлених завдань, адже кожна система має свої можливості та обмеження. Кожен комплекс вимагає спеціалізованих знань, співпраці з постачальниками й розробниками технічних та програмних рішень, а також відповідних навичок користування.

1.5. Типи сенсорів і камер. Порівняння RGB, мульти- та гіпер-спектральних камер.

Вибір сенсора визначає не лише якість отриманого зображення, але й спектр агрономічної інформації, яку можна отримати під час дистанційного моніторингу. Саме від типу та характеристик камери залежить здатність виявляти невидимі для людського ока ознаки стресу, дефіциту поживних елементів, пошкодження шкідниками чи розвиток хвороб – часто ще на доклінічній стадії, коли на полі візуально не помітно жодних змін.

Правильна комбінація сенсорів у складі апаратно-програмного комплексу дає змогу отримати багатовимірну картину стану посівів: від візуального аналізу до високоточного спектрального та теплового моніторингу. Це, у свою чергу, забезпечує більш своєчасне й ефективне прийняття управлінських рішень у точному землеробстві.

Основні типи камер для агромоніторингу:

RGB-камери — це звичайні кольорові цифрові фото- та відеокамери, які фіксують випромінювання у трьох основних каналах: червоному (Red), зеленому (Green) і синьому (Blue) (рис. 1.16).

- Працюють у діапазоні 400–700 нм.
- Забезпечують кольорові знімки високої якості для візуального огляду.
- Підходять для загального моніторингу та виявлення помітних пошкоджень, але не дозволяють оцінити стан рослин на спектральному рівні.

Переваги:

- Висока роздільна здатність (до 20–60 Мп і більше)
- Доступна ціна, простота використання
- Достатньо для оперативної візуальної діагностики (бур'яни, видимі хвороби, пошкодження, випадання рослин, не рівномірність розвитку)

Обмеження:

- Не “бачать” інфрачервоні діапазони – не визначають ранні стреси, водний дефіцит, хлороз до візуальних симптомів
- Якість оцінки залежить від погодних умов, освітлення, часу доби

Цитата:

«RGB-камери дають змогу виконувати оглядові обстеження окремих ділянок. Вони прості в застосуванні, особливо у поєднанні з квадрокоптерами. Однак їх можливості для глибокого агроаналізу обмежені» (рис. 1.16).

Мультиспектральні камери - фіксують відбиття світла у кількох спеціальних діапазонах: Видимий (червоний, зелений, синій), Близький інфрачервоний (NIR), Часто – червоний край (Red Edge) (рис.1.17).



Рис. 1.16. Камера з каналами RGB + NIR, але з класичною RGB секцією (Spectral Devices). Джерело: <https://spectraldevices.com/cdn/shop/products/msd-rgbn-1-a.png>

Переваги:

- Дають змогу розраховувати основні вегетаційні індекси (NDVI, GNDVI, NDRE тощо).
- Виявляють стрес на ранніх стадіях (дефіцит води, поживних речовин, хвороби до появи видимих симптомів).
- Підходять для інтеграції із дронами, супутниками, мобільними платформами.

Обмеження:

- Вартість вища за RGB (від 1000 до 10000 дол. і більше).
- Не дають “повного спектра” – лише кілька каналів.

Цитата:

«Мультиспектральні камери дозволяють отримувати інформацію по кожному спектральному діапазону окремо, що дає змогу обчислювати багато індексів і точно оцінювати стан рослинності».



Рис. 1.17. MicaSense Altum-PT – поєднання теплової та мультиспектральної камери. Джерело: https://cdn.cloudbf.com/thumb/format/mini_xsize/files/62/img/2024/09/04/202409041025530179133.jpg.webp

Гіперспектральні камери – дуже “чутливі” камери, що фіксують десятки чи навіть сотні спектральних каналів у дуже вузьких інтервалах (від ультрафіолету до середнього інфрачервоного). Використовуються для високоточного аналізу стану культур, ідентифікації хвороб, оцінки сортових відмінностей.

Переваги:

- Виявляють навіть мінімальні відмінності у біохімічному складі рослин, типах стресу, сортах, ґрунтах
- Можна розробляти “власні” індекси для конкретної культури або завдання
- Надточна діагностика, можливість машинного навчання для класифікації станів

Обмеження:

- Висока вартість (від 10 000 доларів і більше)
- Великий обсяг даних, складність обробки, потреба у спеціальному ПЗ й обчислювальних потужностях
- Більше придатна для науки, селекції, розробок нових технологічних рішень

Цитата:

«Гіперспектральні камери дозволяють проводити зйомку у діапазонах, які виходять за межі видимого спектра, – для розробки нових індексів, диференціації сортів, досліджень складу рослин» (рис.1.18).

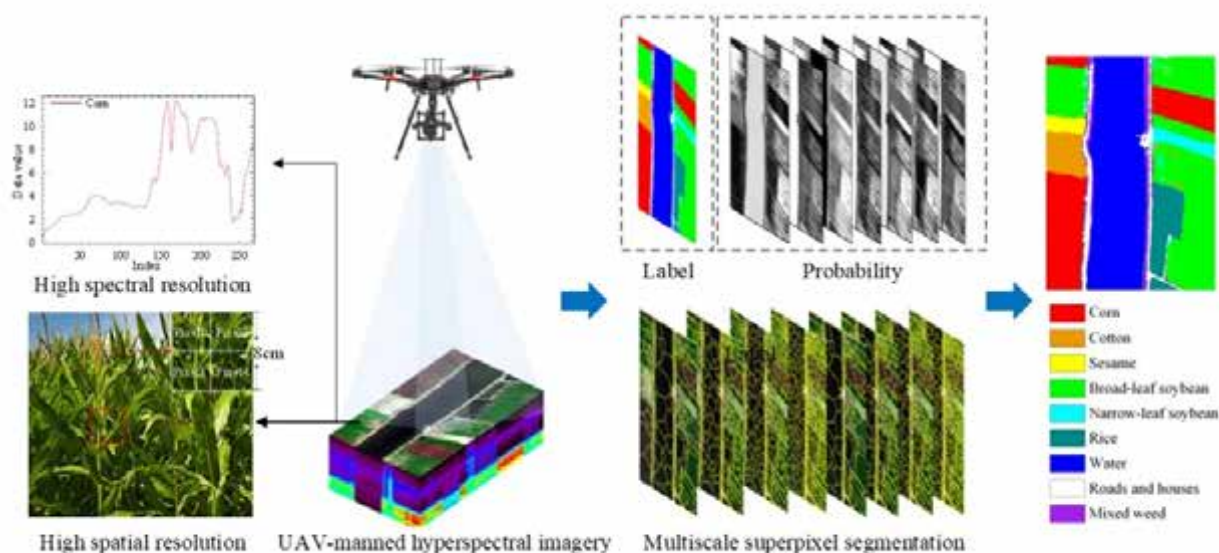


Рис. 1.18. Демонстрація супутнього або аерознімання з гіперспектральними каналами, переходом від мульти- до гіперспектра.
Джерело: <https://terra-droneagri.com/wp-content/uploads/2024/05/remote-sensing-1024x487.webp>

Таблиця 1.9. Порівняння камер для агромоніторингу

Тип камери	Діапазон	Каналів	Вартість	Де викорис- товується	Основні можливості
RGB	Видимий (400–700 нм)	3	Дешева	Оглядова зйомка, облік	Візуальний аналіз, підра- хунок рослин
Мульти- спект- ральна	Видимий + NIR/RedEdge	4–8	Середня Висока	Зонування полів, NDVI, GNDVI	Виявлення стресу, зон, картування
Гіпер- спект- ральна	УФ– Середнє ІЧ	20–300	Висока	Наука, селекція, аналіз	Діагностика, класифікація, точний аналіз

Практичні рекомендації щодо вибору камер

Вибір камери для дистанційного моніторингу залежить від цілей, бюджету та рівня деталізації даних, які необхідно отримати. Оскільки різні сенсори працюють у різних спектральних діапазонах, їх можливості та сфери застосування суттєво відрізняються.

Для базового моніторингу, навчання та “швидкого огляду”

Достатньо сучасної **RGB-камери** (вбудованої у смартфон або дрон).

- Дає змогу швидко виявити явні проблеми – пошкодження рослин, нерівномірність сходів, бур’яни, наслідки вилягання чи затоплення.

- Підходить для візуальної оцінки та фотофіксації змін на полі.
- Обмеження: неможливо побачити фізіологічні стани та стресові фактори, що не проявилися у видимому спектрі.

Для оперативного та точного моніторингу стану посівів

Рекомендована мультиспектральна камера (наприклад, *Parrot Sequoia*, *DJI Phantom 4 Multispectral*).

- Дозволяє отримувати зображення в кількох спектральних діапазонах, необхідних для розрахунку індексів NDVI, NDRE, GNDVI та інших.
- Ефективна для визначення зон стресу, нестачі вологи чи поживних елементів, планування диференційованого внесення добрив і ЗЗР.
- Оптимальне рішення для агровиробників, які хочуть інтегрувати моніторинг у систему точного землеробства.

Для наукових досліджень та складних аналітичних завдань

Використовується **гіперспектральна камера**, яка фіксує сотні вузьких спектральних каналів.

- Дає змогу формувати унікальні спектральні індекси, виявляти конкретні хвороби на ранніх стадіях, аналізувати сортові відмінності, проводити фенотипування.
- Застосовується в наукових інститутах, дослідницьких господарствах та у високоточних проєктах.
- Недолік – висока вартість і складність обробки великих обсягів даних.

Додатково:

Тепловізійні камери – це сенсори, які реєструють теплове (інфрачервоне) випромінювання у далекому інфрачервоному діапазоні (приблизно 8000–14000 нм). Кожен об'єкт із температурою вище абсолютного нуля випромінює інфрачервоні хвилі, інтенсивність і довжина яких залежать від його температури.

У сільському господарстві тепловізори дозволяють:

Оцінювати температуру листової поверхні – важливий показник водного балансу рослин. При дефіциті вологи у ґрунті рослини зменшують транспірацію, що призводить до нагрівання листя.

Виявляти зони посухи – ділянки поля з підвищеною температурою свідчать про стрес від нестачі води.

Визначати локальні джерела випаровування вологи – наприклад, після дощу чи поливу теплові камери можуть виявляти ділянки з підвищеною вологістю.

Моніторити ефективність систем зрошення – за допомогою теплових карт можна виявити нерівномірне зволоження.

Виявляти стресові фактори – підвищення температури листків може сигналізувати не лише про посуху, але й про ураження хворобами, пошкодження кореневої системи або вплив високих температур довкілля.

Перевагою тепловізійних камер є можливість отримувати дані у будь-який час доби, оскільки для фіксації випромінювання не потрібне сонячне світло. Це дозволяє проводити моніторинг навіть уночі або в умовах хмарності.

Тепловізори ефективно інтегруються з мульти- та гіперспектральними камерами, доповнюючи спектральний аналіз інформацією про фізіологічний стан рослин, отриманою на основі температурних показників.

«Тепловізори дозволяють проводити аналіз температури поверхні рослин або ґрунтів, будувати температурні карти поля, які допомагають оптимізувати полив і попередити втрати врожаю через посуху» (рис.1.19).

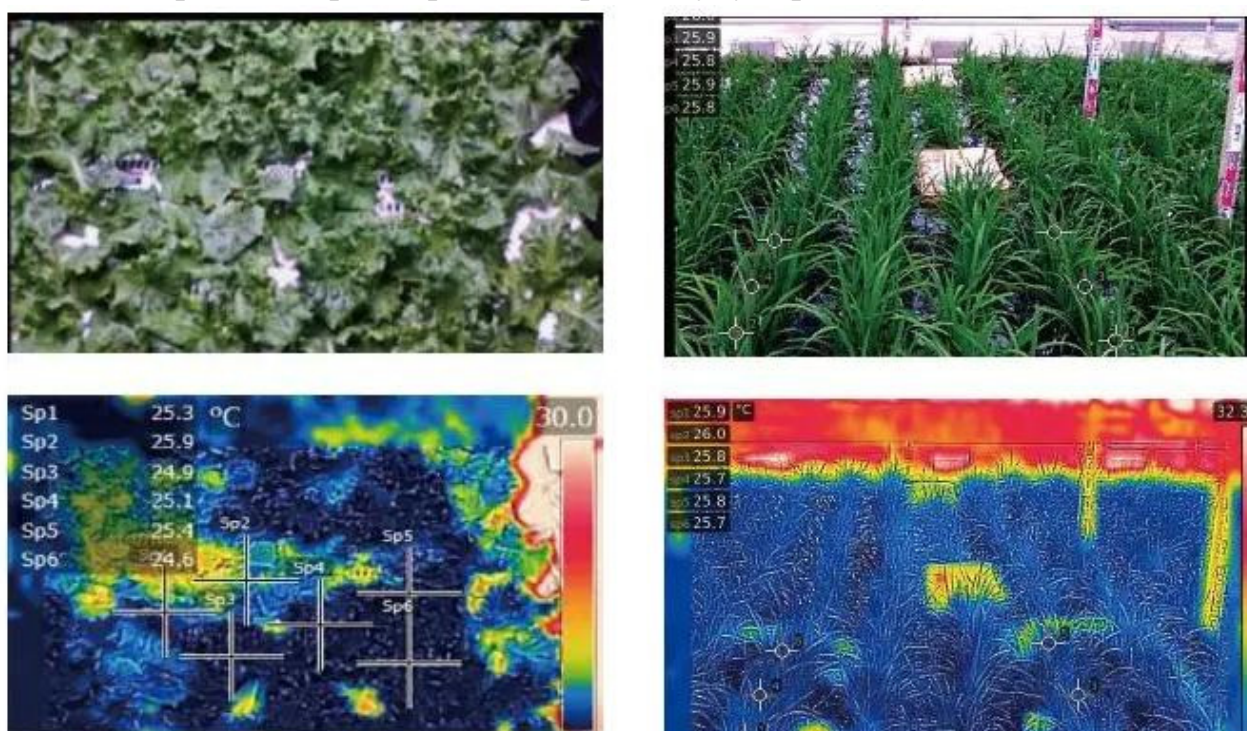


Рис. 1.19. Тепловізійна зйомка рослин. Джерело: <https://liberal-technology.com/wp-content/uploads/2024/08/%E5%9B%BE%E7%89%875-1-1.png>

Тепловізійні камери фіксують температурні відмінності на поверхні листків і ґрунту. Це дає змогу виявляти тепловий стрес, дефіцит води та оцінювати ефективність агротехнологічних дослідів.

Важливо пам'ятати: Правильний вибір сенсора – це основа сучасного моніторингу: від простих RGB-камер до мульти- та гіперспектральних систем, тепловізорів. Чим складніше завдання, тим вищі вимоги до технічних характеристик сенсорного обладнання, точності знімання та якості оброблення отриманих даних.

1.6. Тепловізійний моніторинг у агрономії

Тепловізійний моніторинг – це дистанційне вимірювання температури поверхні рослин, ґрунту або інших об’єктів за допомогою тепловізорів – спеціальних камер, чутливих до інфрачервоного (ІЧ) випромінювання. На відміну від звичайних RGB- або мультиспектральних камер, тепловізори фіксують не відбиття світла, а власне теплове випромінювання об’єкта. Результатом такої зйомки є “теплова карта поля” – кольорова візуалізація розподілу температур, де кожна ділянка має свій температурний індекс.

Важливо:

- Кожен об’єкт випромінює тепло – у вигляді інфрачервоних хвиль.
- Тепловізор фіксує енергію й формує зображення, де різні температури відображаються різними кольорами (зазвичай: синій – холодніше, червоний – гарячіше).
- Застосовують як окремі тепловізори (ручні або встановлені на техніку), так і дрони з тепловізійною камерою.

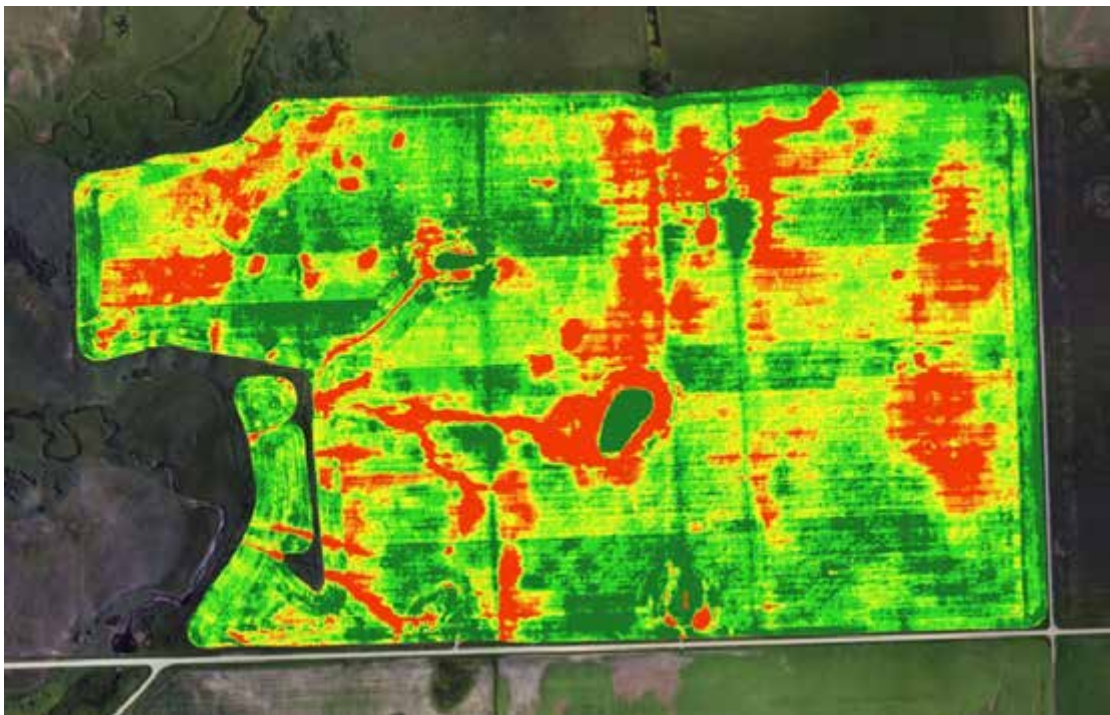


Рис. 1.20. Теплова карта ґрунту. Джерело: <https://abzdrone.com/blog/how-a-thermal-camera-can-help-your-farming/?lang=en>

Тепловізійний моніторинг дозволяє: виявляти приховані проблеми, які ще не проявилися у видимому спектрі – наприклад, водний стрес, ураження кореневої системи, нестачу поживних речовин або ураження хворобами. Рослини, що зазнають стресу, зазвичай нагріваються швидше через зменшення транспірації — випаровування води через листки. На теплових знімках це проявляється у вигляді «гарячих плям» (рис. 1.20).

Виявлення водного стресу у рослин

- За дефіциту води температура листків підвищується (менше випаровування, гірше охолодження).
- На тепловізійній карті такі ділянки стають “гарячими плямами” – сигнал для оперативного поливу чи аналізу причин.

«Тепловізори дозволяють оцінити температурні аномалії на полі, виявити локальні ділянки з недостатнім водозабезпеченням ще до візуальних проявів стресу» (рис. 1.21).

Оцінка ефективності і рівномірності поливу

- Тепловізор допомагає виявити “сухі” та “перезволожені” ділянки, нерівномірність роботи зрошувальної системи.
- Знижується перевитрата води, підвищується врожайність.

Діагностика хвороб та ушкоджень

- Уражені хворобою чи шкідниками рослини часто мають іншу температуру, ніж здорові.
- Дозволяє локалізувати початкові осередки фузаріозу, гнилі, пошкодження коренів.

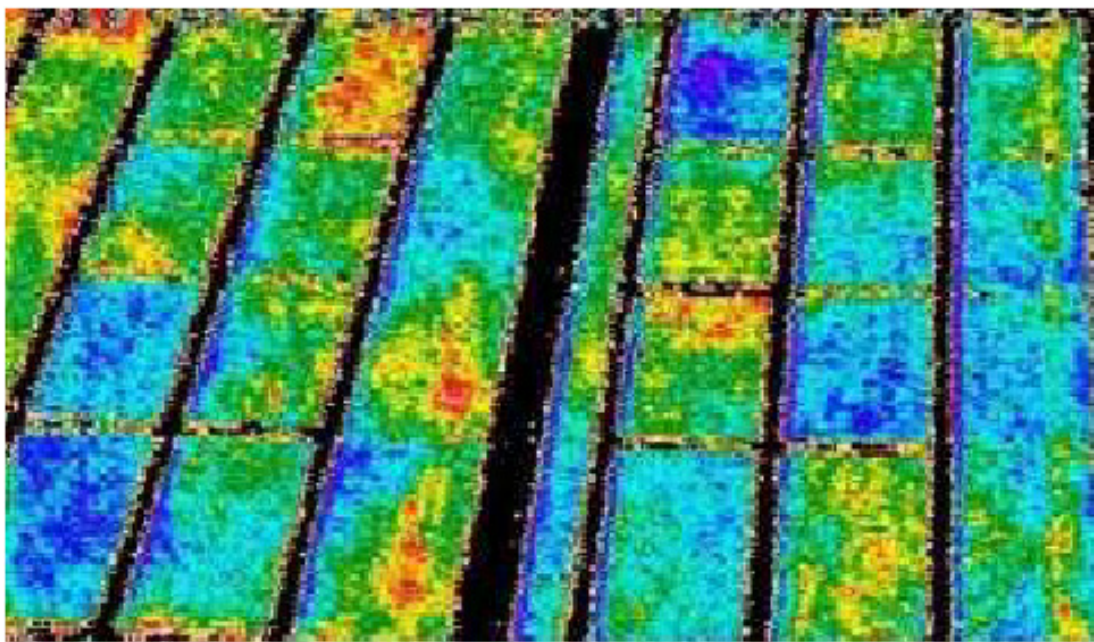


Рис. 1.21. Вміст води на сільськогосподарських культурах за допомогою тепловізійного дослідження. Джерело: https://www.researchgate.net/figure/Water-content-of-crop-fields-with-thermal-imaging-Anonymous-2001_fig8_277306789

Аналіз стану ґрунту та мульчі

- Вимірювання температури ґрунту (перед посівом, після обробки) – оцінка готовності до висіву, ризиків заморозків.
- Виявлення зон ущільнення, неравномірного покриття мульчею.

Послідовність дій при телевізійному моніторингу:

1. Вибір пристрою:

- Ручний тепловізор: Fluke, Testo, Seek Thermal.
- БПЛА із тепловізійною камерою: DJI Mavic 2 Enterprise Dual).

2. Планування зйомки:

- Вибір оптимального часу для проведення скаутингу, оптимально – у безхмарну, суху погоду, в середині дня, щоб уникнути конденсату.
- Формування маршруту польоту дрона, визначення висоти польоту та необхідної щільності кадрів.

3. Збір і обробка даних:

- Створення температурних карт у відповідних програмах: Pix4D, DJI Terra, Agisoft Metashape.
- Порівняння із мультиспектральними картами для оцінки стану.

4. Інтерпретація:

- Виявлення “гарячих зон” – причини можуть бути різні: дефіцит вологи, хвороби, механічні пошкодження, погане коріння.
- Проведення польового обстеження ділянок, на яких виявлено проблеми, та ухвалення рішень щодо усунення їхніх причин або коригування технологічних заходів.

Типи тепловізорів та їх застосування

Ручні тепловізори – це компактні портативні пристрої, схожі на фотокамеру або навіть смартфон із ІЧ-датчиком. Вони дозволяють виконувати точкові або вибіркові вимірювання температури на об’єктах – листках рослин, стеблах, поверхні ґрунту, обладнанні або тваринах. Такі прилади особливо корисні для локальної діагностики у теплицях, дослідних ділянках, агрохімічних лабораторіях та під час виїзних обстежень (рис.1.22.).

Тепловізори, інтегровані в дрони (БПЛА) – це тип сенсорів, призначених для масштабного аеротермального моніторингу та створення температурних карт великих площ із точним геопросторовим прив’язуванням. Тепловізори встановлюються на мультикоптерах або літакових БПЛА з системами стабілізації (gimbal) та автоматичним записом телеметрії (GPS, IMU, висота).

Тепловізійні модулі, інтегровані в сільськогосподарську техніку – стаціонарні або напівстаціонарні ІЧ-модулі, змонтовані на тракторах, комбайнах, обприскувачах або роботизованих системах. Вони дозволяють здійснювати моніторинг у реальному часі під час роботи техніки, зокрема контролювати температуру ґрунту, листового покриття або агрегатів машин (рис.1.23).

Ключові характеристики тепловізорів

Діапазон вимірювання температур: більшості сучасних моделей достатньо для агровимірювань (від -20°C до +150°C).



Рис. 1.22. Ручний тепловізор. Джерело: <https://www.camerarock.com/wp-content/uploads/2024/08/800x800-4-1-600x600.jpg>



Рис. 1.23. Телевізор на БПЛА. Джерело: <https://www.droneblog.com/wp-content/uploads/2022/08/Drones-and-Thermal-Imaging-Explained-for-Beginners-960x640.jpg>

Теплова чутливість (NETD): чим менше значення (наприклад, $<0,05^{\circ}\text{C}$), тим чутливіший прилад – можна “ловити” найменші відмінності температур між рослинами.

Просторова роздільна здатність: чим більше пікселів у матриці (наприклад, 320×240 , 640×480), тим детальніша карта температури.

Інтеграція з GPS: дозволяє прив’язати дані до конкретних координат на полі для точного аналізу.

Важливо пам’ятати: Тепловізійний моніторинг – це “раннє попередження” для агронома. Він дозволяє реагувати на стрес-фактори ще до втрати врожаю, оптимізувати ресурси, підтримувати рослини в максимальній формі.

Рекомендовані джерела інформації:

ISO 21895:2020 – Unmanned Aerial Vehicles – Classification and terminology

ArduPilot Documentation – <https://ardupilot.org>

PX4 Autopilot – <https://px4.io/>

NATO STANAG 4586 – Standard Interfaces of UAV Control Systems

Публікації IEEE Robotics and Automation Magazine

1.7. Законодавче забезпечення використання дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів в Україні

Розвиток дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в Україні супроводжується формуванням комплексної нормативно-правової системи їх використання. БПЛА стали інструментом цифрової трансформації економіки – від агроскаутингу та дистанційного зондування до інспекції інфраструктури та моніторингу довкілля. Водночас експлуатація повітряних суден, навіть безпілотних, створює ризики для безпеки повітряного руху, життя людей та національної безпеки, що зумовлює необхідність жорсткого правового регулювання.

Правове регулювання у сфері БПЛА має превентивний характер. Його основною метою є запобігання авіаційним інцидентам, захист повітряного простору та забезпечення балансу між інноваційною діяльністю й публічними інтересами. У цьому контексті оператор БПЛА виступає суб’єктом підвищеної відповідальності, оскільки він здійснює діяльність у сфері підвищеної небезпеки.

Правове регулювання у сфері використання БПЛА має превентивний характер і спрямоване на:

- забезпечення безпеки польотів;
- запобігання авіаційним інцидентам;
- захист повітряного простору держави;
- дотримання прав і свобод громадян;

забезпечення балансу між інноваційним розвитком технологій та публічними інтересами.

У цьому контексті оператор безпілотного літального апарата виступає суб'єктом діяльності підвищеної небезпеки та несе відповідальність за дотримання вимог законодавства під час виконання польотів.

Для аграрного сектору правове регулювання має особливе значення. Використання БПЛА для створення ортофотопланів, NDVI-карт, аналізу стану посівів або внесення засобів захисту рослин повинно здійснюватися з дотриманням вимог повітряного законодавства, правил безпеки польотів і норм захисту персональних даних. Недотримання правових вимог може призвести до адміністративної або кримінальної відповідальності та зупинки виробничих процесів.

Нормативно-правова база використання БПЛА в Україні

Правове регулювання використання безпілотних літальних апаратів в Україні базується на системі нормативно-правових актів різного рівня.

До основних документів, що регламентують використання повітряного простору та експлуатацію БПЛА, належать:

- **Конституція України**, яка гарантує право громадян на безпеку, приватність та захист від незаконного втручання в особисте життя;
- **Повітряний кодекс України**, який визначає правові основи діяльності у сфері авіації та встановлює порядок використання повітряного простору;
- **Закон України «Про державний кордон України»**, що регулює питання перетинання державного кордону повітряними суднами;
- **Постанова Кабінету Міністрів України № 954 від 6 грудня 2017 року «Про затвердження Положення про використання повітряного простору України»**;
- **Авіаційні правила України «Правила використання повітряного простору України»**, затверджені наказом Державної авіаційної служби України та Міністерства оборони України.

Зазначені нормативно-правові акти визначають:

- порядок використання повітряного простору;
- правила виконання польотів;
- процедуру отримання дозволів на польоти;
- вимоги до безпеки авіаційної діяльності;
- відповідальність за порушення встановлених правил.

Центральним органом виконавчої влади у сфері державного регулювання цивільної авіації є Державна авіаційна служба України, яка здійснює контроль за дотриманням авіаційного законодавства та затверджує відповідні авіаційні правила.

Таблиця 1.10. Нормативна база

Назва документів	Посилання на сайти
Договір з відкритого неба	https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_316#Text
Повітряний кодекс України	https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3393-17#Text
Закон України "Про державний кордон України"	https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1777-12#Text
Постанова кабінету Міністрів України "Про затвердження Положення про використання повітряного простору України"	https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/954-2017-%D0%BF#Text
Наказ Державної авіаційної служби України "Про затвердження Авіаційних правил України "Правила використання повітряного простору України"	https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1056-18#Text

ВИКОРИСТАННЯ ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ

Увага! З 24 лютого 2022 року відповідно до Закону України "Про правовий режим воєнного стану" в Україні введено режим воєнного стану!

З 24 лютого 2022 року закрито повітряний простір України для цивільних користувачів повітряного простору, включаючи й безпілотні повітряні літальні апарати (БПЛА).

Рішення щодо можливості використання повітряного простору безпілотними повітряними суднами в конкретній області ухвалює Генеральний штаб Збройних Сил України. Для можливості забезпечення належного використання безпілотних повітряних суден у сільському господарстві суб'єктам господарювання необхідно звернутися до відповідної обласної військової адміністрації на предмет можливості використання на конкретній території (у районі) безпілотних повітряних суден.

У практичній діяльності суб'єкти господарювання, які планують використовувати БПЛА у цивільних цілях, повинні отримати погодження відповідних органів військового управління або обласних військових адміністрацій щодо можливості виконання польотів у конкретному регіоні.

Таким чином, в умовах воєнного стану використання безпілотних літальних апаратів підлягає додатковому контролю з боку органів сектору безпеки і оборони.

Таблиця 1.11. Правових обмежень щодо використання повітряного простору України

№	Вид обмеження	Підстава встановлення	Орган, що приймає рішення	Характер дії	Що дозволено в межах зони
1	Повна заборона (постійна)	Над атомними станціями, ГЕС, греблями, важливими державними об'єктами, природними заповідниками, об'єктами підвищеної екологічної безпеки	Державна авіаційна служба України	Постійна	Діяльність в інтересах об'єкта, для якого встановлено заборону
2	Повна заборона (загроза безпеці)	Загроза національній безпеці, суверенітету, територіальній цілісності; збройний конфлікт; спеціальні операції	Державіаслужба на запит Генштабу ЗСУ або СБУ	Постійна / на період загрози	Діяльність сил безпеки та міжнародних місій (ООН, ОБСЄ, Червоний Хрест)
3	Обмеження (постійні)	Захист об'єктів підвищеної небезпеки; державні пріоритети	Державіаслужба за поданням держорганів	Постійна	Діяльність в інтересах суб'єктів, для яких встановлено обмеження
4	Обмеження (тимчасові, за заявкою)	Проведення навчань, авіаційних робіт, випробувань, повітряних парадів, масових заходів	Органи об'єднаної цивільно-військової системи ОНР	Тимчасова	Діяльність згідно з умовами обмеження
5	Обмеження (оперативні)	Пошук і рятування, перехоплення порушників, стихійні лиха, аварії, надзвичайні ситуації	Органи об'єднаної цивільно-військової системи ОНР	Тимчасова (негайна)	Діяльність служб реагування
6	Обмеження під час масових заходів державного рівня	Забезпечення безпеки офіційних заходів	Органи ОНР	Тимчасова	Лише уповноважені польоти
7	Спеціальні винятки	Виконання спостережних польотів за міжнародними договорами	Відповідно до міжнародних зобов'язань України	За умов договору	Спостережні польоти згідно з Договором про відкрите небо

Нормативна база

- Повітряний кодекс України: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3393-17>
- Кодекс України про адміністративні порушення: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/80731-10#Text>
- Кримінального кодексу України: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2341-14#Text>
- Закон України “Про транспорт”: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/232/94-%D0%B2%D1%80>
- Постанова Кабінету Міністрів від 6 грудня 2017 року № 954 "Про затвердження Положення про використання повітряного простору України": <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/954-2017-%D0%BF#Text>
- Наказ Державної авіаційної служби України та Міністерства оборони України від 11 травня 2018 року № 430/210 "Про затвердження Авіаційних правил України «Правила використання повітряного простору України»: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1056-18?fbclid=IwAR1-WfL95HKMfnFYKtS1cgJxpoEc-UO1ehJ4TviG953hY-TFsMOsnoIVsKo#Text>

Конституційні та законодавчі засади регулювання

Основою правового регулювання є Конституція України, яка закріплює право громадян на безпеку, приватність та захист від незаконного втручання в особисте життя. У контексті БПЛА це означає, що держава має право встановлювати обмеження на польоти задля забезпечення національної безпеки та охорони прав інших осіб. Будь-які нормативні акти щодо використання дронів повинні відповідати конституційним принципам верховенства права.

Додаток1. Система державного регулювання використання БПЛА.



Базовим спеціалізованим актом є Повітряний кодекс України. Він визначає поняття повітряного судна, до яких відносяться й безпілотні літальні апарати, та встановлює порядок використання повітряного простору. Кодекс передбачає обов'язковість дотримання авіаційних правил, а також визначає відповідальність за порушення вимог безпеки польотів.

Додатково застосовується Закон України «Про використання повітряного простору України», який деталізує процедуру розподілу повітряного простору та погодження польотів. Для оператора це означає необхідність перевірки статусу повітряного простору перед кожним польотом. Таким чином, законодавчий рівень формує фундамент правового режиму експлуатації БПЛА.

Захист персональних даних та інформаційна безпека

Під час експлуатації БПЛА часто здійснюється фото- та відеофіксація територій, що може містити зображення фізичних осіб або приватної власності. У такому випадку застосовуються положення Закон України «Про захист персональних даних». Персональні дані – це будь-яка інформація, що дозволяє прямо чи опосередковано ідентифікувати особу.

Оператор повинен дотримуватися принципів мінімізації збору даних, законності їх обробки та недопущення неправомірного поширення. Публікація аерофотознімків без згоди осіб або без законної підстави може створити підстави для цивільно-правових позовів. Особливо актуальним це є для агропідприємств, що використовують БПЛА поблизу населених пунктів.

Окрім персональних даних, БПЛА можуть фіксувати інформацію про критичну інфраструктуру або військові об'єкти. У таких випадках можливе застосування норм щодо захисту інформації з обмеженим доступом. Таким чином, оператор має забезпечити не лише безпеку польоту, а й інформаційну безпеку зібраних матеріалів.

Орган державного регулювання та авіаційні правила

Центральним органом державного регулювання є Державна авіаційна служба України. Вона здійснює контроль у сфері цивільної авіації та затверджує авіаційні правила України. Саме ці правила встановлюють технічні та експлуатаційні вимоги до використання БПЛА.

Авіаційні правила визначають допустимі параметри польотів, порядок здійснення операцій у межах прямої видимості (VLOS) та поза нею (BVLOS), а також вимоги до безпеки. Вони мають підзаконний характер, але є обов'язковими для виконання всіма суб'єктами авіаційної діяльності.

Для аграрних підприємств це означає, що навіть у випадку використання БПЛА на власних полях необхідно дотримуватися встановлених правил. Повітряний простір не є приватною власністю, тому його використання підлягає державному контролю.

Порядок використання повітряного простору цивільними повітряними дронами

Згідно пункту 4 розділу II Авіаційних правил Наказ 11.05. 2018 рік №430/210 Про затвердження Авіаційних правил України «Правила використання повітряного простору України» польоти безпілотних повітряних суден масою до 20 кг включно виконуються без подання заявок на використання повітряного простору, без отримання дозволів на використання повітряного простору, без інформування органів управління Повітряних Сил Збройних Сил України та органів об'єднаної цивільно-військової системи організації повітряного руху України, органів Державної прикордонної служби України, органів обслуговування повітряного руху та відомчих органів управління повітряним рухом, за умови дотримання таких вимог:

- 1) польоти виконуються без перетинання державного кордону України;
- 2) польоти виконуються поза межами встановлених заборон та обмежень використання повітряного простору, крім випадків, установлених Положенням про використання повітряного простору, затвердженим постановою Кабінету Міністрів України від 6 грудня 2017 року № 954 (далі - Положення);
- 3) польоти виконуються не ближче 5 км від зовнішніх меж злітно-посадкових смуг аеродромів або не ближче 3 км від зовнішніх меж злітно-посадкової смуги злітно-посадковий майданчик/вертодромів, крім випадків узгодження з експлуатантом аеродрому/злітно-посадковий майданчик/вертодрому;
- 4) польоти виконуються не ближче 500 м від пілотованих повітряних суден;
- 5) польоти не виконуються над:
скупченням людей на відкритому просторі та над місцями щільної забудови;
об'єктами (зонами), які визначені Міністерством оборони України, Міністерством інфраструктури України, Міністерством внутрішніх справ України, Державною прикордонною службою України, Службою безпеки України, Національною поліцією України, Національною гвардією України, Державною фіскальною службою України, Службою зовнішньої розвідки України, Управлінням державної охорони України, іншими військовими формуваннями та правоохоронними структурами, утвореними відповідно до законів України, та відносно яких здійснюється охорона / державна охорона (за умови позначення території навколо цих об'єктів інформаційними знаками про заборону польотів безпілотних повітряних суден та/або шляхом оприлюднення меж такої заборони), крім випадків виконання польотів за дозволом зазначених вище повноважних органів;
- 6) польоти виконуються в межах прямої видимості (VLOS);
- 7) максимальна висота польоту не вище:

- 120 м над рівнем земної (водної) поверхні поза межами диспетчерської зони (control zone), аеродромна зона польотної інформації, зони та райони органів управління повітряним рухом відомчих органів органам управління повітряним рухом, спеціально встановлених зон, іншого спеціально зарезервованого повітряного простору;

- 50 м над рівнем земної (водної) поверхні в межах диспетчерської зони (control zone), аеродромна зона польотної інформації, зони та райони органів управління повітряним рухом відомчих органів органам управління повітряним рухом, спеціально встановлених зон, іншого спеціально зарезервованого повітряного простору, якщо інформація про фактичний статус елементів структури повітряного простору на час виконання польоту відсутня;

- 50 м над статичними перешкодами на горизонтальній відстані не більше 100 м від таких перешкод, як відхилення від зазначених вище обмежень по висоті, на запит власника такого об'єкту;

8) швидкість польоту безпілотного повітряного судна складає не більше 160 км/год.

В інших випадках польоти безпілотного повітряного судна масою до 20 кг включно та усі без винятку польоти безпілотного повітряного судна масою більше 20 кг виконуються у межах спеціально встановлених зон та маршрутів з дотриманням вимог щодо подання заявок на використання повітряного простору, отримання дозволів та умов використання повітряного простору, інформування органів управління Повітряних Сил Збройних Сил України, органів Державної прикордонної служби України, органів об'єднаної цивільно-військової системи організації повітряного руху України, органів обслуговування повітряного руху/управління повітряним рухом.

Перелік порушень порядку використання повітряного простору України (рис. 1.24).

Згідно з пунктом 46 Положення «Про затвердження Положення про використання повітряного простору України» до порушень порядку використання повітряного простору України належать:

- використання повітряного простору без подання заявок, отримання дозволу та/або умов його використання, крім випадків, що передбачені цим Положенням, а також недотримання умов використання повітряного простору;
- недотримання умов використання повітряного простору України або плану польоту (відхилення від маршруту, заданого рівня польоту, зліт чи посадка повітряного судна з незапланованого (на незапланований) або закритий аеродром, постійний злітно-посадковий майданчик/вертодром тощо) без дозволу або погодження органу обслуговування повітряного руху (органу управління повітряним рухом), крім аварійних випадків;

Пам'ятайте:

 Ви відповідальні за кожен політ	Ви несете юридичну відповідальність за кожен політ. Розумійте правила - порушення може призвести до кримінальної відповідальності.	 Тримайте дистанцію	Незаконно проводити польоти у забудованих територіях (вулиці, міста). Також не можна літати біля аеропортів та злітних смуг.
 ПЕРЕД кожним польотом перевіряйте справність дрона	Перед кожним польотом перевіряйте, що Ваш БПЛА не пошкоджений, усі компоненти працюють згідно з інструкцією.	 Тримайте дистанцію 50 метрів	Не керуйте Ваш БПЛА ближче ніж 50 м від людей, транспорту, будівель чи споруд, або над групами людей на будь-якій висоті.
 Дрон завжди у зоні спостереження	Ви маєте завжди бачити БПЛА під час керування.	 Зважайте на права приватності	Думайте, що саме Ви можете робити з будь-якими знімками, зважаючи на закони про приватність.
 ВИ відповідальні за попередження зіткнень	Саме Ви відповідаєте за уникнення зіткнень з іншими людьми чи об'єктами, включно з повітряними суднами.	 Дозвіл на використання дронів для оплачуваної роботи	Якщо Ви плануєте використовувати БПЛА для будь-якої комерційної діяльності, Ви маєте отримати дозвіл в авіаційній інспекції.

Рис. 1.24. Правила поводження з БПЛА. Джерело: <https://legalaid.wiki>

- політ групи повітряних суден, кількість яких перевищує зазначену в заявці;
- порушення вимог щодо порядку перетинання державного кордону та виконання польоту в зоні з особливим режимом використання повітряного простору України;
- виконання без дозволу повітряного судна польоту в забороненій зоні або в зонах обмеження польотів та тимчасово зарезервованого повітряного простору України під час їх використання;
- політ повітряного судна, яке не відповідає на запит засобів радіолокаційної системи державного розпізнавання, крім повітряного судна, на яких апаратура радіолокаційної системи державного розпізнавання не передбачена або які повертаються з несправною апаратурою радіолокаційної системи державного розпізнавання з аеродромів, злітно-посадкових майданчиків/вертодромів, де ремонт такої апаратури неможливий;
- невиконання вимог до інформування органів контролю за дотриманням порядку використання повітряного простору України про виконання польотів та провадження іншої діяльності з використання повітряного простору України.

Чи потрібно реєструвати БПЛА?

Прямої вказівки на обов'язкову реєстрацію цивільних повітряних БПЛА (безпілотників) законодавством на даний момент не передбачено. Але якщо потрібно здійснити політ в зонах з обмеженнями, або вага вашого безпілотника становить понад 20 кг, то для цього потрібно отримати дозвіл на використання повітряного простору. Процес отримання цього дозволу регулюється Наказ 11,05.2018 р №430/210 Про затвердження Авіаційних правил України «Правила використання повітряного простору України». Відповідний акт регулює порядок видачі таких дозволів, а детальну інформацію можна уточнити на офіційному сайті Державної авіаційної служби України.

Обмеження висоти, швидкості та принцип прямої видимості

У спрощеному режимі експлуатації максимальна висота польоту становить 120 метрів. Це обмеження пов'язане з розмежуванням зон повітряного простору між безпіотною та пілотованою авіацією. Дотримання цього параметра мінімізує ризик зіткнення з літаком або гелікоптером.

Максимальна швидкість польоту обмежується 160 км/год. Обмеження швидкості знижує ризик серйозних наслідків у разі падіння або втрати контролю над апаратом. Кінетична енергія безпілотника прямо пропорційна квадрату швидкості, тому її контроль є критично важливим.

Принцип VLOS (Visual Line of Sight) передбачає, що оператор повинен бачити апарат неозброєним оком. Це дозволяє оперативно реагувати на зміну обстановки, появу перешкод або інших повітряних суден. Для агроскаутингу VLOS є стандартним режимом роботи.

Заборонені зони та спеціальні режими

Польоти забороняються або обмежуються поблизу аеродромів, військових об'єктів, стратегічної інфраструктури та місць масового скупчення людей. Такі обмеження пов'язані з підвищеним рівнем ризику та необхідністю захисту національної безпеки.

Перед виконанням польоту оператор повинен перевірити наявність обмежень у відповідній зоні. Ігнорування заборон може призвести до конфіскації обладнання або притягнення до відповідальності. Особливо це актуально під час воєнного стану.

Для агропідприємств це означає необхідність планування польотів з урахуванням географічного розташування полів та наявності поблизу стратегічних об'єктів. Планування маршрутів повинно враховувати правовий режим повітряного простору.

Відповідальність за порушення законодавства

Адміністративна відповідальність передбачає накладення штрафів за порушення правил використання повітряного простору. Розмір штрафів залежить від характеру порушення.

Цивільна відповідальність настає у випадку завдання шкоди майну або здоров'ю третіх осіб. Оператор або підприємство зобов'язані відшкодувати завдані збитки.

Кримінальна відповідальність може наставати у разі створення загрози національній безпеці або незаконного втручання в роботу авіаційного транспорту. Таким чином, правові наслідки порушень можуть бути багаторівневими.

Заборона та обмеження щодо використання повітряного простору України

Використання повітряного простору України може бути заборонено або обмежено рішенням Державна авіаційна служба України та органами об'єднаної цивільно-військової системи організації повітряного руху відповідно до вимог Положення про використання повітряного простору. Заборона встановлюється над стратегічно важливими об'єктами (атомні електростанції, гідроелектростанції, греблі, об'єкти підвищеної екологічної небезпеки, державні об'єкти), а також у випадках загрози національній безпеці, суверенітету чи територіальній цілісності України. Такі рішення можуть прийматися також під час збройного конфлікту або проведення спеціальних операцій.

Обмеження використання повітряного простору вводяться з метою забезпечення безпеки польотів і виконання спеціальних завдань, зокрема для перехоплення повітряних суден-порушників, проведення пошуково-рятувальних операцій, запуску космічних об'єктів, військових навчань, випробувальних польотів, практичних пусків ракет, масових державних заходів тощо. Заборони встановлюються на постійній основі, тоді як обмеження можуть мати як постійний, так і тимчасовий характер.

Постійні заборони та обмеження встановлюються Державіаслужбою за поданням відповідних державних органів або на запит Генерального штабу Збройних Сил України чи Служби безпеки України. Тимчасові обмеження можуть вводитися органами цивільно-військової системи організації повітряного руху на підставі заявок користувачів повітряного простору або негайно – у разі виникнення надзвичайних ситуацій, стихійних лих чи інших подій, що загрожують життю та здоров'ю людей. При цьому у зонах заборон або обмежень допускається діяльність тих суб'єктів, в інтересах яких такі режими встановлено, а також виконання спостережних польотів відповідно до міжнародних зобов'язань України. Джерело: <https://legallaid.wiki/>

Висновок

Дистанційно керовані безпілотні літальні апарати є складними технічними системами, які поєднують аеродинамічні платформи, сенсорне обладнання, апаратно-програмні комплекси керування та засоби збору й обробки даних. Їх класифікація за середовищем функціонування, конструкцією, призначенням і способом запуску дозволяє систематизувати різноманіття сучасних ДК БПЛА та чітко орієнтуватися у можливостях кожного типу.

Розгляд технічних характеристик і прикладів застосування показує, що ефективність використання ДК БПЛА визначається не лише льотними параметрами, а й правильним вибором сенсорів, апаратно-програмного комплексу та методів обробки даних. Особливе значення у сучасних умовах мають мультиспектральні та тепловізійні системи, які дозволяють виявляти приховані стресові фактори та оперативно реагувати на зміни стану агроценозів.

Контрольні завдання для самоперевірки знань

1. Дайте визначення дистанційно керованого безпілотного літального апарата та охарактеризуйте його основні складові.
2. Поясніть класифікацію ДК БПЛА за середовищем функціонування та наведіть приклади для кожної групи.
3. У чому полягають конструктивні відмінності між літаковими, мультироторними та гібридними ДК БПЛА?
4. Охарактеризуйте основні напрями застосування ДК БПЛА залежно від їх функціонального призначення.
5. Порівняйте способи запуску дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів та визначте умови доцільності кожного з них.
6. Поясніть роль апаратно-програмних комплексів у системах дистанційного моніторингу.
7. У чому полягають відмінності між RGB-, мультиспектральними та гіперспектральними камерами?
8. Які завдання в агрономії вирішує тепловізійний моніторинг і які його основні переваги?

РОЗДІЛ 2. Використання дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів в агроскаутингу

У результаті опрацювання цієї теми здобувач освіти:

Набуде цілісного уявлення про сутність і значення дистанційного агроскаутингу як складової точного землеробства, про роль дистанційного моніторингу у сучасному рослинництві.

Оволодіє знаннями щодо фізичних основ електромагнітного випромінювання, спектральних характеристик рослин, принципів формування спектрального «підпису» та розрахунку вегетаційних індексів, а також основ обробки, візуалізації та автоматизованого аналізу даних агроскаутингу із застосуванням геоінформаційних систем, хмарних платформ і алгоритмів штучного інтелекту.

Отримає практичні навички використання результатів дистанційного агроскаутингу для прийняття агрономічних рішень, зокрема зонування полів, планування диференційованого внесення добрив і засобів захисту рослин, організації польових обстежень проблемних ділянок, оцінки ефективності технологічних заходів і підготовки аналітичних звітів для виробничих та управлінських потреб.

2.1. Фізичні принципи дистанційного моніторингу, спектральні характеристики рослин і вегетаційні індекси

У сучасному сільському господарстві моніторинг посівів та агроєкосистем є невід’ємною складовою успішного й ефективного землеробства.

Оперативне проведення моніторингу, або агроскаутингу, виступає ключовим елементом технологій точного землеробства, адже дає змогу своєчасно виявляти проблеми, прогнозувати врожайність та приймати обґрунтовані управлінські рішення.

Традиційні ручні методи обстеження полів, хоча й забезпечують безпосередній контакт з рослинами, часто виявляються недостатньо надійними та потребують значних витрат часу і трудових ресурсів. Крім того, вони охоплюють обмежену площу та залежать від людського фактора, що підвищує ризик помилок.

У зв’язку з цим дедалі ширше застосовуються технології дистанційного та цифрового моніторингу. Використання безпілотних літальних апаратів (дронів), супутникових знімків високої роздільної здатності, сенсорних систем і автоматизованих платформ збору даних дозволяє отримувати оперативну та об’єктивну інформацію про стан посівів на великих площах.

Такі методи забезпечують:

- високу точність діагностики стану рослин і ґрунтів;

- можливість виявлення проблем на ранніх стадіях розвитку;
- оцінка урожайності та зонування по полю
- зонування полів для диференційованого внесення добрив і засобів захисту рослин;
- значну економію часу та ресурсів у порівнянні з традиційними підходами.

Таким чином, поєднання сучасних цифрових технологій з агрономічними знаннями дозволяє підвищити ефективність управління агровиробництвом, мінімізувати ризики та забезпечити сталий розвиток сільського господарства.

Дистанційний моніторинг у рослинництві – це систематичне спостереження за станом посівів, ґрунту та довкілля за допомогою спеціальних технологій і засобів, які не потребують фізичного контакту з об'єктом дослідження. Зазвичай це реалізується через супутникові платформи, БПЛА, наземні сенсори, різноманітні спектральні та тепловізійні камери, які збирають велику кількість цифрових даних.

Цифровий моніторинг рослин (агроскаутинг) – це сукупність технологічних рішень і методів, спрямованих на автоматизований збір, обробку, аналіз та візуалізацію інформації про стан рослин і полів, що забезпечує зручне та об'єктивне оцінювання їхнього розвитку й умов вирощування (рис. 2.1., рис. 2.2).

Це передбачає використання:

- сенсорів і камер для фіксації спектральних, просторових і теплових характеристик рослин,
- інструментів дистанційного зондування (Remote Sensing) для отримання багатоспектральних зображень,
- програмних рішень для інтерпретації великих масивів даних,
- систем штучного інтелекту й машинного навчання для автоматичного виявлення проблем, прогнозування врожайності, оцінки біомаси, контролю за шкідниками, хворобами чи нестачею елементів живлення.

Головна відмінність цифрового моніторингу – можливість отримати оперативну, кількісну, об'єктивну інформацію в реальному часі та швидко приймати рішення на її основі.

Використання цифрових рішень дає змогу забезпечити:

Оперативність – своєчасне виявлення стресових станів рослин, шкідників, хвороб, дефіциту поживних речовин і неякісно виконаних робіт.

Об'єктивність – зменшення впливу людського чинника під час проведення агроскаутингу.

Масштабованість – можливість здійснювати контроль великих територій.

Точність – отримання детальних і надійних даних для аналізу стану поля завдяки поєднанню широкого охоплення території та високої роздільної здатності.

Прогнозування – формування аналітичних моделей для підвищення врожайності та оптимізації витрат.

Сучасний цифровий моніторинг є основою точного землеробства, впровадження Smart Farming, підвищення ефективності агробізнесу та забезпечення сталого розвитку сільського господарства.

Дані аспекти висвітлені в багатьох працях зокрема «Сучасні методи цифрового моніторингу в рослинництві: Монографія / О. Л. Зозуля, В. В. Швартау, Л. М. Михальська, О.Л. Ковель, Г.М. Гнатієнко, В. Є. Снитюк, Н. П. Тменова. – К: Прінтстор Груп, 2025. – 396 с



Рис. 2.1. Використання БПЛА літакового типу для обстеження полів
Джерело: <https://www.unmanned-systemstechnology.com/wp-content/uploads/2018/11/Delair-UX11-Ag-drone-e1541501749877.webp>



Рис. 2.2. Використання БПЛА квадрокоптерного типу для обробки полів
Джерело: <https://www.unmanned-systemstechnology.com/2025/01/drone-nerds-expands-agricultural-drone-lineup-with-abz-innovation-partnership/>

2.2. Основи електромагнітного випромінювання та спектральні характеристики рослин, вегетаційні індекси: NDVI та інші індекси стану рослин

Електромагнітне випромінювання – це форма енергії, яка поширюється у просторі у вигляді хвиль. З фізичної точки зору, електромагнітна хвиля виникає тоді, коли електрично заряджені частинки змінюють свій рух. Наприклад, у Сонці заряджені частинки перебувають у постійному русі, унаслідок чого утворюється випромінювання, яке поширюється в космічному просторі й досягає Землі.

Електромагнітна хвиля складається з двох складових: електричного поля і магнітного поля. Вони змінюються в часі та просторі, взаємно підтримують одне одного і поширюються зі швидкістю світла. У вакуумі ця швидкість становить приблизно 300 000 км/с.

На відміну від звукових хвиль, електромагнітне випромінювання не потребує повітря чи іншого середовища для поширення. Саме тому сонячне світло проходить через космічний простір і потрапляє на поверхню Землі.

Основними фізичними характеристиками електромагнітного випромінювання є:

Довжина хвилі – відстань між двома сусідніми однаковими ділянками хвилі. Від неї залежить тип випромінювання: радіохвилі мають велику довжину хвилі, видиме світло – значно меншу, а ультрафіолетове випромінювання – ще меншу.

Частота – кількість коливань хвилі за одну секунду. Чим більша частота, тим більшу енергію має випромінювання.

Енергія випромінювання – здатність хвилі передавати енергію об'єктам, на які вона потрапляє. Наприклад, сонячне випромінювання нагріває ґрунт, воду, повітря і рослини, а частина його енергії використовується рослинами для фотосинтезу.

Отже, електромагнітне випромінювання можна розглядати як потік енергії, що поширюється у вигляді хвиль електричного та магнітного полів. Для агрономії найважливішим прикладом такого випромінювання є сонячна радіація, яка забезпечує освітлення, тепло та енергетичну основу фотосинтезу.

Для агрономів найважливішим є сонячне електромагнітне випромінювання, оскільки воно безпосередньо впливає на ріст і розвиток рослин. Видима частина сонячного світла забезпечує фотосинтез – процес, під час якого рослини утворюють органічні речовини. Інфрачервоне випромінювання впливає на нагрівання ґрунту, повітря і рослин, а ультрафіолетове – може впливати на фізіологічні процеси та стійкість рослин до стресових факторів. У сільському господарстві важливо враховувати інтенсивність, тривалість і спектральний склад випромінювання. Від кількості світла залежить швидкість фотосинтезу, формування врожаю, строки досягання, якість продукції та загальний стан посівів. Надлишок або нестача світла можуть призводити до пригнічення росту, витягування рослин, опіків листків або зниження продуктивності.

Сонце є головним джерелом енергії для всіх живих організмів на Землі, а для рослин – ще й рушійною силою фотосинтезу.

Усе, що ми бачимо навколо – колір листя та квітів, блиск поверхонь, навіть температура ґрунту й рослинних тканин – є результатом взаємодії сонячного світла з різними об'єктами та матеріалами.

Кожен матеріал має власну «**спектральну підписку**» – характерний спосіб відбиття, поглинання або пропускання електромагнітних хвиль різної довжини.

Для рослин цей спектральний відбиток є особливо інформативним, адже дозволяє оцінювати їхній фізіологічний стан, рівень стресу, вміст хлорофілу, водний баланс та навіть наявність хвороб.

Сонячне світло – це суміш хвиль різної довжини, які умовно поділяють на кілька діапазонів:

Ультрафіолетове випромінювання (100–400 нм). Переважно поглинається озоновим шаром атмосфери й у невеликих кількостях досягає поверхні Землі. Рослини майже не використовують його для фотосинтезу, однак воно може впливати на їхній розвиток, регулювати процеси цвітіння та синтезу захисних пігментів.

Видиме світло (400–700 нм). Це ключовий спектральний діапазон для фотосинтезу. Світло у синій (близько 450 нм) та червоній (близько 680 нм) областях особливо ефективно поглинається пігментами, зокрема хлорофілом, і використовується для утворення органічних речовин з вуглекислого газу та води.

Інфрачервоне випромінювання.

Ближнє інфрачервоне (700–2500 нм) – не бере участі у фотосинтезі, але є важливим для дистанційного зондування, оскільки відбивається листками залежно від їхньої структури та вмісту вологи.

Середнє інфрачервоне (2500–25000 нм) – чутливе до змін у водному балансі та будові тканин, використовується для оцінки стану ґрунтів і рослин.

Далеке інфрачервоне (25000–500000 нм) – сприймається як теплове випромінювання, що дає змогу вимірювати температуру поверхні ґрунту та рослин, виявляти тепловий стрес і дефіцит води.

Сучасні системи дистанційного моніторингу, зокрема спектральні камери на дронах та супутниках, здатні фіксувати й аналізувати відбиття у цих діапазонах, створюючи спектральні індекси (наприклад, NDVI, NDRE, PRI), які дають кількісну оцінку стану рослин. Це відкриває можливість своєчасного виявлення проблем і оптимізації технологічних операцій у сільському господарстві.

«Спектр сонячного випромінювання, який досягає поверхні Землі, складається з ультрафіолетового (100–400 нм), видимого (380–760 нм) та інфрачервоного (понад 760 нм).» [Рис.2.3]

Сонячна енергія приблизно на 5% складається з ультрафіолетового випромінювання, 42% з видимого світла та 53% з ближнього інфрачервоного випромінювання.

Як було зазначено вище, сонячне світло складається з різних діапазонів електромагнітного випромінювання, і кожен з них взаємодіє з рослинами по-своєму.

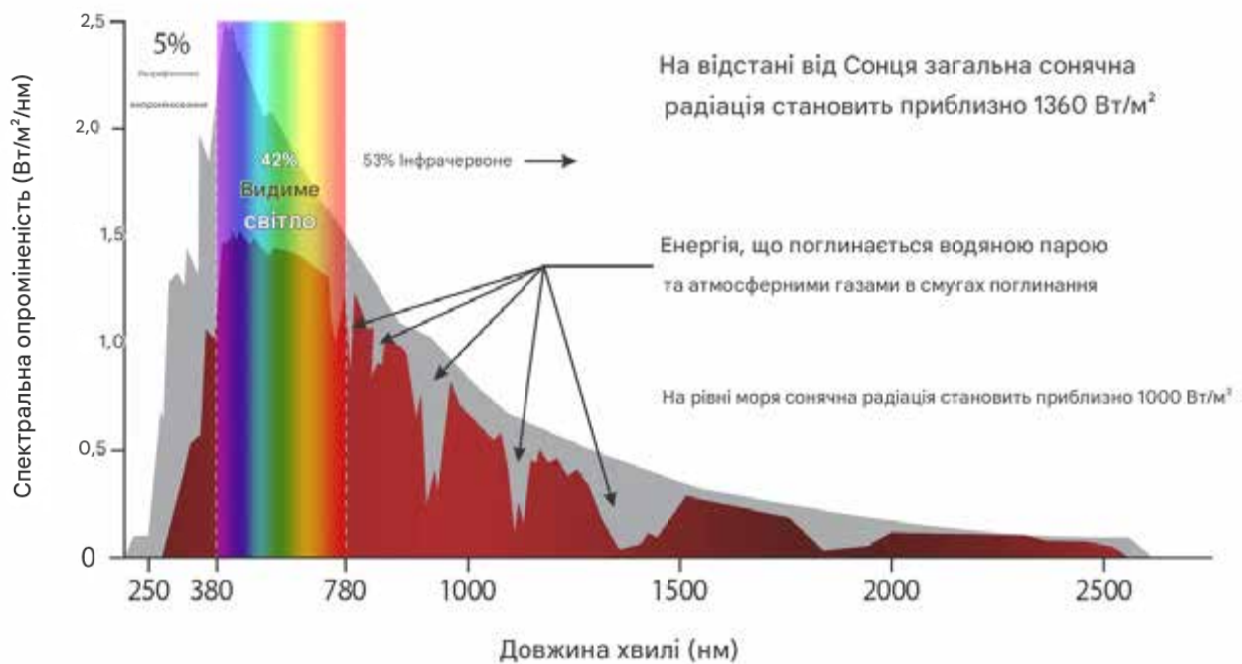


Рис. 2.3. Спектр сонячної радіації. Джерело: <https://sunwind-solar.com/blog/solar-radiation-spectrum/>

Електромагнітне випромінювання – це форма енергії, що розповсюджується у вигляді хвиль і охоплює широкий спектр – від ультрафіолетового до інфрачервоного та радіохвиль. У сільському господарстві найбільший інтерес становлять ті діапазони, які несуть інформацію про фізіологічний стан рослин.

Коли світло досягає рослинної поверхні, воно зазнає кількох процесів: поглинання (наприклад, хлорофілом під час фотосинтезу);

відбиття від поверхні, яке людина сприймає зором, а камери та сенсори фіксують у цифровій формі;

пропускання крізь листову тканину або перетворення на тепло.

Особливості взаємодії світла з рослиною:

Видиме світло (400–700 нм). Сині та червоні хвилі активно поглинаються пігментами й беруть участь у фотосинтезі, тоді як зелене світло здебільшого відбивається, через що листя має характерне зелене забарвлення.

Ближнє інфрачервоне (NIR, 700–1100 нм). Майже не поглинається пігментами, але сильно відбивається від здорових листків із щільною структурою та достатнім вмістом води.

Середнє та далеке інфрачервоне. Дають змогу визначати температуру рослин, оцінювати водний баланс і навіть властивості ґрунту.

Спектральний відбиток як індикатор стану рослин. Здорові рослини активно поглинають червоний діапазон і відбивають ближнє інфрачервоне. Якщо ж рослина ослаблена, хвора чи зазнала стресу від посухи, її відбивна здатність у NIR знижується, а у видимому спектрі – підвищується. Ці зміни є

своєрідними «сигналами тривоги», які сучасні системи дистанційного моніторингу здатні виявляти за допомогою спектральних камер та індексів.

Таким чином, поєднання знань про взаємодію світла з рослинними тканинами та можливостей сучасної спектральної техніки створює основу для точного й своєчасного моніторингу стану посівів, що було розглянуто у попередньому розділі.

«Пігмент у листках рослин – хлорофіл – сильно поглинає видиме світло (400–700 нм) для фотосинтезу. Клітинна структура листків, з іншого боку, значно відбиває ближнє інфрачервоне світло (NIR, 760–1100 нм). Саме на різниці поглинання та відбиття у видимому і NIR-діапазоні базуються спектральні індекси для оцінки стану рослинності» (рис. 2.4).

Як було зазначено вище, зміни відбивної здатності у червоному та ближньому інфрачервоному діапазонах є інформативними показниками стану рослин. Цей принцип лежить в основі одного з найпоширеніших індексів дистанційного моніторингу – **NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)**, який показує наростання біомаси рослини.

Формула NDVI:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED),$$

де:

NIR – відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні (700–1100 нм),

RED – відбиття у червоному діапазоні (близько 660 нм).

Механізм роботи:

Здорова рослина активно поглинає червоне світло (для фотосинтезу) та сильно відбиває NIR через особливості структури клітинних стінок і високий вміст вологи. Це дає високі значення NDVI (наближені до 1).

Ослаблена, хвора або пересушена рослина поглинає менше червоного світла й відбиває менше NIR, тому NDVI зменшується (наближається до 0).

Відсутність рослинності (грунт, сухі залишки, штучні поверхні) дає ще нижчі значення, іноді навіть від’ємні.

Завдяки простоті обчислення та високій інформативності, NDVI став стандартним інструментом у точному землеробстві. Його можна обчислювати як із супутникових знімків, так і з даних, отриманих дронами чи стаціонарними сенсорами.

«NDVI – нормалізований різницевий вегетаційний індекс, NIR – відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні, RED – відбиття у червоному діапазоні» (рис. 2.4).

Як показують розглянуті вище приклади з NDVI та спектральними діапазонами, основою будь-якого дистанційного моніторингу є баланс енергії світла, що взаємодіє з рослиною.

Dead Leaf – мертвий лист

Stressed Leaf – стрес

Healthy Leaf – Здоровий

Blue – голубий

Green – зелений

Red – червоний

Nir – інфрачервоний

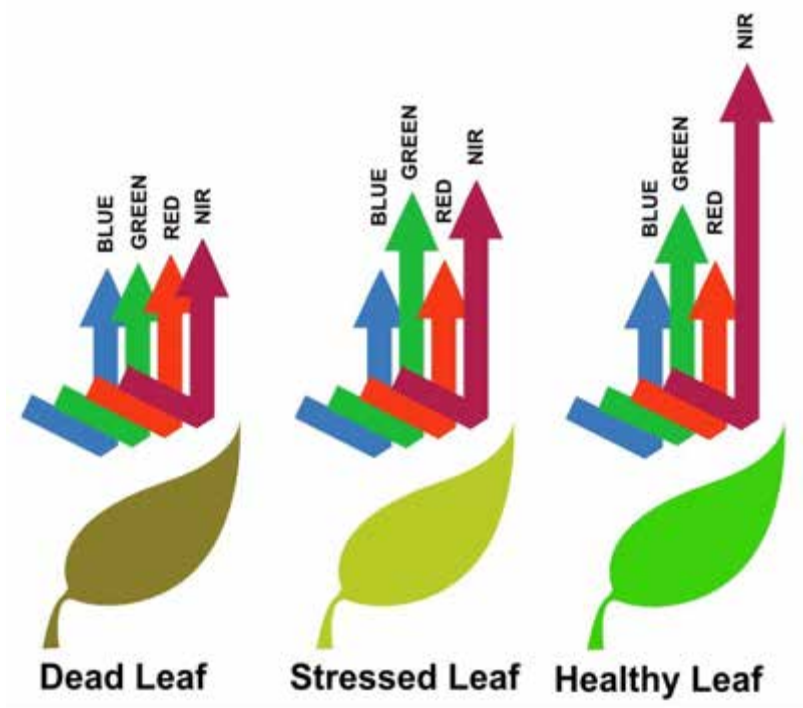


Рис. 2.4. Визначення NDVI – нормалізований різницевий вегетаційний індекс в рослинах. Джерело: <https://botlink.com/blog/discover-ndvi-and-its-valuable-uses-in-agriculture>

Коли електромагнітне випромінювання (світло) падає на листок, воно розподіляється між трьома основними процесами:

$$E_i(\lambda) = E_r(\lambda) + E_a(\lambda) + E_t(\lambda)$$

E_i – енергія випромінювання, що падає на листок на певній довжині хвилі λ ;

E_r – відбита енергія (сприймається очима та реєструється сенсорами),

E_a – поглинута енергія (використовується у фотосинтезі або перетворюється на тепло),

E_t – енергія, що пройшла крізь листок або передалася далі.

У здорових рослин відбиття у червоному діапазоні низьке, а у ближньому інфрачервоному – високе, тоді як у стресових або хворих рослин ця пропорція змінюється. Саме на цих відмінностях базується робота індексів, таких як **NDVI**, **NDRE** чи **GNDVI**, описаних у попередньому розділі.

Кожна рослина, ґрунт чи навіть водна поверхня має свій **спектральний “підпис”** – унікальну комбінацію значень для різних довжин хвиль.

Аналіз цього підпису дозволяє:

- дистанційно визначати фізіологічний стан посівів;
- виявляти стрес, дефіцит вологи чи поживних елементів;
- прогнозувати врожайність;

- оптимізувати технологічні операції, вносячи ресурси лише там, де це потрібно.

Таким чином, фізичні принципи взаємодії світла з рослинними тканинами, біологічні особливості фотосинтезу та сучасні алгоритми спектрального аналізу утворюють єдину наукову основу точного землеробства. Саме вони дозволяють перетворити складні дані про енергію та спектри на зрозумілі карти, індекси та рекомендації для агровиробників.

Важливо пам'ятати: Спектральний «підпис» рослин – це інформативний “відбиток”, який дозволяє дистанційно діагностувати їхній стан, прогнозувати врожайність, попереджати ризики й оптимізувати агровиробництво. Багато сучасних системи агромоніторингу базуються саме на цих фізичних та біологічних принципах (рис. 2.5).



Рис. 2.5. Прояв рівня NDVI – нормалізований різницевий вегетаційний індекс в цифрових показниках.

Джерело: https://extension.sdstate.edu/sites/default/files/2025-06/P-00341.pdf?utm_source=chatgpt.com

Веgetаційні індекси: NDVI та інші індекси стану рослин

Веgetаційний індекс – це математичний показник, який обчислюється на основі даних про відбивання світла рослинами у різних спектральних діапазонах. Його головна мета – перетворити складну спектральну інформацію

у зручну для аналізу кількісну оцінку стану рослинності: рівня здоров'я, густоти, біомаси або ступеня стресу. Такий підхід дозволяє відображати дані у вигляді карт стану поля, які можна порівнювати у часі та просторі.

Принцип розрахунку індексів базується на тому, що рослини взаємодіють зі світлом різних довжин хвиль по-різному. Ця взаємодія залежить від їхнього фізіологічного стану, вмісту води, концентрації хлорофілу, густоти листового покриву та інших чинників:

Здорові листки активно поглинають червоне світло (~660 нм) для фотосинтезу і водночас відбивають значну частину ближнього інфрачервоного (NIR) (~700–1100 нм) через особливості структури клітинних стінок і високий вміст вологи.

Ослаблені, хворі або пересушені листки поглинають менше червоного світла і відбивають менше NIR. Водночас у видимому спектрі (особливо в червоному діапазоні) їх відбивна здатність зростає.

Саме ці відмінності лежать в основі розрахунку індексів.

Ці зміни у відбиванні добре фіксуються спектральними сенсорами, встановленими на супутниках, безпілотниках або наземних платформах, і можуть бути обчислені у вигляді різних вегетаційних індексів:

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – базовий і найпоширеніший індекс, чутливий до вмісту хлорофілу та загальної біомаси.

NDRE (Normalized Difference Red Edge) – оцінює стан рослин у червоному краї спектра, корисний для раннього виявлення стресу.

GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index) – використовує зелений діапазон для оцінки вмісту азоту.

PRI (Photochemical Reflectance Index) – чутливий до змін у фотосинтетичній активності протягом дня.

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – нормалізований різницевий вегетаційний індекс

Формула:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

NIR – відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні (~760–900 нм)

RED – відбиття у видимому червоному (~640–700 нм)

Значення NDVI:

Від -1 до +1

Близько 0 – немає рослинності (або мертва)

0,1–0,3 – рідка або стресована рослинність

0,3–0,7 – здорова, активна рослинність

Вище 0,7 – дуже густа, потужна зелена маса (наприклад, ліс)

Практичне значення вегетаційних індексів полягає в тому, що вони дають змогу швидко оцінювати стан посівів на великих площах без проведення суцільного візуального обстеження. На основі супутникових, дронівих або

сенсорних даних можна будувати “карти здоров’я” посівів, які показують просторову неоднорідність поля: ділянки з активною вегетацією, ослаблені зони, місця можливого стресу або пошкодження рослин.

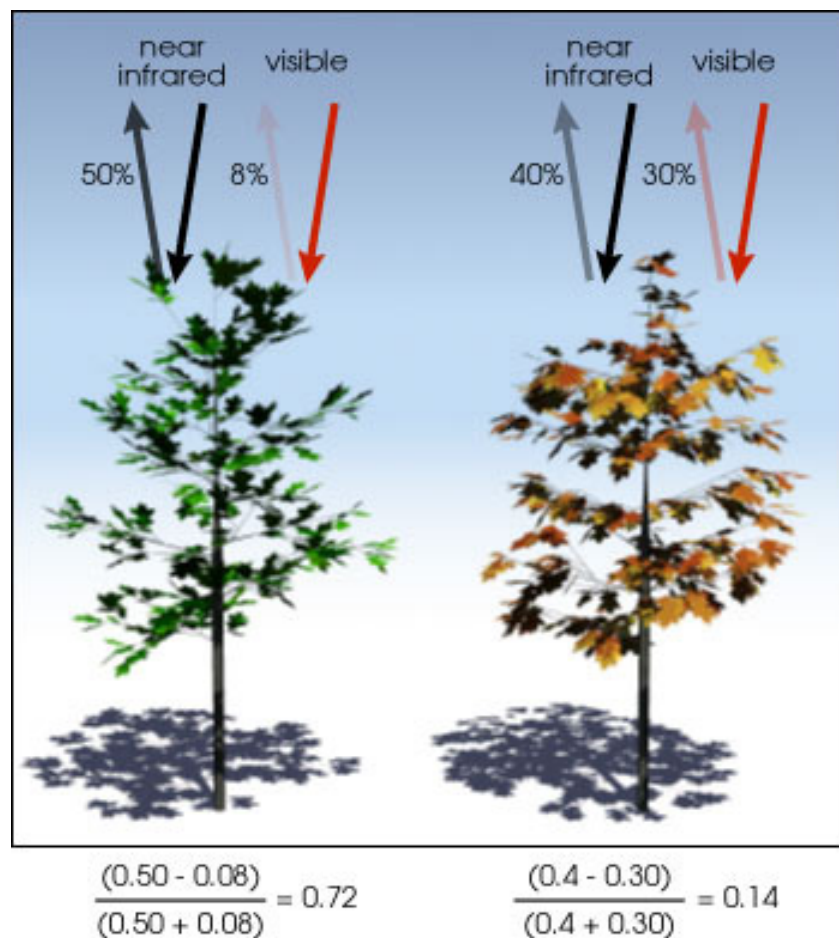


Рис. 2.6. Розрахунок NDVI – нормалізований різницевий вегетаційний індекс рослин. Джерело: https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ANDvi_example.jpg?utm_source=chatgpt.com

Здорова рослинність (Healthy Vegetation Reflectance)

- **50 % NIR, 8 % Red**
- Здорові листки активно поглинають червоне світло (для фотосинтезу), але відбивають багато інфрачервоного (через структуру клітин і вміст хлорофілу).

- Розрахунок дає: **NDVI = 0.72**
(високе значення → рослина у хорошому стані).

Стресована рослинність (Stressed Vegetation Reflectance)

- **40 % NIR, 30 % Red**
- Рослини у стресі (нестача води, поживних речовин, хвороби) **гірше поглинають червоне світло і менше відбивають NIR.**
- Розрахунок дає: **NDVI = 0.14** (низьке значення → поганий стан).

«NDVI – це базовий індекс дистанційного моніторингу, який визначає співвідношення відбиття ближнього інфрачервоного і червоного світла, і широко використовується для оцінки стану посівів» [31].

GNDVI (Green NDVI)

Використовує зелений діапазон замість червоного.

Формула: $GNDVI = (NIR - GREEN) / (NIR + GREEN)$

Чутливіший до кількості хлорофілу, ранніх ознак стресу.

NDRE (Normalized Difference Red Edge Index)

Використовує “червоний край” (Red Edge, ~710–740 нм)

Формула: $NDRE = (NIR - RE) / (NIR + RE)$

Добре працює на пізніших стадіях розвитку культур, коли NDVI “перенасичується”.

EVI (Enhanced Vegetation Index)

Враховує ще й синій канал, “гасить” ефект ґрунту та атмосферних впливів, за рахунок не покритого ґрунту рослинами.

Формула:

$EVI = 2.5 * (NIR - RED) / (NIR + 6*RED - 7.5*BLUE + 1)$

Чутливіший до густих посівів, застосовується в лісництві.

SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index)

Коригує NDVI на вплив ґрунту, особливо коли рослинність рідка.

Формула:

$SAVI = ((NIR - RED) / (NIR + RED + L)) * (1 + L)$, де L – коефіцієнт корекції ґрунту.

Як обирати індекс для конкретної задачі?

NDVI – універсальний для будь-яких культур на основних етапах розвитку.

GNDVI, NDRE – для ранньої діагностики стресу, під час цвітіння, для пізніх культур.

EVI, SAVI – використовують для аналізу густої рослинності, а також у випадках, коли на результати істотно впливає відкрита поверхня ґрунту.

Карта індексу – це кольорова схема поля, де кожен піксель має певне значення індексу. При використанні таких карт важливо звертати увагу на пояснення кольорів та кольорові шкали, щоб здійснювати правильне оцінювання результатів. [Рис.2.7]

Карти NDVI (а) GNDVI (b) та SAVI (с, з L = 0,25) для виноградної ділянки. Зони А–D та С–В показують зони з високими та низькими значеннями VI відповідно.

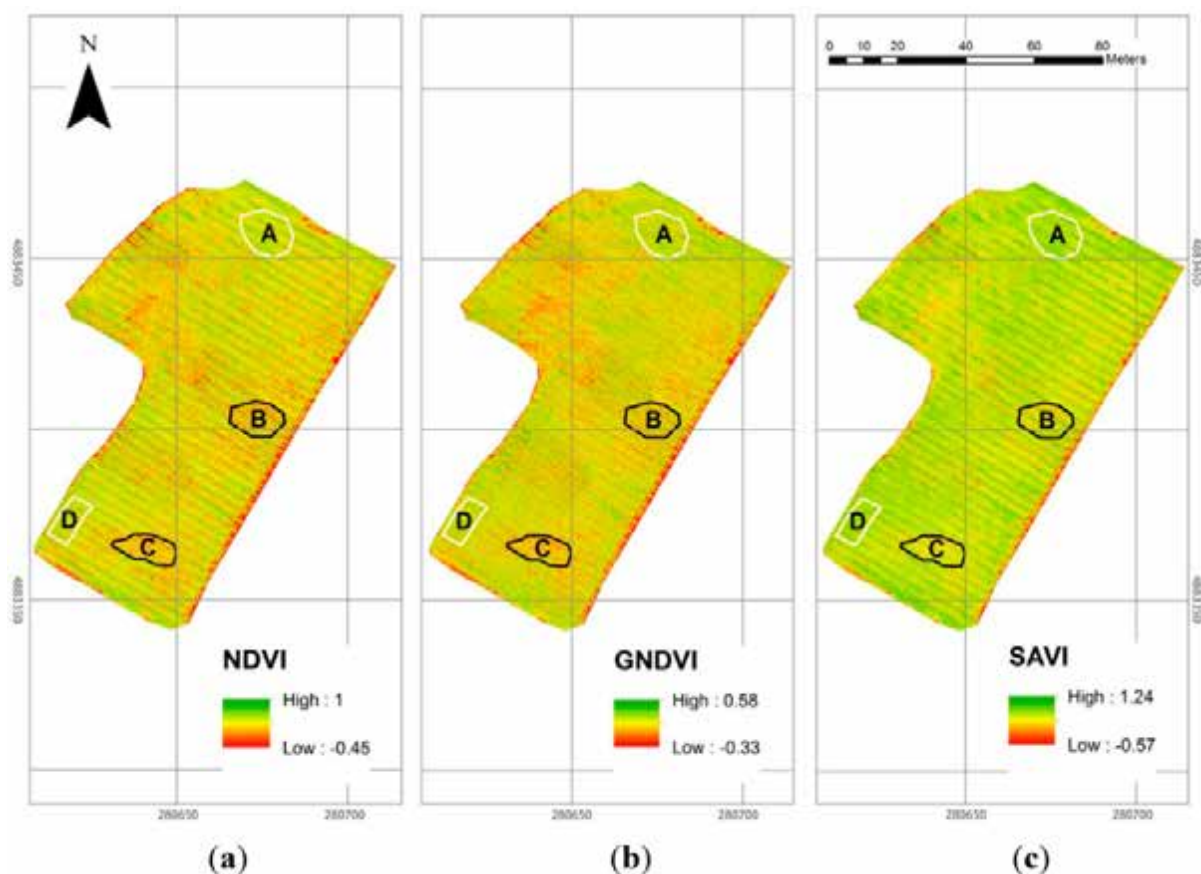


Рис. 2.7. Карти різних вегетативних індексів для винограду. Джерело: <https://www.mdpi.com/2072-4292/7/4/4026>

Приклад:

Червоні/жовті ділянки – проблемні зони, де рослини в стресі або погано розвиваються.

Зелені/сині ділянки – здорові, потужні рослини.

«Використання вегетаційних індексів дозволяє не лише побачити загальний стан посіву, а й точно локалізувати ділянки із зниженим розвитком, провести “точковий” агромоніторинг і скоригувати агротехнічні заходи» [31].

Практичні приклади використання вегетаційних індексів:

Планування підживлення:

NDVI-карти застосовують як один із методів зонування та додаткового дослідження полів, що дає змогу формувати диференційовані карти внесення добрив або навіть окремих елементів живлення. Такий підхід особливо ефективний на великих полях із неоднорідними ґрунтовими умовами, де зони з високим NDVI можуть потребувати коригування системи внесення добрив.

Моніторинг стресу рослин:

- **GNDVI** (зеленого діапазону) та **NDRE** (червоного краю спектра) дозволяють **виявляти ранні стадії стресу** ще до того, як він стане помітним візуально.

- Ці індекси чутливі до змін у вмісті хлорофілу, що може сигналізувати про **посуховий стрес, нестачу поживних елементів, ураження хворобами чи фітотоксичну дію ЗЗР**.
- Раннє виявлення проблем дає змогу вчасно вжити коригувальні заходи й мінімізувати втрати врожаю.

Облік пошкоджень та оцінка збитків:

- Після граду, буревію, затоплення чи спалаху хвороб, NDVI-карти дозволяють швидко **визначити площу та ступінь пошкоджень, відставання рослин в розвитку**.
- Це не лише допомагає агроному в плануванні подальших дій, але й слугує документальним підтвердженням для страхових компаній або у випадку подачі заявок на компенсації.
- Візуалізація пошкоджених ділянок у вигляді карт значно полегшує ухвалення управлінських рішень.

Важливо пам'ятати: Вегетаційні індекси – це важливий інструмент цифрового агронома. Вони «перекладають» спектральну інформацію на зрозумілу мову карт і таблиць, допомагаючи своєчасно ухвалювати рішення щодо коригування розвитку рослин у межах поля.

2.2. Обробка, візуалізація та інтерпретація даних дистанційного агроскаутингу в системі прийняття агрономічних рішень

Після зйомки БПЛА чи супутниками отримують великі масиви “сирих” **знімків** або датасетів, які самі по собі ще не несуть прямої практичної користі для агронома. Такі дані можуть містити сотні або тисячі окремих зображень у різних спектральних діапазонах, а також додаткову службову інформацію: географічні координати, параметри освітлення, висоту зйомки, кут нахилу камери, час отримання знімка тощо.

Щоб ці матеріали стали придатними для агрономічного аналізу, їх необхідно пройти через кілька етапів обробки. Спочатку виконують геоприв'язку та зшивання знімків в єдину ортофотокарту поля. Далі проводять корекцію впливу освітлення, тіней, атмосферних умов і технічних особливостей сенсора. Після цього на основі відбиття світла у відповідних спектральних каналах розраховують вегетаційні індекси, наприклад NDVI, NDRE, GNDVI або інші показники.

У результаті “сирі” знімки перетворюються на карту індексів, яка відображає просторову неоднорідність посівів і дає змогу оцінити їхній стан. Проте сама карта також потребує правильної інтерпретації. Низькі або високі значення індексів слід порівнювати з фазою розвитку культури, погодними

умовами, типом ґрунту, історією поля, даними про внесення добрив, захист рослин і результатами польового обстеження.

Лише після такої обробки та інтерпретації дистанційні дані стають основою для прийняття технологічних рішень: визначення проблемних ділянок, планування обстеження поля, диференційованого внесення добрив або пестицидів, коригування зрошення, оцінки ефективності агротехнічних заходів і прогнозування продуктивності посівів (рис. 2.8).

Етапи роботи з даними

1. Завантаження та первинна обробка знімків

Організація даних:

- Завантажити всі знімки з носія БПЛА чи із супутникової платформи на комп'ютер.
- Сортуйте за датою, полем, культурою.
- Резервне копіювання!

“Зшивка” (мозаїка) знімків: за допомогою програм (Pix4D, Agisoft, DroneDeploy) створіть єдиний ортофотоплан – цілісну карту поля з геоприв'язкою.

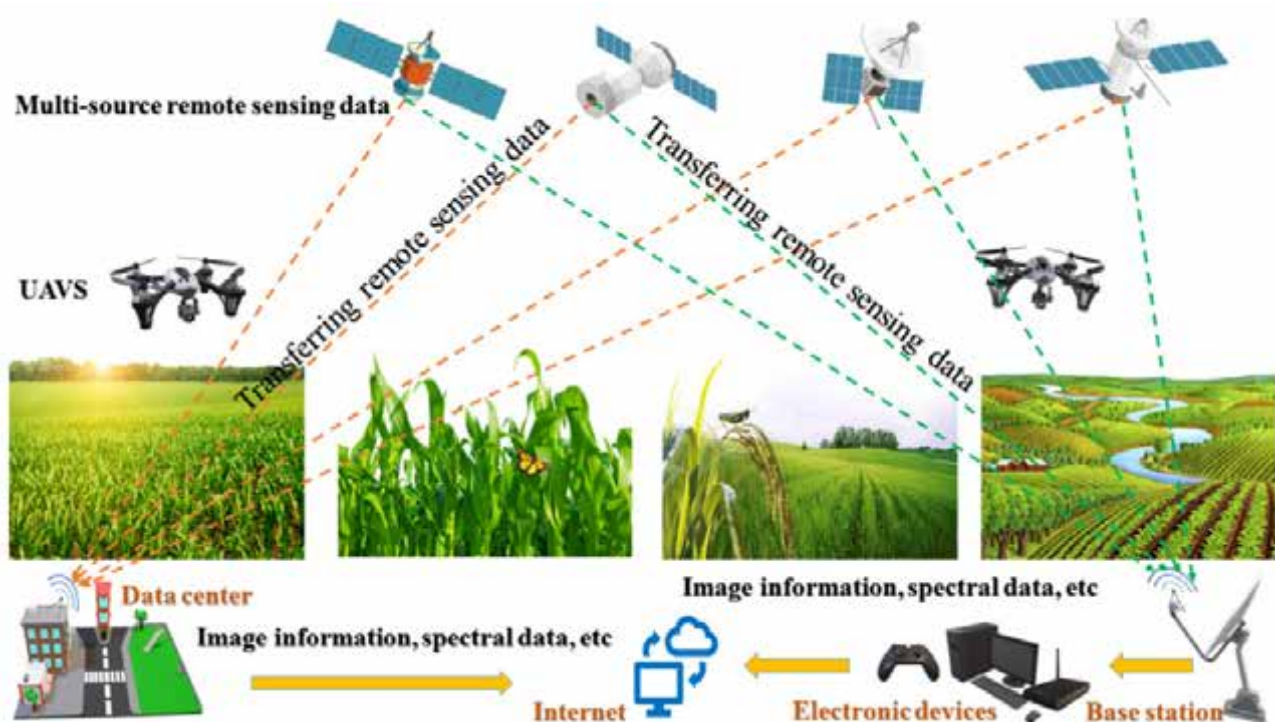


Рис. 2.8. Ілюстрація інтеграції дистанційного зондування та машинного навчання: схема передачі даних із супутників / БПЛА до хмарного сервісу, обробка спектральної інформації.

Джерело: https://www.mdpi.com/agronomy/agronomy-14-01975/article_deploy/html/images/agronomy-14-01975-g003.png

2. Картографування та розрахунок індексів

Побудова індексних карт (NDVI, GNDVI, NDRE тощо):

Виберіть у спеціалізованій програмі потрібний індекс і розрахуйте його значення для кожного пікселя.

Візуалізація:

Карта індексу – це кольорове зображення, де кожен колір відповідає різному стану рослин (червоний – стрес, зелений – здорова рослинність).

«Всі сучасні програми для обробки аеро- чи супутникових знімків дозволяють будувати індексні карти за кілька кліків. Важливо вибрати правильний індекс та коригувати дані на вплив хмарності, освітлення, кута зйомки» [31].

3. Інтерпретація індексних карт

Локалізація проблем: провівши аналіз карти потрібно знайти ділянки які мають відхилення від типового розвитку культури в даний період часу. Бажано провести порівняльний аналіз з іншою даними по даній ділянці поля: тип ґрунту, мікрорельєф, особливості технології. Далі проводять статистичний аналіз усієї території, автоматично обчислюють площі ділянок із різними значеннями індексу та виявляють загальні тенденції.

4. Експорт і застосування даних у господарстві

Передача у хмарні сервіси: Отримані дані доступні для різних спеціалістів, що дозволяє координувати роботу в режимі реального часу. При потребі дані можна експортувати у GPS-формат, що може бути сумісний з агротехнікою (наприклад, для тракторів з автопілотом, сівалок чи обприскувачів).

«Завдяки сучасним системам обробки та обміну даними агрономи можуть оперативно отримувати карти стану посівів на мобільних пристроях, приймати рішення про підживлення, полив, обробки ЗЗР прямо в полі» (рис. 2.9).

Перевірка результатів цифрового агроскаутингу

Виїзд у проблемні зони, перевірка причин аномалій:

- Зіставлення індексних карт із реальним станом рослин у полі.
- Уточнення проблем які спостерігаються на ділянках: посуха, хвороба, механічні пошкодження, дефіцит поживних речовин, тощо.
- На основі результатів перевірки формують коригувальні технологічні заходи, а після їх виконання повторно обстежують відповідні ділянки.

Поширені помилки:

- Неякісна зйомка (низьке перекриття, тіні, пил) → помилки у мозаїці.
- Відсутність калібрування → індекси некоректні.
- “Сирі” дані не перевірені в полі → хибні агрорішення.
- Зберігання даних лише на одному комп’ютері → ризик втрати.

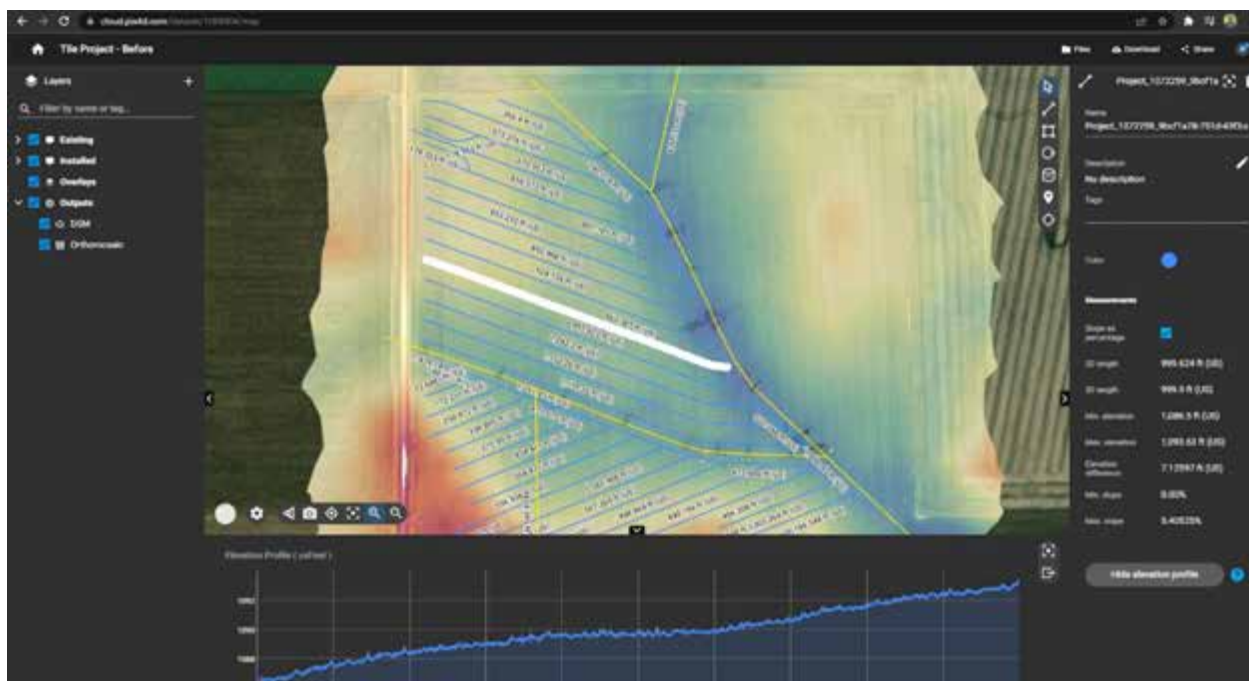


Рис.2.9: Проект дренажу, завантажений на PIX4Dcloud.

Лінії анотацій показують старі дренажні плитки (жовтий колір) порівняно з новими (синій колір). Джерело: <https://www.pix4d.com/blog/pix4dfields-accurate-processing/>

Спеціалізовані програми:

Сучасні програми геоінформаційного аналізу, такі як QGIS, Google Earth Engine і спеціалізовані плагіни (SCP, SentinelHub, Mapflow), відкривають широкі можливості для обробки та інтерпретації даних дистанційного зондування.

Вони дозволяють поєднувати супутникові та аерофотознімки, виконувати класифікацію земного покриття, розраховувати вегетаційні індекси (NDVI, SAVI, NDRE) і створювати карти стану рослинності. Особливістю цих інструментів є те, що вони забезпечують автоматизацію рутинних процесів, зменшують похибки ручного аналізу й значно пришвидшують отримання результатів для агрономічних рішень.

У поєднанні з аналітичними надбудовами, як-от **Data Plotly** чи **qgis2web**, користувач отримує можливість візуалізувати зміни у просторі та часі, будувати інтерактивні карти та ділитися результатами онлайн. Такі системи перетворюють первинні дані з БПЛА чи супутників на зрозумілі індикатори стану ґрунту, рослин і довкілля, створюючи основу для прецизійного (точного) землеробства. Їхнє впровадження сприяє переходу від епізодичних спостережень до системного моніторингу агроландшафтів, що підвищує ефективність управління виробництвом.

Важливо пам'ятати: Якісна обробка та інтерпретація даних – це міст між “цифровими” знімками та реальними агротехнологічними рішеннями.

Саме на цьому етапі визначають, які ділянки потрібно підживлювати, де лікувати, а де планувати пересів (рис.2.10).



Рис.2.10. Обліт перед посівом. Зверніть увагу на розподіл вологи на полі. Джерело: <https://www.smartfarming.ua/drony-i-suputnyky-monitorynh-stanu-posiviv-vprodovzh-sezonu/>

Візуалізація результатів агроскаутингу і прийняття агрономічних рішень

Візуалізація виступає засобом комунікації між числовими даними та практичними потребами агровиробництва. Навіть найточніші даних дистанційного моніторингу, отримані із застосуванням штучного інтелекту, набувають цінності лише за умови їхньої зрозумілої подачі, легкості інтерпретації та здатності оперативно забезпечувати ухвалення обґрунтованих управлінських рішень агрономами чи менеджерами.

Основні форми візуалізації в агромоніторингу

1. Кольорові індексні карти (NDVI, GNDVI, температурні тощо)

Кольорові індексні карти – це найпоширеніший спосіб подання результатів дистанційного моніторингу, який дозволяє перетворити спектральні дані на наочну просторову картину стану поля.

На таких картах кожен піксель відповідає певній точці поля та містить значення вибраного індексу чи показника (NDVI, GNDVI, NDRE, температурний індекс тощо).

Стандартна “теплова шкала” використовується для швидкого візуального розпізнавання зон із різним станом рослинності:

Червоний / Жовтий – ділянки стресу, ураження хворобами, дефіциту води або поживних речовин, пошкодження після граду чи буревію.

Зелений / Синій – здорова, активна рослинність із високим рівнем фотосинтетичної активності.

Точність і деталізація: кожен піксель карти є своєрідною "адресою" стану культури на момент зйомки, що дозволяє агроному локалізувати проблеми з точністю до кількох метрів (для дронів) або десятків метрів (для супутників).

- 2. Ортофотоплани (склеєні аерознімки):** геоприв'язані, масштабовані карти – дозволяють аналізувати зміни за часом (наприклад, порівняння до та після обробки).

Геоприв'язані, масштабовані зображення поля, створені шляхом об'єднання десятків або сотень знімків, отриманих з БПЛА. Завдяки геоприв'язці кожен елемент ортофотоплану відповідає точним координатам місцевості, що дозволяє проводити вимірювання відстаней, площ і координат об'єктів без виходу в поле. Ортофотоплани особливо корисні для порівняльного аналізу у часі – наприклад, "до" і "після" внесення добрив, поливу, обробки ЗЗР або стихійних явищ (град, буревій, підтоплення).

- 3. 3D-моделі поверхні:** дає змогу бачити рельєф, уклін, мікророзниження, локальні западини, що впливають на розвиток культури, відтворити рельєф і мікрорельєф поля з точністю до сантиметрів.

Показують мікророзниження та локальні западини, які можуть впливати на накопичення чи стік води, формування застійних зон або ерозійних процесів. Використовуються для планування меліорацій, зрошення, розробки дренажних систем та аналізу впливу рельєфу на ріст культур.

- 4. Діаграми, графіки, статистичні зведення:** Автоматичний підрахунок площ проблемних зон.

Динаміка зміни індексів за сезоном, між роками. Автоматично підраховують площі проблемних зон (наприклад, відсоток поля з NDVI нижче заданого порогу). Будують графіки динаміки зміни індексів протягом сезону або між різними роками. Дають змогу проводити кореляційний аналіз між вегетаційними індексами, погодними даними та врожайністю.

- 5. Звіти для господарства:** Готові PDF або інтерактивні веб-звіти для менеджерів, інвесторів, страховиків.

Формуються у вигляді готових PDF-документів або інтерактивних онлайн-звітів з інтегрованими картами, графіками та аналітичними висновками. Можуть містити рекомендації щодо внесення добрив, графіки поливу, план робіт, прогноз врожайності. Використовуються для внутрішньої комунікації між агрономами та менеджментом, а також для звітності перед інвесторами, страховими компаніями та регуляторними органами.

Сучасні інструменти для візуалізації

Pix4D, DroneDeploy, Agisoft Metashape: будують карти та 3D-моделі із знімків дронів.

EOS Crop Monitoring, OneSoil, Climate FieldView: онлайн-платформи для інтеграції супутникових та аеро-даних.

QGIS, ArcGIS: професійні ГІС-системи для комплексного аналізу, поєднання різних шарів (грунт, агротехніка, індекси).

«Використання ГІС-систем та інтерактивних платформ дозволяє поєднувати агрономічну, технологічну та економічну інформацію для побудови комплексних карт рішень» [31].

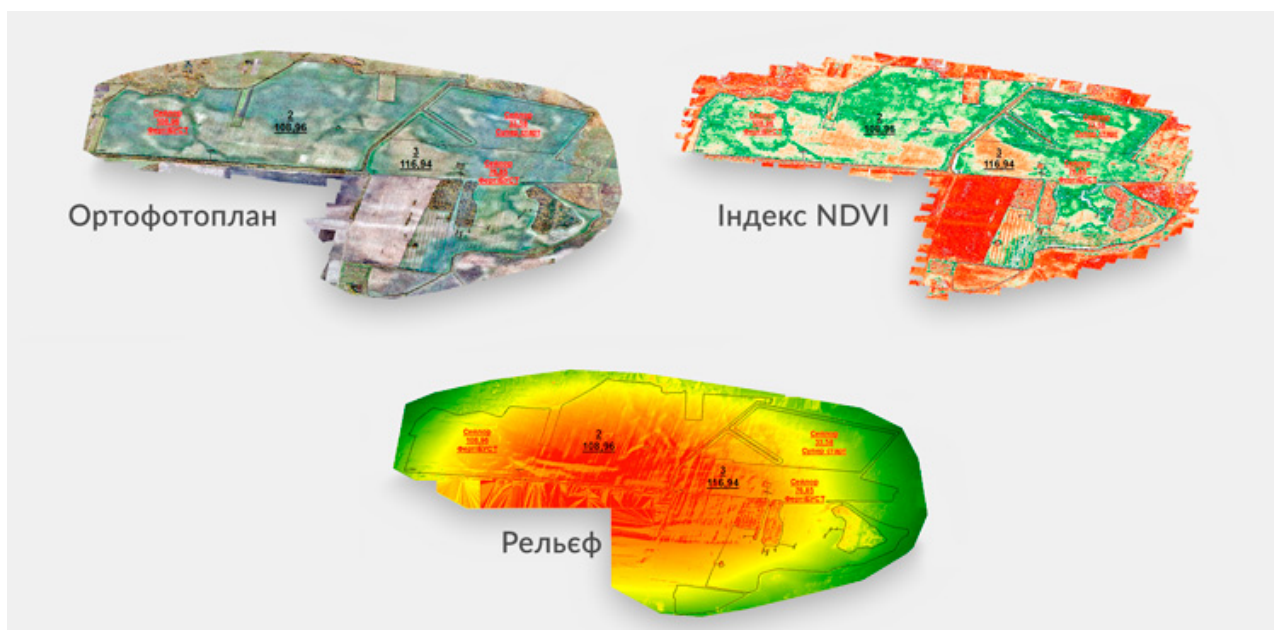


Рис. 2.11. Приклади звітів ToB3 “Фаворит-Агро”, зроблених за допомогою БПЛА.Джерело: <https://www.smartfarming.ua/favoryty-favoryt-ahro-dosvid-vprovadzhennya-bezpilotnykh-tekhnohohiy/>

Прийняття рішень на основі візуалізації

Візуалізація даних дистанційного моніторингу перетворює зібрану інформацію на конкретні дії у полі, що безпосередньо впливають на врожайність і економічну ефективність господарства.

1. Зонування поля для диференційованих робіт

На основі індексних карт (NDVI, GNDVI, NDRE, температурних тощо) автоматично формуються карти-завдання для техніки з підтримкою VRA (Variable Rate Application).

Такі карти дозволяють:

- Диференційовано вносити добрива з урахуванням стану рослин у кожній ділянці поля.
- Проводити підживлення лише там, де рослини відчувають дефіцит поживних речовин.

- Точково застосовувати засоби захисту рослин (ЗЗР) у зонах виявленого стресу, замість обробки всього поля.
- Виконувати додатковий полив у ділянках з ознаками водного дефіциту.

2. Планування обстеження й лабораторних аналізів

Зони з низькими значеннями NDVI або аномальною температурою маркуються на карті та експортуються у GPS-навігатори для точного виїзду агронома на місце. Такий підхід забезпечує адресну діагностику проблем, а не випадковий відбір проб.

У цих ділянках проводять:

- Візуальний огляд рослин на предмет стресу, шкідників чи хвороб.
- Відбір зразків ґрунту для агрохімічного аналізу (азот, фосфор, калій, рН, мікроелементи).
- Відбір рослинних зразків для визначення дефіциту поживних речовин чи наявності патогенів.
- Аналіз води у зрошуваних зонах.

3. Оцінка ефективності проведених заходів

Порівнюють карти “до” і “після” технологічної операції (наприклад, підживлення, внесення ЗЗР або поливу) для об’єктивної оцінки впливу на стан рослин.

- Визначають динаміку змін індексів та співвідносять їх із польовими спостереженнями.
- Розраховують економічний ефект, зіставляючи вартість проведеного заходу з приростом урожайності або зменшенням втрат.
- Формують звіти для керівництва, інвесторів чи страхових компаній з картами, графіками та висновками.

2.3. Штучний інтелект і машинне навчання в обробці даних

Штучний інтелект (ШІ/AI) – це комплекс програмних і математичних технологій, здатних аналізувати великі масиви даних, виявляти приховані закономірності, робити прогнози та приймати рішення, які часто недосяжні для людини через обсяг або складність інформації. На відміну від традиційних алгоритмів, які діють за чітко заданими правилами, ШІ може адаптуватися та вдосконалюватися, “вчитися” на нових даних і підлаштовувати моделі аналізу під змінні умови (рис.2.12).



Ринок штучного інтелекту в агро зросте до 4,7 млрд. доларів США у 2028 році

Рис. 2.12. Викристання AI в агрономії. Джерело: <https://agriteka.com/2446-rinok-shtuchnogo-ntelektu-v-agro-zroste-do-47-mlrd-dolarv-ssha.html>

Машинне навчання (ML) – ключовий підрозділ ШІ, що дозволяє системам самостійно підвищувати точність аналізу на основі накопиченого досвіду.

Принцип роботи полягає у побудові математичних моделей, які “навчаються” на історичних даних, а потім використовуються для аналізу нових випадків (рис.2.13, рис.2.14).

Сучасні БПЛА та супутники генерують мільйони пікселів і тисячі гектарів даних за один політ. Людина не може в ручному режимі аналізувати такі обсяги.

Саме тут і потрібні автоматизовані алгоритми ШІ/AI для:

- автоматичної обробки знімків,
- розпізнавання типу культур, бур’янів, шкідників,
- класифікації стану посівів,
- прогнозування врожайності,
- аналізу змін за роки.

Де використовують ШІ/AI у дистанційному моніторингу?

Автоматична класифікація стану рослин

- Аналіз індексних карт (NDVI, GNDVI, NDRE) та спектральних характеристик.
- ШІ/AI розпізнає зони стресу, хвороб, дефіциту живлення без “ручного” обводу.
- Дає можливість автоматично сегментувати карту поля за типом стану рослинності.

«Використання глибоких нейронних мереж дозволяє автоматично класифікувати ділянки поля за рівнем розвитку, щільністю сходів, наявністю бур'янів чи ураженням хворобами, базуючись на навчанні на архівних знімках і зразках.» [31]



Рис. 2.13. Приклад виявлення бур'янів на поле – символізовані зеленим і фіолетовим кольорами ділянки, контраст біля культурних рослин. Джерело: <https://www.ipb.uni-bonn.de/wp-content/papercite-data/pdf/lotte17icra.pdf>



Рис. 2.14. Технологія дистанційного визначення бур'янів. Джерело: <https://propozitsiya.com/articles/ahrobiznes/tekhnohiiyi-dystantsiynoho-vyznachennya-buryaniv>

Розпізнавання бур'янів та шкідників

- БПЛА з RGB- або мультиспектральними камерами можуть “побачити” бур'яни навіть у фазі сходів.
- ШІ/АІ виділяє “підозрілі” ділянки, агроном отримує карту для точкового внесення гербіцидів.
- Аналогічно працює виявлення плям хвороб, локалізація колоній шкідників.

Прогнозування врожайності

Алгоритми машинного навчання аналізують дані за кілька років, враховують погодні фактори, стан ґрунтів, типи гібридів.

За індексами, супутниковими чи аероданими робиться прогноз врожайності по ділянках.

Роль штучного інтелекту в оптимізації агропромислового виробництва в Україні

Штучний інтелект змінив «правила гри» у різних галузях, і сільське господарство не стало винятком. Однією з найперспективніших областей стала інтеграція ШІ саме в аграрний та тваринницький сектор.



Рис.2.15: Джерело: <https://www.facenews.ua/press/2024/526156/>

Оптимізація агротехнологій

Алгоритми ШІ/АІ знаходять закономірності між технологічними операціями, ґрунтовими умовами та результатом.

Агроном отримує рекомендації: де збільшити норму добрив, де змінити гібрид, а де внести пестициди.

Важливо пам'ятати: Штучний інтелект – це новий рівень агромоніторингу, він дозволяє бачити невидимі закономірності, робити прогнози та приймати рішення швидко й ефективно, навіть на величезних площах. Важливо проводити додаткову перевірку даних, щоб уникнути неточностей та помилок.

Рис.2.15

Висновок

Дистанційний агроскаутинг є ключовим інструментом сучасного точного землеробства, який забезпечує оперативне, об'єктивне та масштабоване

отримання інформації про стан посівів і агроєкосистем. Поєднання даних із безпілотних літальних апаратів, супутникових платформ і наземних сенсорів дозволяє значно перевищити можливості традиційних методів польового обстеження.

Фізичні основи взаємодії електромагнітного випромінювання з рослинами та використання вегетаційних індексів створюють наукову базу для кількісної оцінки фізіологічного стану культур, виявлення стресів і прогнозування врожайності. Важливу роль відіграють правильне оброблення, інтерпретація та візуалізація отриманих даних, які дають змогу перетворити «сирі» знімки на індексні карти, аналітичні матеріали й практичні рекомендації для ухвалення агрономічних рішень.

Контрольні завдання для самоперевірки знань

1. Розкрийте поняття дистанційного агроскаутингу та поясніть його роль у системі точного землеробства.
2. Які основні переваги дистанційного моніторингу посівів порівняно з традиційними польовими обстеженнями?
3. Поясніть фізичні основи взаємодії електромагнітного випромінювання з рослинними тканинами.
4. Що таке спектральний «підпис» рослин і яку інформацію він несе для агроскаутингу?
5. Охарактеризуйте принцип розрахунку вегетаційного індексу NDVI та його інтерпретацію.
6. Опишіть основні етапи обробки та інтерпретації даних, отриманих методом дистанційного агроскаутингу.
7. Яку роль відіграє візуалізація даних у прийнятті агрономічних рішень?
8. Наведіть приклади практичного використання результатів агроскаутингу.
9. Які можливості надає застосування штучного інтелекту та машинного навчання в аналізі даних дистанційного моніторингу?

РОЗДІЛ 3. Організаційно-економічні механізми управління ресурсами аграрного виробництва

У результаті опрацювання цієї теми здобувач освіти:

Набуде цілісного уявлення про організаційні та економічні засади впровадження дистанційного агроскаутингу й дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів у систему управління аграрним підприємством, про місце цифрових даних у процесах планування, контролю та прийняття управлінських рішень, а також про роль індикативного бюджетування в умовах цифрової трансформації агробізнесу.

Оволодіє знаннями щодо принципів індикативного бюджетування, економічної оцінки впровадження БПЛА та цифрових інструментів, методів розрахунку економічного ефекту, а також організаційних, кадрових, технічних і нормативно-правових аспектів використання безпілотних технологій в агровиробництві.

Отримає практичні навички використання результатів агроскаутингу для коригування виробничо-фінансових планів, формування гнучких бюджетів, оцінки економічної доцільності інвестицій у ДК БПЛА, підготовки аналітичних матеріалів для менеджменту та прийняття обґрунтованих рішень щодо оптимізації витрат, підвищення прибутковості й сталого розвитку аграрного підприємства.

3.1. Агроскаутинг в системі індикативного бюджетування як інструмент підвищення ефективності управління ресурсами підприємств

Сучасний етап розвитку економіки сільського господарства зумовлює високі вимоги до оцінки ефективності функціонування економічних систем різних рівнів. Підприємство є первинною самостійною ланкою сільського господарства, що створює конкретні економічні блага. Специфіка аграрного виробництва обумовлює потребу безперервного залучення додаткових обігових коштів і контролю за їх раціональним використанням. Особливого значення це питання набуває для великих компаній з потужним приватним капіталом, які мають у своєму користуванні значні земельні масиви, територіально розміщені в різних регіонах, що ускладнює процес управління та вимагає залучення прогресивних систем і методів управління ними.

Прибуток є головним економічним показником діяльності підприємства в умовах ринку. Він залежить від витратної частини, тобто від уваги кожного спеціаліста на робочому місці. З метою запобігання понаднормовим витратам протягом бюджетного періоду проводиться періодичний моніторинг поточної

діяльності підприємства шляхом порівняння об'ємів витрат із бюджетними стандартами.

Бюджетування – технологія фінансового планування, обліку й контролю доходів і витрат, отриманих від діяльності підприємства (компанії, холдингу) на всіх рівнях управління, котра допомагає аналізувати прогнозовані й отримані фінансові показники по кожному з центрів фінансового обліку в рамках затвердженої фінансової структури підприємства. Це невіддільний компонент складання виробничо-фінансових планів діяльності підприємства. Метою запровадження системи бюджетування є максимізація прибутку завдяки формулюванню цілей і шляхів їх вирішення, посиленню контролю за витратами, підвищенню ефективності використання наявних ресурсів, розвитку найефективніших напрямів господарської діяльності, підвищенню фінансової обґрунтованості управлінських рішень, оптимізації грошових потоків, раціональному перерозподілу ресурсів між різними видами діяльності.

В умовах цифрової трансформації особливої ваги набувають системи, що поєднують технологічні дані з фінансово-економічними рішеннями. Однією з таких систем є агроскаутинг – інструмент моніторингу стану посівів і земель, який забезпечує оперативне отримання аналітичної інформації для планування та бюджетування. Поєднання агроскаутингу з системою бюджетування створює підґрунтя для індикативного управління, коли виробничі й фінансові рішення базуються на поточних даних із полів, а не лише на планових показниках.

Тріада «Бюджетування – Агроскаутинг – Управління» утворюють єдину управлінську систему. Взаємодія між ними забезпечує замкнений цикл управління ресурсами, в якому кожне рішення спирається на актуальні аналітичні дані. Агроскаутинг формує новий рівень точності планування та бюджетного контролю. Використання БПЛА допомагає оперативно оцінювати стан посівів й ухвалювати рішення, що зменшують фінансові ризики. Інтеграція даних агроскаутингу в систему бюджетування забезпечує гнучкість, точність й ефективність управління. Такий підхід сприяє переходу агропідприємств до цифрового фінансового менеджменту, що відповідає вимогам сталого розвитку.

В цих умовах перед фінансово-економічною службою підприємства ставляться завдання – формування єдиної економічної політики у сферах планування, нормування, мотивації та комплексного економічного аналізу виробничо-господарської діяльності підприємства в цілому та відокремлених підрозділів зокрема, визначення шляхів підвищення ефективності й рентабельності виробництва; посилення контролю за реалізацією в проєктній документації політики ресурсо- й енергозбереження; застосування вискоєфективних технологій, обладнання, конструкцій, матеріалів, додержання загальногосподарських і галузевих норм. Одним з основних шляхів вирішення цих завдань є імплементація даних цифрового моніторингу в діючий виробничо-фінансовий план діяльності підприємства.

Процедура складання виробничо-фінансового плану підприємства наведена на рис. 3.1. Виробничо-фінансовий план формується на 12 місяців із помісячною його деталізацією. Кожна служба підприємства має розкрити в ньому бачення розвитку підприємства по своєму профілю: агрономічна служба – виробничу програму з рослинництва (структуру посівних площ, посів блоками по підрозділах, систему удобрення та захисту рослин, планову врожайність, технологічні карти); інженерна служба – план оновлення техніки, план ремонтів і матеріально-технічного забезпечення виробництва; зооінженерна служба – програму розвитку тваринництва (оборот стада, потребу забезпечення власними й покупними кормами). Обов'язковими водночас є достовірність, повнота і правильність відображення інформації про ці процеси в бухгалтерському й управлінському обліку. Головний економіст є модератором процесів поряд із методичним керівництвом процесу планування. Він спільно з іншими спеціалістами підприємства здійснює узагальнення показників усіх розділів бюджету й організовує підготовчу роботу до складання зведеного бюджету, а також проводить індикативне планування – поточне внесення фактичних даних за I, II і III квартал у вихідний план із метою прогнозу фінансових результатів.

Основою будь-якого бюджету є «Виробнича програма з рослинництва». Вона відбиває:

- план землекористування – планується склад і площа земельних угідь, визначається загальна кількість земель у власності й користуванні;
- структуру посівних площ – позначаються площі посіву сільськогосподарських культур і питома вага кожної з них (у відсотках), далі розписується розміщення площ у розрізі сівозмін, що допомагає краще вибрати попередника і контролювати дотримання культури землеробства.

Виходячи з даних площ сівозмін планується потреба в насінні, добривах і засобах захисту рослин під кожен культуру в натуральному та вартісному вираженні як на всю площу посіву культури, так і в розрахунку на одиницю площі. Залежно від кількості понесених затрат і природно-кліматичних умов регіону планується виробниче завдання з урожайності сільськогосподарських культур.

Наступним кроком у плануванні є узагальнення попередніх даних у технологічних картах вирощування сільськогосподарських культур, на основі яких формується помісячний кошторис прямих витрат у рослинництві. Це зведена таблиця, що допомагає спланувати потребу в коштах, що будуть затрачені прямо на культури. Є вихідним для складання наступної таблиці – зведеного плану виробництва і собівартості продукції, де в консолідованому вигляді наводиться інформація про збір продукції та її собівартість у розрізі окремих культур і статей затрат. Водночас відбивається розподіл по кожній культурі між видами продукції (зерно, зерновідходи, побічна продукція) за

офіційними методиками. Затрати наводяться в розрахунку на 1 тону продукції та на 1 гектар площі.

Індикативне бюджетування – це форма гнучкого бюджетування, за якої фінансові та виробничі показники не є жорстко фіксованими, а періодично коригуються на основі фактичних результатів діяльності, змін зовнішнього середовища й оновлених даних агроскаутингу. Інакше кажучи, це бюджетування з елементами прогнозування, яке поєднує планові та реальні показники для більш точного управління підприємством. Тобто ми переходимо від шаблонів і бюрократії до оперативнішого реагування на виклики й специфіку оперативної зміни умов виробництва.

Здебільшого у великих компаніях бюджетний процес розпочинається в жовтні. В грудні відбувається його захист. При закритті року в лютому вносяться корегування за фактом незавершеного виробництва. Далі відбувається помісячний план-факт аналіз дотримання бюджетних витрат (рис.3.1).

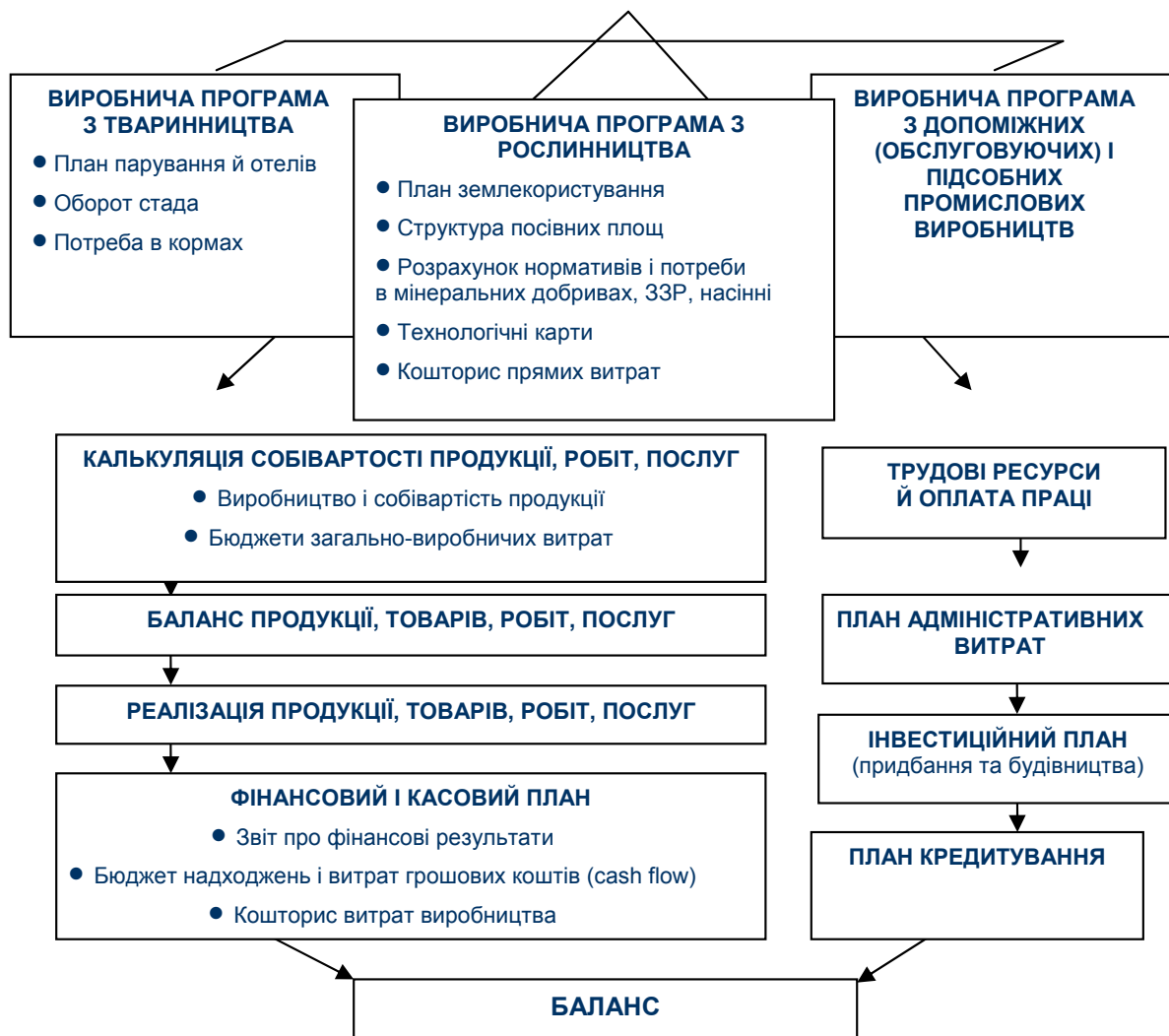


Рис. 3.1: Процедура складання виробничо-фінансового плану

Джерело: підготовлено авторами на основі: [26]

Фактично до збирання врожаю керівництво компанії потрапляє в «сліпу зону» і не завжди, з різних причин, володіє всією повнотою інформації про стан полів. А наявна інформація здебільшого має вибірковий характер із метою прикрити ті чи інші огріхи сезону або агрономічної служби. Адже агронома передусім цікавить урожай з поля (натуральний, або валовий показник), а не прибуток. А керівнику потрібно більш чітка фінансова інформація, починаючи з площі поля: яка вона реальна (посівна), а не фізична.

Приклад: агроном засіяв 100 га. Чи розорав ще додатково 7 га біля лісосмуг, чи частина поля взагалі випала з обробітку через «лебедині озера» або погані сходи врожаю тощо. Чи доцільним є внесення тих чи інших запланованих препаратів, зокрема добрив, якщо не було опадів? Відповідно далі накладається витрата матеріально-технічних ресурсів промислового походження (добрива, ЗЗР, насіння, пальне), заробітна плата як наслідок виконання форвардних контрактів й інвестиційних програм.

«Ми заробляємо те, що ми економимо» – ця теза якраз про нашу ситуацію. Агроскаутинг дає саме ті оперативні індикатори, на яких ґрунтується гнучке бюджетування: площа, вологість, густина посівів, рівень ураження культур, NDVI-показники, прогноз урожайності. Тобто він є основним джерелом індикативних даних, що допомагають уточнювати бюджет у процесі його виконання. Наприклад, після весняного обстеження полів за допомогою БПЛА (агроскаутингу) виявлено ділянки з низькою густиною посівів. На основі цих даних агрономічна служба вносить корективи: зменшує норми добрив на пошкоджених ділянках, перераховує очікувану врожайність, а головний економіст оновлює виробничо-фінансовий план (бюджет) з урахуванням реальної ситуації. Це і є індикативне бюджетування – коли бюджет не статичний документ, а жива модель управління. Менеджмент компанії, керуючись інформацією агроскаутингу, отриманою внаслідок аналізу й оцінки ефективності окремих галузей і підприємства загалом, здійснює управління виробничим процесом, ухвалює рішення про впорядкування фінансової документації, посилює контроль за рухом товарно-матеріальних цінностей.

Основна ідея індикативного бюджетування полягає в тому, щоб планувати діяльність на певний період (рік, сезон, квартал), відстежувати фактичні результати (виробничі, фінансові, агротехнічні), коригувати бюджет у процесі його виконання відповідно до змін (погоди, врожайності, ринкових цін, витрат тощо). Так підприємство керує бюджетом у режимі реального часу, а не лише звітує про результати після завершення року (таблиця 3.1.).

Таблиця 3.1. Трансформація системи бюджетування з елементами агроскаутингу в умовах Agriculture 4.0

Ознака	Традиційне бюджетування	Індикативне бюджетування
Гнучкість	Фіксовані плани на рік	Плани змінюються в процесі
Дані для ухвалення рішень	Бухгалтерські, історичні	Оперативні, прогнозні, польові
Контроль	Реактивний (після виконання)	Проактивний (у процесі виконання)
Інструменти	Звітність, кошториси	Цифрові моделі, агроскаутинг, аналітика
Мета	Дотримання плану	Досягнення оптимального результату

Джерело: підготовлено авторами на основі: [26]

Переваги індикативного бюджетування:

- оперативність – дає змогу реагувати на зміни в реальному часі;
- точність – враховує реальні дані з виробництва;
- економічна ефективність – мінімізує перевитрати ресурсів;
- прогнозування ризиків – виявляє відхилення до того, як вони призведуть до збитків;
- синергія з цифровими технологіями – працює на основі даних агроскаутингу, ERP-систем і аналітичних платформ.

Агроскаутинг як інформаційна основа планування забезпечує господарство оперативною аналітикою про стан агроценозів: визначення зон стресу і дефіциту живлення; оцінка вологи, поширення бур'янів і шкідників; прогноз урожайності за допомогою мультиспектральних індексів (NDVI, NDRE, GNDVI). Ці дані дають змогу коригувати плани внесення добрив і ЗЗР, уточнювати потребу в паливі й техніці, моделювати реальні фінансові витрати за культурами, прогнозувати дохідність полів і визначати пріоритетні напрями розвитку. Отже, агроскаутинг стає інформаційним ядром планово-бюджетної системи, де дані з БПЛА безпосередньо впливають на структуру бюджету підприємства.

Кліматична мінливість, зміна цін і коливання врожайності потребують динамічної моделі управління. Інтеграція агроскаутингу допомагає перейти до гнучкого планування, де інформація з полів автоматично коригує бюджетні показники.

Послідовність інтеграції:

- моніторинг полів – збір даних за допомогою БПЛА;
- аналітична обробка – розрахунок індексів і побудова карт;

- передача даних у систему планування (ERP або управлінський облік);
- коригування бюджетів – автоматичне оновлення фінансових прогнозів;
- індикативний контроль – регулярне порівняння планових і фактичних даних.

У результаті підприємство отримує інтерактивний фінансовий план, що реагує на реальні зміни у виробничому середовищі.



Рис 3.2. Агроскаутинг як інструмент інноваційного управління ресурсами в умовах Agriculture 4.0. Джерело: підготовлено авторами на основі: [17]

Основні складники економічної ефективності агроскаутингу.

Рациональне використання ресурсів. Застосування NDVI-, GNDVI-, NDRE-карт дає змогу створювати карти-завдання для диференційованого внесення добрив і засобів захисту рослин. Завдяки цьому економія мінеральних добрив може становити 15–30 %, ЗЗР – 10–20 %, а паливно-мастильних матеріалів – 5–10 % (рис. 3.2).

Зменшення непродуктивних витрат. Раннє виявлення осередків хвороб і бур'янів дає змогу проводити локальні обробки, а не суцільне обприскування. Економія площі обробки при цьому може сягати до 40%.

Підвищення врожайності. Своєчасне виявлення проблемних зон допомагає мінімізувати втрати врожаю. У середньому впровадження систем дистанційного моніторингу забезпечує приріст урожайності на 5–15 % залежно від культури й технології.

Зниження впливу людського чинника. Автоматизація моніторингу зменшує потребу в польових інспекціях, скорочуючи витрати на оплату праці на 10–25 %.

Оптимізація страхових й управлінських рішень. Карти стану полів (NDVI, температурні карти, карти вологи) використовуються як доказова база для страхових компаній або компенсаційних програм. Це зменшує ризики фінансових втрат і підвищує довіру до систем управління господарством.

Агроскаутинг формує новий тип економічної цінності – інформаційну, що допомагає на основі накопичених баз даних здійснювати стратегічне планування, аналіз ефективності агротехнологій, прогнозування фінансових результатів і формування інноваційної моделі розвитку аграрного бізнесу на 3–5 років. Впровадження такої системи підвищує прозорість управління, покращує мотивацію персоналу та сприяє формуванню культури ухвалення рішень на основі даних (data-driven agriculture).

Крім безпосередніх фінансових вигод, впровадження агроскаутингу сприяє підвищенню екологічної стійкості виробництва завдяки зменшенню перевитрат ресурсів, створенню нових робочих місць у сфері цифрового агросервісу й аналітики, підвищенню інвестиційної привабливості господарств, що впроваджують інноваційні технології.

Досягнення значних організаційних змін і стратегічних результатів можливе лише за умови, що керівник бюджетного процесу на підприємстві має стратегічне бачення розвитку бізнесу, володіє навичками мотивації персоналу, уміє визначати пріоритети та залучати працівників відповідно до завдань, які необхідно виконати. Важливим при цьому є запровадження на підприємстві стратегії роботи з персоналом, що буде поєднувати створення корпоративної культури, розробку мотиваційних схем, програму навчання та розвитку спеціалістів.

Впровадження системи індикативного бюджетування на основі агроскаутингу є перспективним для розвитку як великих агрохолдингів, так і дрібних фермерських господарств, оскільки дає змогу сформулювати цілі розвитку організації та оцінити практичні можливості їх досягнення, забезпечувати раціональне використання матеріальних і трудових ресурсів, оптимізувати витрати й посилити контроль за виробництвом. Невіддільними складниками цієї системи мають бути посилення ролі менеджменту у фінансовому оздоровленні сільськогосподарського виробництва, організація навчання і професійного розвитку працівників, а також забезпечення їхньої належної мотивації. Економічну модель капіталовкладень в агроскаутинг наведено в табл. 3.2.

Агроскаутинг у системі індикативного бюджетування є ефективним інструментом управління агровиробництвом, який забезпечує оперативне отримання та використання достовірних даних для планування, контролю й коригування виробничо-фінансових показників. Інтеграція даних агроскаутингу з процесом бюджетування допомагає своєчасно реагувати на зміни в стані посівів, оптимізувати використання ресурсів і знижувати витрати. Такий підхід підвищує точність управлінських рішень, сприяє зростанню ефективності

виробництва та формує основу для стратегічного планування розвитку аграрного підприємства.

Таблиця 3.2. Економічна модель капіталовкладень в агроскаутинг.

Показник	Значення/ Діапазон	Примітка
Початкова інвестиція в БПЛА з мультиспектральною камерою	5 000–10 000 USD	Залежить від моделі дрона, камери й комплектації
Вартість програмного забезпечення (Pix4D, DroneDeploy, Agisoft)	500 – 2000 USD/рік	Вартість залежить від кількості користувачів і функціоналу
Середня площа обстеження	100–300 га/день	Впливає рельєф місцевості, тип культур, тривалість польоту
Термін окупності системи	1–2 роки	За умови регулярного використання на площі понад 1000 га
Економічний ефект від використання БПЛА	20–30 %	Від загальної вартості ресурсів, що витрачаються на вирощування культур

3.2. Економіка впровадження дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів та цифрових інструментів у практику агровиробництва

Цифрова агрономіка сьогодні є новим інструментом формування доданої вартості в сільському господарстві. БПЛА інтегрують точність, ефективність і екологічність, формуючи основу сучасного цифрового сільського господарства. Їх застосування дозволяє агровиробникам підвищувати економічну результативність, знижувати витрати та впроваджувати інноваційні підходи до управління виробництвом.

Нині агроном має бути не лише експертом у рослинництві, а й активним користувачем цифрових аналітичних інструментів. Для аналізу даних агрономові необхідно володіти цифровими інструментами, зокрема вміти інтерпретувати графіки та карти NDVI, працювати з геоданими й API-системами, наприклад Cropwise або SmartESS. Дрони водночас є фізичним інструментом-помічником агронома, який дає змогу в режимі реального часу контролювати стан посівів, перевіряти результати супутникової аналітики та оперативно виконувати технологічні операції в зонах, де використання традиційних агрегатів неможливе або економічно недоцільне.

Ринок агродронів динамічно розвивається. Якщо у 2024 році його обсяг оцінювали в 73,19 млрд дол. США, то, за прогнозами, до 2035 року він зросте до 130,61 млрд дол. США із середньорічним темпом зростання 5,3 % упродовж прогнозованого періоду.

Відносно Європейського ринку, якщо у 2023 році його обсяг оцінювався у 1,94 млрд доларів то у 2024 він зріс до 2,6 млрд доларів або на 33,7%, а відповідно до звіту The Business Research Company до 2028 року він може сягнути 7,62 млрд дол., а до 2034 року до 17,64 мільярда доларів. Так, ріст інвестицій у агродрони у Німеччині очікується з 450 мільйонів доларів США у 2024 році до 5000 мільйонів доларів США до 2035 року. Очікується, що з 2025 по 2035 рік складний річний темп зростання (CAGR) становитиме 24,45%. Зростаючий попит на точне землеробство, ймовірно, стимулюватиме впровадження сільськогосподарських БПЛА по всій Європі. Зростаюче впровадження технології БПЛА через потребу в посиленому моніторингу врожаю є основним рушієм ринку. Прогнозується, що до 2035 року тільки сегмент програмного забезпечення на європейському ринку сільськогосподарських дронів досягне значення 6,34 мільярда доларів США (рис. 3.3).

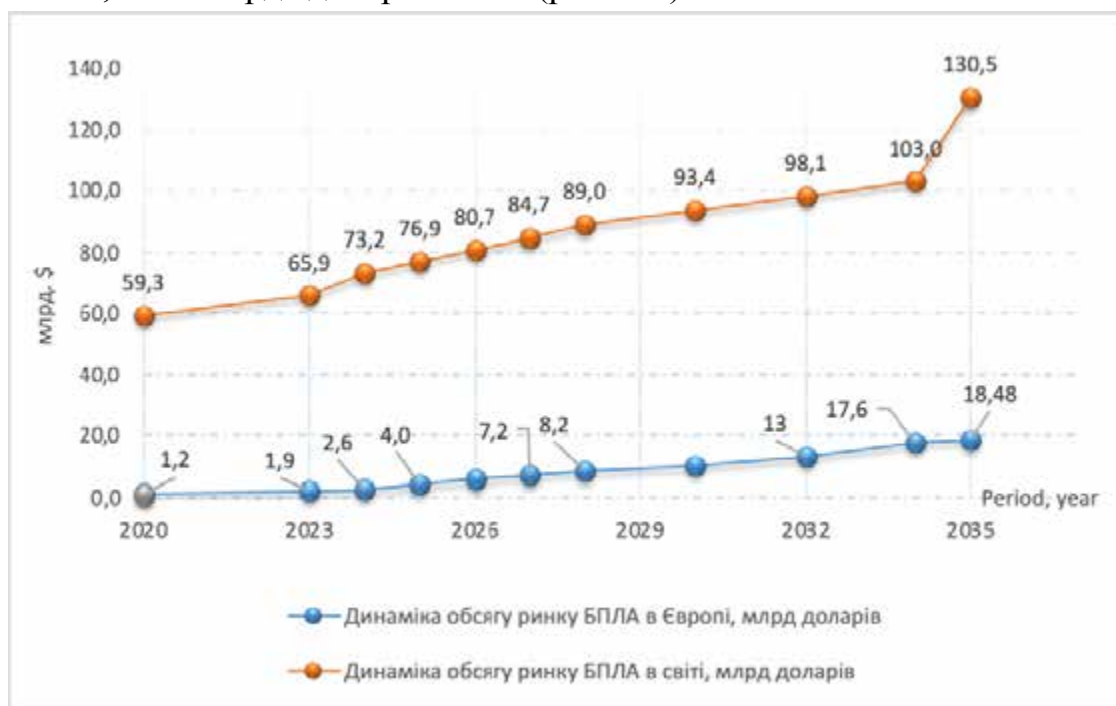


Рис. 3.3. Динаміка обсягу ринку БПЛА в Європі та світі. Джерело: підготовлено авторами на основі [16] і власних досліджень

Ключові компанії: Дрони Romeo, Insitu, Skydio, Mapteks, Mavinci, Yamaha Motor, DroneDeploy, senseFly, Quantum Systems, DJI, Parrot, Aerialtronics, AgEagle, PrecisionHawk, Delair.

Ключові можливості ринку: Впровадження точного землеробства, інтеграція практик сталого ведення сільського господарства, передові рішення для моніторингу сільськогосподарських культур, підтримка нормативно-

правової бази, партнерство в галузі агротехнологічних інновацій. Так, в Нідерландах вже невеликі безпілотники полюють на шкідників, знищуючи їх власними пропелерами. Вони ж розпізнають і не чіпають корисних комах, таких як бджіл, сонечок та джмелів. А в Бельгії розробили спеціалізований дрон для підрахунку фруктів та ягід в саду та на плантації. Він допомагає виробникам сільгосппродукції точніше прогнозувати врожай. Ізраїль також не відстає, тут розробили літального автономного робота, що може самостійно збирати фрукти в садах вдень і вночі, без допомоги людини.

Ключовими чинниками розвитку ринку є підвищення ефективності виробництва сільськогосподарських культур, удосконалення нормативно-правового регулювання, технологічний прогрес у сфері БПЛА, зростання вартості робочої сили та поширення технологій точного землеробства.

Ріст світової індустрії дронів зумовлений швидким прогресом у штучний інтелект, інтеграція датчиків та модульний дизайн. Водночас це зростання загострило конкуренцію, зробивши брендинг стратегічним пріоритетом, а не лише маркетинговим інструментом.

Цифрові інструменти монетизації виробництва завдяки аналізу даних стали еволюційним інструментом розвитку економіки сільського господарства. В значній мірі цьому посприяло впровадження методів точного землеробства, брак робочої сили в аграрному секторі, регуляторна підтримка, прагнення фермерів до економічної ефективності та операційної гнучкості, зростання кількості населення у світі та попит на продукти харчування.

Таблиця 3.3. демонструє ключові переваги використання безпілотних літальних апаратів у сільському господарстві, зокрема їхню оперативність, точність, економічну ефективність, екологічність, автоматизацію процесів, масштабованість і здатність виконувати багатофункціональні завдання навіть у важкодоступних ділянках.

Застосування геоінформаційних технологій у сільському господарстві можливо як на регіональному, так і на державному рівнях для вертикальної (між різними рівнями управління) та горизонтальної (між господарствами або організаціями одного рівня) координацій дій. Серед найвідоміших і найефективніших провайдерів цього сервісу такі компанії: «Cropio», «eLeaf», «Precision Agriculture», «Astrum-Geo», «MapExpert». Використання цих систем дозволяє не тільки оперативно стежити за станом сільськогосподарських угідь, а й у режимі реального часу отримувати звіти і повідомлення про виробництво; робити прогнози щодо врожайності полів, а також стану господарства цілком; отримувати супутню інформацію про ринки сільгосппродукції, котирування валют і ціни сільськогосподарських товарів на окремих біржах. Перспективним напрямом майбутніх досліджень слід вказати аналіз можливостей контролю за допомогою технологій дистанційного зондування земель за тінговою економікою в аграрному секторі.

Таблиця 3.3. Економічні ефекти застосування повітряних безпілотних літальних апаратів БПЛА в умовах Agriculture 4.0

ОПЕРАТИВНІСТЬ Отримання даних за 1 політ, день	ТОЧНІСТЬ Виявлення проблем з точністю 2–5 см (NDVI, зйомка)	ЗНИЖЕННЯ ВИТРАТ Оптимізація добрив, ЗЗР, води (до -30%)
ПІДВИЩЕННЯ ВРОЖАЙНОСТІ (5–20%) Раннє реагування на хвороби та стрес рослин, без технологічного витоптування посівів	АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ дозволяє скоротити час підготовки управлінських звітів із 5–6 годин до 20–30 хвилин, виключивши ручні помилки	БЕЗПЕЧНІСТЬ ТА ЕКОЛОГІЧНІСТЬ зменшення витрат ресурсів - менше шкоди довкіллю, оцінки викидів CO ₂ та обрахунку потенціалу вуглецевих кредитів
МАСШТАБОВАНІСТЬ Для будь-яких господарств	БАГАТО-ФУНКЦІОНАЛЬНІСТЬ Моніторинг, карти, 3D-рельєф, NDVI, NDRE, індекси вегетації, формування карт-завдань для точного внесення добрив і ЗЗР	ДОСТУПНІСТЬ ВАЖКИХ ДІЛЯНОК ділянки з заболоченням, складним рельєфом і доступом техніки

Джерело: підготовлено авторами на основі [16] і власних досліджень

Китай, Індонезія, країни Південної Африки, В'єтнам – вже досить давно працюють дронами-обприскувачами і мають шалений досвід їхнього застосування. Лідерами в Європі є: Німеччина, Велика Британія, Франція, Італія, Іспанія. Щодо України, то тут більше стоїть питання офіційної реєстрації препаратів із окремими характеристиками (дозволено/рекомендовано вносити дронами) із чітко вказаними пропорціями, що надасть агрономам певних гарантій у роботі. Бо наразі дозування препаратів відбувається включно на страх і ризик агрономів-керівників.

Основними типами БПЛА, що використовуються є:

- 1) коптери (багатороторні апарати) які можуть зависати в повітрі, що дозволяє проводити детальну фото- та відеозйомку.
- 2) літаки літакового типу (крила) - можуть покривати значно більші площі, але вимагають злітно-посадкової смуги або запуску з руки.
- 3) Гібридні (поєднання коптера та літака) - моніторинг великих площ з можливістю вертикального зльоту/посадки, швидке реагування на локальні зміни, обстеження полів у складних умовах, комбінація маневровості коптера та тривалості польоту літака.

БПЛА – це універсальний інструмент цифрового землеробства, який об'єднує економічну ефективність, екологічну доцільність і технологічну точність. БПЛА є інструментом агронома для переходу від традиційного управління до даних, аналітики й автоматизованих рішень.

У схемі 1 відображено основні сфери використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в аграрному секторі, які охоплюють картографію та моніторинг, точне землеробство, внесення ресурсів і екологічну стійкість. Використання дронів дозволяє здійснювати діагностику стану культур, виявлення шкідників і хвороб, контроль зрошення та ерозійних процесів; підвищує ефективність точного землеробства завдяки зонуванню полів і контролю норм внесення добрив; забезпечує оперативне внесення засобів захисту рослин і добрив, зокрема у важкодоступних місцях, а також сприяє екологічній стійкості через зменшення використання хімікатів, оптимізацію ресурсів та скорочення вуглецевого сліду.

Сьогодні дрони використовують в першу чергу для моніторингу. Ідеться про спостереження за станом рослин на різних фазах їх розвитку. Це і оцінка забур'яненості, захворюваності та ураження шкідниками, визначення забезпеченості рослин елементами живлення та водою. За допомогою дронів, зокрема, виявляють перекриття та пропуски під час виконання технологічних операцій, здійснюють обмірювання полів, створюють візуальні й NDVI-карти, формують карти внесення добрив і засобів захисту рослин, вносять добрива, пестициди та трихограму, контролюють стан ґрунту й будують ґрунтові карти (рис. 3.4).



Рис. 3.4. Основні сфери використання БПЛА в аграрному секторі.
Джерело: підготовлено авторами на основі [16] і власних досліджень

Картографування полів слугує важливим інструментом для фермерів, який дозволяє візуалізувати стан земель, контролювати закономірності росту та приймати обґрунтовані рішення щодо управління сільськогосподарськими культурами. Система розвідки врожаю використовує дрони для оцінки стану рослин, раннього виявлення проблем та забезпечення своєчасного втручання для боротьби з хворобами чи шкідниками.

Аерофотознімання збирає дані для сільського господарства, спостерігаючи з висоти все, що відбувається на землі. Зазвичай супутники, які отримують дані, перебуваючи у космосі, є економічно ефективнішими. Натомість дрони, літаючи ближче до землі, мають свої переваги. Тому дрони і супутники не є повністю взаємозамінними, а вдало доповнюють один одного. Попри розвиток технології, зображення із супутників досі лишаються дещо пласкими і в даному контексті БПЛА є незамінними.

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) є ключовим інструментом точного землеробства, адже забезпечують швидкий і точний збір даних про стан посівів та ґрунтів. Завдяки сучасним камерам та сенсорам дрони дозволяють створювати карти вегетації, визначати неоднорідність розвитку культур, контролювати внесення добрив і засобів захисту, а також перевіряти якість виконання агротехнічних операцій. Інтеграція даних БПЛА з програмним забезпеченням для управління господарством дає змогу ухвалювати обґрунтовані рішення та оптимізувати використання ресурсів.

Екологічна стійкість сільськогосподарського виробництва значно посилюється завдяки використанню безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які дозволяють точно контролювати стан посівів і вносити хімічні препарати лише у необхідних зонах. Завдяки цьому скорочується використання засобів захисту рослин на 25–40 %, що не лише зменшує навантаження на екосистему, а й знижує ризик потрапляння пестицидів у ґрунтові води. Оптимізація використання ресурсів за допомогою БПЛА охоплює воду, добрива, паливо та робочий час. Якщо говорити про трендову у світі тему – зменшення карбонового сліду (викидів у атмосферу вуглецю), то технологія дронів-обприскувачів допомогла у 2021 році лише в Україні знизити на 14 тис. т викиди вуглецю [4].

Економіка використання технології БПЛА. Без дронів на сьогодні вже важко уявити прогресивне рослинництво. Адже економія води, палива, кількості внесених ЗЗР, мінімізація пошкоджень культури під час обприскування досить суттєва. Зокрема, застосування БПЛА забезпечує зниження витрат на паливо, засоби захисту рослин і добрива на 15–30 %, скорочення витрат води на 97 %, підвищення врожайності на 5–15 % завдяки точнішому контролю стану посівів і відсутності витоптування, а також скорочення тривалості агромоніторингу у 3–5 разів; окупність інвестицій у дрон ($\approx 200\,000$ – $500\,000$ грн) – за 2 сезони при площі обробітку понад 500 га.

Обприскування з повітря дає змогу вчасно виконати обробіток в умовах, коли наземна техніка елементарно не може заїхати у поле через підвищену вологість або ризики значних пошкоджень рослин по технологічній колії. За розрахунками, точка рентабельності, для сервісної компанії, при внесенні ЗЗР БПЛА орієнтовно становить 1500-1700 га. При цьому мінімальна площа замовлення за відстані до 50 км має становити близько 50 га. Стартовий капітал для входу в бізнес оцінюють приблизно від \$70-80 тисяч дол США. При цьому купувати потрібно мінімум два дрони на випадок виходу з ладу 1 в сезон робіт (таблиця 3.4.).

Таблиця 3.4. Порівняння техніко-економічних показників традиційних оприскувачів та безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у агровиробництві

Показник	Традиційні обприскувачі	БПЛА - обприскувачі
Норма виробітку, га	250 га/день	100 га/день
Вартість обробки 1 га/\$	\$10–25	\$7–11
Споживання води, л/га	200 л/га	5-8 л/га
Споживання ЗЗР	Повне внесення	До 30% економії ЗЗР
Втрати від витоптування	2–6% площі	0%
Тип енергії / пального	\$2–4 (дизель)	\$0.2–0.5 (1.5–3.5 кВт•год/га)
Складність обслуговування	Висока (гідравліка, ДВЗ)	Низька (модулі, батареї, ПЗ).
Доступність у важких умовах	Обмежена (після дощу, у горах, болотах)	Висока мобільність, мінімальні вимоги до рельєфу
Обмеження	Прохідність, погода. Нічний час	Батарея, погода
Екологічність	Викиди CO ₂ , ущільнення ґрунту	Екологічно чисте рішення
Обмеження по висоті культур	Є (~1.2–1.5 м)	Немає
Вартість техніки	\$30 000–250 000+	\$10 000–40 000
Точка рентабельності	17 0000 га	1400 -1700 га
Окупність інвестицій	сезонів	1-2 сезони

Джерело: підготовлено авторами на основі [16, 20] і власних досліджень

Для фермерського господарства за наявності 450 га придбання дрона окупається порівняно з десикацією самохідним оприскувачем орієнтовно за 1 сезон. В той же час у порівнянні з послугою десикації дроном це вже 9 років. Тому зрозумілим і очікуваним є розвиток сервісних компаній в даному сегменті.

Для локальних оброблень агродрони є єдиним ефективним рішенням, оскільки заганяти у поле великий обприскувач це надто довго і дорого.

Технологія ультрамалооб'ємного обприскування (УМО) є найвигіднішою для внесення ЗЗР: вона дозволяє знизити використання води на 96%, витрати робочого розчину на 30% та підвищує ступінь всмоктування речовини у кутикулу до 100%, та суттєво зменшує операційні витрати на паливо та логістику – у 20 разів. Рослина отримує таку саму кількість діючої речовини, як і при стандартному обприскуванні, але нанесення відбувається більш прицільно.

Дронами можна працювати вночі, при менших температурах повітря та поривах вітру. Дрони дають змогу обробляти культури, що ростуть суцільними посівами, не створюючи технологічних колій та зберігаючи від 2 до 10% майбутнього врожаю, залежно від специфіки культури. За годину сучасний дрон може із легкістю обробити 18 га посівів, при цьому витратити лише 2-2,5 літрів палива, що становить 0.11-0.13 л/га проти 1,5 л в самохідного.

Загалом, для ефективної роботи з дроном налаштовується 4 параметри: ширина паралельного прольоту, висота, норма виливу та швидкість польоту. Найбільш відповідний показник ширини – 7,5 м. Найоптимальніша висота – 4 м над посівами. На рівних полях можна працювати зі швидкістю до 23 км/год, а там, де рельєф складний – не більше 10-12 км/год (таблиця 3.5).

Таблиця 3.5. Окупність інвестиції у дрон порівняно з традиційним обробітком та послугою обробітку дроном

Показники	га
Площа ріпаку в господарстві, га	450,0
Площа технологічних проходів (5%), га	22,5
Урожайність, т/га	3,2
Втрата врожаю, т	72,0
Ціна ріпаку, грн/т	23 000,0
Вартість втрат господарства через витоптування ріпаку, грн	1 656 000,0
Варіан 1 Купити дрон	
Вартість сільськогосподарського дрона XAG P100 PRO (Робочий комплект)	1 259 000,0

Вартість причепа з обладнанням необхідним для проведення робіт (4 дверей , 2 відсіки, спеціальне кріплення під дрони. Освітлення 360° (3 зовнішні ліхтарі, акумулятор 12В 60Ан, зарядка для акумулятора). Смартфон для керування дроном. Набір дронориста (анемометр, тестер кислотності води, засоби захисту дихальних органів, ліхтарик налобний, рукавички хімістйкі, мірне відро та стакан, набір інструментів 108од., вогнегасник, каністра металева 20л, шланг з грушою для заправки генератора.)	199 500,0
Змішувально-заправна станція 200л	48 000,0
Генератор Matarì MX14000E 10,5 кВт	110 000,0
Операційні витрати на обробіток 450 га (ЗП, ТО, 1 аварійний ремонт, пальне)	58 690,0
Всього витрат на придбання дрона і обробіток	1 675 190,0
Окупність придбання дрона порівняно з десикацією самохідним оприскувачем, років	1,0
Варіант 2. Найняти послугу внесення дроном	
Ринкова вартість послуги десикації дроном, грн/га	400,0
Всього витрат при обробітку 450 га, грн	180 000,0
Окупність інвестиції у дрони порівняно з послугою внесення дроном, років	9,3

Попри численні переваги, використання БПЛА в сільському господарстві супроводжується й низкою проблемних питань, серед яких – висока вартість сучасних дронів і програмного забезпечення, потреба у кваліфікованих операторах з цифровими компетенціями, складність інтеграції з існуючими агросистемами управління, а також нормативні обмеження щодо польотів та обробки даних.

Проблемні аспекти економіки безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в агросекторі. Сьогодні агродрони це прогресивний але все ж таки допоміжний інструмент агронома порівняно із самохідними оприскувачами. І на це є ряд причин які потребують вирішення.

Серед ризиків використання технології **90% проблем практики пов'язують з людським фактором** (а. некомпетентністю оператора в конкретній ситуації, б) нехтуванням оператором технічними режимами роботи техніки заради максимізації обсягів обробітку та заробітку) і лише 10% приходить на гарантійні випадки.

Технологія ультра мало об'ємного обприскування (умо) з нормою 5–10 л/га робочого розчину (яка є ключовою економічною перевагою) підходить далеко не для всіх препаратів, зокрема для внесення ґрунтових гербіцидів та фунгіцидів вона не придатна також це стосується карбаміду, КАС чи сульфат магнію де продукт потрібно розчиняти у великій кількості рідини. Як

результат, 90% ринку польових робіт агродронів — це десикація соняшнику та робота по високорослих культурах і нестандартних полях.

На одній дисекації, яка має обмеження в часі 2 місяцями економічна окупність проекту є сумнівною. Власнику потрібно думати чим завантажити людей і обладнання протягом цілого року.

БПЛА в агро це не лише про його придбання, це - економіка цілого підрозділу:

- окрім дрона, треба ще мати штат (одна бригада – 2 дрони, 2 людини і 1 мікроавтобус);
- додаткове обладнання для виїзної бригади (генератори, зарядні станції, освітлення, прожектори, драбина, діжка, стільці розкладні та інше);
- постійні фінансові витрати: постійне оновлення знань навчання пілотів
- вчасно робити ТО (технічне обслуговування);
- системна заміна швидкозношуваних елементів дрону (після 300 га потрібно замінювати атомайзери);
- при аварії дрона орієнтовна ціна ремонту від 10 тисяч грн;
- ненормований графік роботи виїзних бригад;
- з GPS навігацією виникають сюрпризи (похибки у координатах, як наслідок зайві витрати на колісну техніку). Недостатня інтеграція БПЛА з існуючими агросистемами (FMIS, ERP) ускладнює передачу та аналіз даних. [3].

Технічні та організаційні проблеми. Довготривале створення карт-завдань для БПЛА зменшує час їх корисного використання, а відповідно добову норму виробітку і окупність. Для обробки великих масивів даних (аерофотознімків) потрібні потужні комп'ютери або хмарні сервіси для обробки. Як результат переліченого в п. 4 і 5 окупність проекту варто закладати понад 2 сезони.

На БПЛА процес обприскування гірше піддається впорядкуванню порівняно з наземними оприскувачами. якщо в останніх вдається дотримуватися розміру краплі +/- 50 мкм, в агродронах цей діапазон становить 50–300 мкм і може стати причиною втрат робочого розчину.

Технологія БПЛА є метеозалежною, при чому як у локальному, так і глобальному сенсі. При появі вітру понад 5 м/с, виникають ризики суттєвого знесення крапель робочого розчину на десятки й сотні метрів. тому, розрахунковий термін окупності агродронів слід збільшувати 20% через погодні простой.

Кадрові та освітні проблеми. Для ефективного використання БПЛА потрібні фахівці, які розуміють агрономію, ІТ та геоінформаційні технології. Не кожне підприємство може сьогодні собі дозволити утримувати спеціаліста з такими компетенціями, як уміння працювати з геоінформаційними системами

(GIS), картами NDVI, системами точного землеробства; аналізу даних із дронів (фотограмметрія, обробка зображень, побудова 3D-моделей полів); розуміння економічних показників ефективності цифрових технологій (ROI, CAPEX, OPEX); навички інтеграції даних БПЛА у системи управління господарством (FMIS, ERP-рішення). Хоча після завершення війни може вивільнитися значна кількість підготовлених пілотів, уже сьогодні відчувається брак системної підготовки фахівців в аграрних закладах освіти, зокрема курсів і сертифікаційних програм із використання дронів.

Нормативно-правові та інфраструктурні проблеми. Недосконале законодавство щодо використання БПЛА. Існують обмеження на польоти над населеними пунктами, дорогами чи стратегічними об'єктами. Відсутність єдиних стандартів для збору та зберігання агроданих. Це створює ризики для безпеки та конфіденційності інформації; Брак сервісної інфраструктури. Не всі регіони мають сертифіковані центри обслуговування й ремонту дронів.

Перспективи використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в умовах Agriculture 4.0.

У найближчі роки **основними користувачами БПЛА** будуть сервісні компанії, які надають послуги з внесення пестицидів. З часом доступність технологій дозволить звичайним аграріям та кооперативам самостійно використовувати дрони, можливо у спільній власності кількох господарств. Після закінчення війни очікується поява досвідчених операторів, які швидко адаптують нові технології і підвищать ефективність агропроцесів.

Очікується **серійне виробництво дронів з високою вантажністю та тривалістю польоту**. Наприклад, Agrobее 200 вже може літати до 1 години 20 хвилин, переносити до 200 кг пестицидів та обробляти до 380 га на день. Виробник планує моделі ємністю 100 і 900 л, що дозволяє застосування від малих господарств до великих агрокомплексів.

Для повного використання технології БПЛА необхідно розробляти та апробувати нові засоби захисту рослин, придатні для ультра малооб'ємного обприскування (УМО), що забезпечить ефективну та економічну обробку культур.

Перспективи ринку сільськогосподарських дронів: фіксоване крило, роторне лезо, гібрид. Зниження вартості дронів та розвиток батарей відкриває можливості для масового впровадження навіть на малих фермах.

Подальший розвиток БПЛА напряму пов'язаний із розвитком Штучного інтелекту (ШІ) – інструменту, який трансформує підходи до управління полем, технікою, врожаєм і прибутками. Використання аналітики даних у поєднанні з БПЛА допомагає прогнозувати врожайність, контролювати стан посівів і поступово створювати розумні фермерські господарства з мінімальною ручною працею. Першим кроком у цьому напрямку є:

А) Формування самонавчальних агромоделей, які навчаються на власних даних господарства. Наприклад, врахування локальних ґрунтових особливостей у прогнозі врожайності без потреби в щорічному ручному оновленні моделі.

Б) Використання ІІІ для автоматизації оцінки викидів СО₂ та обрахунку потенціалу вуглецевих кредитів. Це дозволить: прогнозувати зміни органічної речовини залежно від обробітку; розраховувати вуглецевий баланс поля за 3–5 років наперед; адаптувати під це технологію (глибина оранки, мульчування тощо).

В) Інтеграція з агробанкінгом і страхуванням. Завдяки точним прогнозам урожайності ІІІ може стати основою для нових фінансових інструментів – агрострахування, кредитів під заставу врожаю, контрактного продажу за forward-угодами.

IoT-мережі (Internet of Things networks) та наземні автономні платформи (UGV): поєднання аероБПЛА із наземними безпілотниками, які здійснюють міжрядну культивуацію, точкове підживлення, збір проб ґрунту, інспекцію культур на рівні ґрунтового покриття. Наземні системи, як-от Ecorobotix або FarmDroid FD20, дозволяють повністю автоматизувати рутинні операції, мають низьке енергоспоживання і точну прив'язку до ГІС. У поєднанні з повітряними апаратами ці системи забезпечують замкнений цикл збору даних і виконання технологічних операцій.

Розширення автономності: поява повністю автономних систем з автозаправками, автозавантаженням добрив, злітно-посадковими модулями. Такі станції, як DroneDock чи Hylío HUB, дають змогу розгортати цілодобові безпілотні операції в полі без участі людини, значно підвищуючи продуктивність та оперативність обробки великих площ.

Розвиток єдиних цифрових екосистем: інтеграція БПЛА, тракторів, сенсорів, метеостанцій і агроплатформ у єдині цифрові агроекосистеми з централізованим управлінням. Це дозволить побудувати повноцінні системи «розумного поля» (Smart Field), у яких БПЛА діятимуть у тісній синхронізації з іншими елементами агровиробництва, підвищуючи ефективність і стійкість господарства до зовнішніх ризиків. IoT-мережі: поєднання БПЛА із сенсорними системами на полі для створення повноцінних цифрових агросистем.

Підвищення цифрової компетентності фахівців потребує посилення освітньої складової, зокрема запровадження у закладах вищої освіти відповідних курсів і дисциплін, проведення регулярних практичних семінарів для агрономів, розроблення інструкцій із читання карт продуктивності та навчання роботі з чатботами, які збирають погодні дані від бригадирів.

3.3. Сучасний менеджмент роботи агронома з використанням дистанційного керування безпілотних літальних апаратів

Сучасне сільське господарство стрімко змінюється: зростають вимоги щодо суттєвого підвищення продуктивності рослинництва в умовах обмеженості ресурсів, а також посилюються вимоги до збереження та відновлення ґрунтів і біорізноманіття. На фоні глобальних кліматичних змін, деградації агроландшафтів та зростання конкуренції за природні ресурси аграрна галузь змушена адаптуватися до нових викликів. Це означає перехід від екстенсивних практик до вискоєфективних, сталих і науково обґрунтованих технологій вирощування культур. Від сучасного аграрія вимагається не лише забезпечення стабільного врожаю, а й мінімізація негативного впливу на довкілля, впровадження принципів циркулярної економіки, збереження родючості ґрунтів і підтримка екологічної рівноваги. У такому контексті особливого значення набувають інновації, цифрові технології, системи моніторингу та управління ресурсами, що забезпечують прийняття рішень на основі доказів і відкривають нові горизонти в управлінні агроєкосистемами.

Упродовж останніх десяти років робота польового агронома здебільшого полягала в особистому обстеженні полів і проведенні візуального моніторингу шляхом обходу або об'їзду угідь. Агроном оглядав посіви, фіксував наявність бур'янів, симптоми хвороб, пошкодження від шкідників та інші візуальні ознаки порушення стану рослин. Такий підхід вимагав значних витрат часу та базувався переважно на професійному досвіді фахівця. За оцінками, до 60 % робочого часу агроном витрачав саме на виконання таких трудомістких польових оглядів. Від ефективності цих обстежень значною мірою залежала якість прийняття оперативних рішень щодо корекції технологічного процесу, планування захисних заходів і організації виробничої діяльності господарства. Наявність розвинених навичок польового моніторингу визначала здатність агронома своєчасно виявляти критичні точки ризику, зберігати потенціал урожайності та адекватно реагувати на агрономічні проблеми, що виникали впродовж вегетації.

Формування навичок роботи з конкретною культурою в агронома тривало до трьох років, охоплюючи особливості вирощування, добір агрохімікатів та підготовку рекомендацій щодо технологічних заходів. Така тривалість адаптації суттєво ускладнювала виробничу діяльність аграрних компаній, оскільки навіть незначні помилки могли мати серйозні економічні наслідки. При цьому професійний досвід, накопичений окремими агрономами, не завжди трансформувався у корпоративну систему знань і часто втрачався у разі кадрових змін. Це негативно впливало на стабільність та адаптивність агропідприємства в умовах динамічного середовища.

Організація виробничих процесів, особливо в оперативному плані, залишалася слабкою ланкою в структурі управління. Її ефективність значною мірою залежала від індивідуальних рішень агронома, що приймалися на основі суб'єктивного візуального аналізу та особистого досвіду. У таких умовах глибока деталізація проблем на полі була обмеженою, а можливість об'єктивної оцінки ситуації – зниженою. Як наслідок, так званий «людський фактор» мав критичний вплив на всі етапи аграрного виробництва – від діагностики до планування і реалізації агротехнічних заходів.

Сьогодні впровадження цифрових технологій в агрономічну практику відкриває нові можливості для оптимізації виробничих процесів. Зокрема, цифрова агрономія дозволяє суттєво скоротити період адаптації агронома до нової культури та зменшити час, необхідний для її повноцінного впровадження у виробництво. Завдяки накопиченню, структуризації та аналізу агрономічних даних формується консолідований корпоративний досвід, який не лише зберігається, а й передається наступним поколінням фахівців. Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для агроскаутингу забезпечує отримання високоточних цифрових даних щодо стану рослин, просторової неоднорідності посівів, наявності стресових чинників або порушень агрофону. Така інформація є основою для обґрунтованого прийняття рішень на всіх рівнях агровиробництва – від оперативного реагування до стратегічного планування. У такий спосіб цифрові технології не лише підвищують ефективність управління, а й сприяють зниженню ризиків, забезпеченню стабільності врожайності та раціональному використанню ресурсів.

За правильної організації агроскаутингу із використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) сучасні технології дають змогу за лічені хвилини зібрати високоточні дані про стан поля. Упродовж одного польоту БПЛА здатен зробити тисячі фотознімків, які в подальшому обробляються за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Результатом є точна цифрова карта поля з просторовою роздільною здатністю до кількох сантиметрів, що дозволяє виявити найменші відхилення в розвитку культур. Таким чином, агроном отримує новий інструмент – замість суб'єктивної оцінки візуального огляду він працює з достовірними, кількісно вимірюваними показниками. Поле більше не сприймається лише візуально – воно стає джерелом даних, що трансформуються у рішення.

Запровадження БПЛА та цифрових платформ змінює не лише технічні аспекти роботи, а й саму парадигму професії агронома. Відбувається структурна трансформація ролей: польовий агроном та агроном-технолог поступово перетворюються на користувачів аналітичних систем, операторів даних і модераторів управлінських рішень. Це вимагає нових компетенцій – не тільки розуміння біологічних процесів, але й здатності інтерпретувати цифрову

інформацію, працювати з картографічними сервісами, індексами стану рослин і прогнозними моделями.

У монографії «Сучасні цифрові технології в рослинництві» (Зозуля та ін., 2025), майбутнє агрономії – в інтеграції біології рослин із математикою даних. Агроном нового покоління – це фахівець, який не лише констатує наявність проблеми, а й здатен спрогнозувати її розвиток, оцінити економічну доцільність реагування та сформувати оптимальну модель втручання на основі об'єктивних цифрових доказів.

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) відкривають перед агрономом нові горизонти, які ще донедавна здавалися недосяжними. Вони дають змогу виявляти приховані проблеми на ранніх етапах, коли візуальні ознаки ще не проявлені або практично непомітні для людського ока. Зокрема, йдеться про локальні дефіцити елементів живлення, осередки фітопатологій, ділянки з ознаками водного стресу, зональність ущільнення ґрунту чи нерівномірність розвитку посівів.

Використання мультиспектральних камер, які фіксують світлове випромінювання не лише у видимому, а й у ближньому інфрачервоному діапазоні, дозволяє отримати детальну інформацію про фізіологічний стан рослин. На основі цих зображень обчислюються вегетаційні індекси – NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), NDRE (Normalized Difference Red Edge), SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index), CWSI (Crop Water Stress Index), які відображають параметри фотосинтетичної активності, вміст хлорофілу, біомасу та ступінь зневоднення рослин. Ці індекси можна умовно назвати «біохімією поля в цифрах», оскільки вони надають кількісну, об'єктивну характеристику фітосанітарного стану агроценозу.

Якщо раніше агроном покладався переважно на особисті спостереження, інтуїцію та професійний досвід, то сьогодні його роль значно трансформувалася. Він працює в якості аналітика цифрових екосистем, виконуючи такі ключові функції:

- проводить аналіз спектральних індексів з метою оцінки просторової неоднорідності посівів;
- координує збір і синхронізацію даних із різних джерел – БПЛА, супутникових знімків, стаціонарних сенсорів і наземних спостережень;
- створює карти ризиків, прогнозує розвиток стресових факторів і формує карти-завдання для цільового або диференційованого втручання.

У такий спосіб агроном інтегрується в багаторівневу систему цифрової діагностики, яка поєднує даних дистанційного зондування, результати польових обстежень і точні вимірювання за допомогою сенсорних технологій. Це дозволяє не лише бачити, а й розуміти закономірності розвитку культур, формувати своєчасні управлінські рішення та мінімізувати втрати врожаю завдяки ранньому попередженню проблем.

Однак роль агронома не зводиться до натискання кнопки «запуск». Безпілотний літальний апарат – це лише інструмент збору великого обсягу даних, які самі по собі не мають цінності без правильної інтерпретації. Перетворення цих цифрових масивів на агрономічно значущу інформацію – завдання людини, що потребує як аналітичного мислення, так і глибоких знань у біології, фізіології рослин і агроекології.

Саме тут починається справжнє мистецтво цифрової агрономії – здатність «читати» спектральні карти як біологічні тексти. Наприклад, зниження значень NDVI на окремій ділянці може мати різну природу: це може бути ознакою азотного голодування, проявом посушливого стресу, наслідком пізнішого строку сівби або результатом механічного пошкодження ґрунту технікою. Кожен із цих сценаріїв потребує принципово різного реагування. Неправильна інтерпретація може призвести до хибного діагнозу й, відповідно, неефективного або навіть шкідливого втручання.

Лише агроном, який володіє контекстом поля – його історією обробітку, агрохімічними характеристиками, структурою ґрунтів, гібридним складом культур і особливостями погодних умов – здатен правильно декодувати сигнали, що надходять із БПЛА. Іншими словами, цифрові дані мають бути інтегровані з польовими знаннями та системним розумінням агроєкосистеми. Така синергія цифрових технологій та фахової компетентності є запорукою ухвалення точних, своєчасних і ефективних агрономічних рішень.

У сучасному агровиробництві саме людина залишається центральною фігурою, що поєднує цифрові інструменти, біологічні закономірності та практичний досвід. Агроном не просто користується даними – він надає їм значення і формує з них стратегічне бачення розвитку поля.

Сьогодні стрімко розвивається сегмент професійних послуг з агроскаутингу на основі використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Відповідні компанії надають комплексні рішення з дистанційного моніторингу сільськогосподарських угідь, зокрема – багаторічних насаджень, орієнтуючись на точність, оперативність та аналітичну глибину. Одним із яскравих прикладів такого підходу є діяльність компанії Aerobotics, яка спеціалізується на управлінні садами, виноградниками та іншими багаторічними культурами із застосуванням сучасних цифрових технологій.

Управління багаторічними насадженнями вимагає високого рівня деталізації даних про стан окремих дерев, що можливе лише за умови інтеграції аерофотозйомки, штучного інтелекту та індексного аналізу. В цьому контексті компанія Aerobotics пропонує інноваційний програмний продукт Tree Insights, який базується на багатоспектральних знімках, отриманих оператором БПЛА. Система здійснює автоматизовану ідентифікацію кожного дерева, обробляє знімки, обчислює вегетаційні індекси (зокрема NDVI, VARI тощо) та генерує інтерактивні карти стану насаджень. Інтерфейс системи

забезпечує інтерактивний аналіз на рівні окремих ділянок і дерев, з можливістю порівняння динаміки між об'єктами. Це дозволяє виявляти причинно-наслідкові зв'язки між параметрами – наприклад, між зменшенням транспірації і рельєфом або поливною ефективністю.

Головною метою такого підходу є забезпечення агронома точним, оперативним і структурованим зворотним зв'язком про стан плодкових дерев – як на рівні всього саду, так і індивідуально по кожному екземпляру. Це дозволяє порівнювати динаміку розвитку між різними етапами вегетації, оперативно виявляти зони стресу або відставання в рості, а також формувати зональні або точкові завдання для технологічного втручання – наприклад, щодо поливу, удобрення чи обрізування.

Таким чином, **сервіси на кшталт Aerobotics створюють передумови для переходу від управління насадженнями на рівні ділянок до рівня окремого дерева**, що відповідає концепції високоточної (precision) агрономії. Подібні рішення поступово стають частиною цифрової трансформації плодоовочевого сектора, відкриваючи нові можливості для адаптивного управління, прогнозування врожайності та підвищення рентабельності виробництва. Система дозволяє формувати завдання для польових груп, прокладати маршрути до проблемних зон, проводити локальні обстеження і приймати технологічні рішення на основі кількісних даних. Це значно підвищує ефективність агроменеджменту, забезпечуючи точність, швидкість та обґрунтованість реагування.

В Україні застосування моніторингу сільськогосподарських культур за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) ще не набуло масового поширення ані серед агровиробників, ані серед сервісних компаній. Однак уже сьогодні можна спостерігати успішні приклади впровадження цієї технології в практику, зокрема – у діяльності компанії *Corteva Agriscience*.

Моніторинг із використанням БПЛА дасть змогу ефективно вирішувати завдання, пов'язані з оцінкою густоти посівів, виявленням фітопатологій та оптимізацією технологічних операцій.

Кейс 1. Визначення фактичної густоти стояння соняшнику. У господарстві було проведено обліт дронами з метою визначення щільності посіву. Після створення ортофотоплану й використання інструменту автоматичного підрахунку рослин зафіксовано 50 000 рослин/га замість запланованих 70 000. Візуальна перевірка підтвердила похибки сівалки та нерівномірні сходи. **Висновок:** використання БПЛА дозволяє оперативно виявляти порушення агротехнологій сівби та формувати карти щільності для подальшого аналізу й корекції технологічних рішень.

Кейс 2. Виявлення склеротинії за мультиспектральними знімками На полі в Білоцерківському районі дрон з мультиспектральною камерою зафіксував зони зниженого NDVI (<0.4). Після польової діагностики виявлено ураження склеротинією на 12 % площі. **Висновок:** NDVI-аналіз дозволяє

виявити фітопатології на ранніх стадіях, локалізувати їх поширення та приймати своєчасні рішення щодо фунгіцидного захисту або зміни агротехнології.

Кейс 3. Диференційоване внесення десиканту за картами NDVI
Під час дозрівання соняшнику було створено карту вегетаційних зон, що поділяла поле на три зони за рівнем NDVI. На основі цієї карти агродрон вніс десикант із диференційованими нормами.

Результат: досягнуто економії препарату до 25 %, знижено пестицидне навантаження та забезпечено рівномірне дозрівання, що оптимізувало строки збирання. *Висновок:* інтеграція БПЛА, вегетаційного аналізу та агродронів дозволяє реалізувати точкове внесення ЗЗР, скорочуючи витрати і підвищуючи ефективність.

У сучасному аграрному секторі зростає потреба у фахівцях нового типу – операторів цифрового агромоніторингу, які володіють технологіями використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у щоденній практиці. Такі спеціалісти не лише виконують польоти згідно з технічним завданням, а й відповідають за повний цикл обробки аерофотоданих: планують місії, здійснюють обліт, проводять калібрування світлових панелей, обробляють знімки в спеціалізованих програмних середовищах – Pix4Dfields, Agisoft Metashape, DroneDeploy, QGIS тощо.

Ключовим завданням таких фахівців є створення аналітичних карт – не декоративних зображень, а точних цифрових моделей поля, які слугують основою для технологічного прийняття рішень. На основі отриманих карт розробляються VRA-завдання (Variable Rate Application) – для диференційованого внесення добрив, засобів захисту рослин або поливної води. Це дозволяє агротехніці діяти з максимальною точністю, вносячи ресурси лише там, де вони дійсно необхідні. Такий підхід забезпечує значну економію матеріальних ресурсів, знижує екологічне навантаження на агроєкосистему та підвищує ефективність управління посівами.

Практика демонструє переконливі переваги впровадження БПЛА в агровиробництво: час, необхідний для моніторингу полів, скорочується у 6–8 разів, а витрати на засоби захисту знижуються на 15–25 %. Проте найвагоміша перевага полягає у підвищенні точності та передбачуваності рішень. Як зазначено у розділах 11.10–11.15 монографії Зозулі (2025), цифровий моніторинг дозволяє виявляти перші ознаки захворювань або стресів за 3–5 днів до того, як вони стануть помітними візуально. Це створює передумови для превентивного втручання, яке мінімізує ризики та дозволяє зберегти врожай на ранніх стадіях формування.

Цифрова агрономія – це не лише технологія, а насамперед нова культура мислення. Вона змінює підхід до управління агровиробництвом: агроном більше не реагує постфактум, а діє проактивно – виявляє тенденції,

аналізує динаміку, порівнює сезони, формує прогностичні моделі. Інтеграція дронів, супутникових даних, ґрунтових сенсорів та метеостанцій створює єдине цифрове середовище, яке може бути впроваджене у фермерські інформаційні системи (FMIS). Це середовище дозволяє сформувати «цифровий паспорт поля», що акумулює історію врожайності, агротехнічних операцій, проблемних зон і прийнятих рішень. Згодом такі бази даних перетворюються на фундамент для моделювання продуктивності, оцінки економічної доцільності та стратегічного планування сівозмін.

Разом із можливостями цифрова трансформація приносить нові виклики. Робота з великими обсягами даних вимагає спеціалізованих навичок – від збору й візуалізації до захисту інформації від втрат чи несанкціонованого доступу. Як зазначено в розділі 8.4.9 монографії Зозулі (2025), питання кібербезпеки більше не є теоретичними: адже БПЛА фіксує не лише агрофізіологічні параметри, а й просторові координати, включно з конфіденційною інформацією про виробничі технології. Це висуває нові вимоги до компетентності агронома, який повинен одночасно бути біологом, інженером і аналітиком. Він має не тільки розуміти рослину, а й працювати з апаратурою, інтерпретувати цифрові дані та ухвалювати рішення в умовах інформаційної складності.

Таким чином, агроном майбутнього – це координатор системи «поле – техніка – дані». У перспективі частина рутинних робіт буде делегована автономним дронам, які здійснюватимуть регулярні обльоти та передаватимуть інформацію в хмарні сховища. Завдання агронома – перевіряти аналітичні звіти, верифікувати їх на основі польового контексту й приймати обґрунтовані технологічні рішення. Однак навіть найточніші алгоритми не здатні повністю замінити людську інтуїцію, багат шаровий досвід і агрономічне чуття. Як слушно зазначає Зозуля (2025), цифрові інструменти мають бути «продовженням очей і розуму агронома, а не їх заміною». Саме поєднання технологічної точності з людським мисленням робить нову агрономію не лише ефективною, а й глибоко творчою. Коли фахівець стоїть на узвишші й бачить своє поле з висоти, перед ним розгортається не просто карта, а живий організм: зі своїми слабкими і сильними зонами, сигналами тривоги й потенціалом розвитку. І тепер він має інструмент, щоб забезпечити цьому полю здорове, збалансоване функціонування – без перевитрат, втрат і хвороб.

Для студентів аграрних університетів цифрова агрономія – це водночас виклик і шанс. Вона формує нову освітню траєкторію, що виходить за межі традиційної агрономії й охоплює аналітику, робототехніку, геоінформатику, цифрову картографію та обробку великих масивів даних. Майбутній фахівець повинен вміти поєднувати знання з біології рослин і сучасних технологій, розуміти принципи роботи з БПЛА, сенсорами та цифровими платформами, здатними змінювати аграрну практику.

Для фермерів – це реальний інструмент підвищення ефективності виробництва без нарощування площ чи збільшення витрат. Технології дистанційного моніторингу дають змогу точніше оцінювати стан посівів, раціональніше використовувати ресурси та ухвалювати обґрунтовані управлінські рішення.

Саме тому сучасний менеджмент роботи польового агронома з використанням БПЛА – це не данина моді, а об'єктивна необхідність. Це якісний перехід від агрономії відчуттів до агрономії доказів, від постфактум-реакції – до прогнозного мислення. Найголовніше – це рух до більш розумного, екологічно відповідального й сталого землеробства, в якому кожен гектар набуває цифрової ідентичності, а агроном отримує новий інструмент – небо з безпілотником, що літає над його майбутнім, допомагаючи бачити те, що ще вчора залишалося невидимим.

Сценарій роботи агронома з БПЛА: етапи цифрового моніторингу

Етап 1. Планування місії

Першим кроком є постановка чіткої мети обльоту: діагностика азотного живлення, виявлення зон водного стресу, оцінка пошкоджень посівів чи виявлення осередків хвороб. Для попередньої оцінки обираються інструменти дистанційного зондування Землі – супутникові знімки або архівні дані попередніх обльотів. На основі отриманої інформації окреслюються потенційно проблемні ділянки поля.

Далі виконується детальне планування польотної місії: задається висота польоту (зазвичай 80–120 м), рівень перекриття знімків (не менше 80% у поздовжньому і поперечному напрямках), а також тип сенсора – мультиспектральний або RGB. Політ програмується через відповідний мобільний застосунок, що автоматизує маршрут і дозволяє адаптувати параметри до особливостей поля.

Етап 2. Виконання польотної місії

Перед стартом проводиться обов'язкове калібрування сенсора з використанням рефлекторної панелі – для стандартизації умов зйомки і забезпечення достовірності спектрального аналізу. Далі дрон автоматично виконує обліт за заданим маршрутом.

Залежно від специфіки місії, застосовується режим BVLOS (поза межами прямої видимості) або VLOS (у межах прямої видимості). Дані збираються у форматах високої роздільності (RAW, TIFF або JPEG) для подальшої фотограмметричної обробки. По завершенні місії БПЛА повертається до точки запуску, а всі знімки зберігаються на карті пам'яті або передаються на наземну станцію.

Етап 3. Обробка отриманих даних

На етапі обробки за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення (Pix4Dmapper, DroneDeploy, Agisoft Metashape, QGIS) знімки

агрегуються в єдиний ортофотоплан поля. Створюється цифрова модель місцевості, а також векторні шари, що відображають просторову структуру посівів.

Далі обчислюються спектральні індекси:

NDVI – індикатор фотосинтетичної активності;

NDRE – чутливість до вмісту хлорофілу;

SAVI – адаптація до впливу ґрунтового покриття;

NDWI – оцінка водного стресу.

Ці індекси відображаються у вигляді карт вегетаційної активності, які дозволяють виявити зони зниженого розвитку, нерівномірності сходів, потенційні осередки ураження або порушення у структурі ґрунту. Карти експортуються у форматах GeoTIFF, SHP, KML для подальшої інтеграції в агрономічні системи управління.

Етап 4. Інтерпретація результатів і прийняття рішень

Агроном виконує порівняльний аналіз отриманих карт з агрономічними нормами й польовими спостереженнями. На цьому етапі формується комплексна оцінка стану культури, прогнозується динаміка розвитку та ухвалюються рішення щодо корекції технологічної карти.

Результатом інтерпретації є створення карт-завдань для диференційованого внесення добрив (VRA), точкового обприскування або інших агрономічних втручань. Це дозволяє мінімізувати витрати ресурсів, уникнути надмірного навантаження на екосистему та підвищити рентабельність виробництва.

Етап 5. Контроль ефективності заходів

Через 7–10 днів після внесення змін виконується повторний обліт. Аналіз змін значень NDVI, CWSI або інших показників дозволяє кількісно оцінити реакцію культури на застосовані заходи. Таким чином, забезпечується замкнений цикл моніторингу – від виявлення проблеми до оцінки результатів рішень.

Цей підхід формує нову модель прийняття рішень в агрономії – не інтуїтивну, а доказову, де кожна дія підкріплена цифровими даними і має кількісну оцінку ефективності.

Висновок

Організаційні та економічні рішення, засновані на даних дистанційного агроскаутингу, формують нову модель управління аграрним підприємством, орієнтовану на оперативність, точність і гнучкість. Інтеграція агроскаутингу з системою індикативного бюджетування дозволяє перейти від статичних фінансових планів до динамічних управлінських моделей, які реагують на реальні зміни у виробничому середовищі.

Використання безпілотних літальних апаратів і цифрових аналітичних інструментів забезпечує зменшення непродуктивних витрат, підвищення ефективності використання ресурсів і зниження фінансових ризиків.

Економічна доцільність таких технологій проявляється у скороченні витрат на добрива, засоби захисту рослин, паливо та оплату праці, а також у підвищенні врожайності й прозорості управління.

Контрольні завдання для самоперевірки знань

1. Розкрийте сутність індикативного бюджетування та його відмінності від традиційного бюджетного планування.
2. Яку роль відіграє агроскаутинг у системі управління ресурсами аграрного підприємства?
3. Поясніть взаємозв'язок між агроскаутингом, бюджетуванням і управлінськими рішеннями.
4. Які економічні показники використовуються для оцінки ефективності впровадження БПЛА в агровиробництві?
5. Охарактеризуйте основні джерела економічного ефекту від застосування агроскаутингу.
6. Які організаційні та кадрові умови необхідні для ефективного використання БПЛА на підприємстві?
7. Назвіть основні ризики економіки використання безпілотних літальних апаратів у сільському господарстві.
8. Як дані NDVI та інших вегетаційних індексів впливають на коригування виробничо-фінансових планів?
9. У чому полягає значення цифрових інструментів і аналітики даних для стратегічного розвитку аграрного бізнесу?

РОЗДІЛ 4. Практичні аспекти застосування дистанційного керованих безпілотних літальних апаратів та супутників

У результаті опрацювання цієї теми здобувач освіти:

Набуде цілісного уявлення про практичні напрями використання дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів у аграрному та інженерному скаутингу, про можливості застосування ДК БПЛА в дорадчій діяльності, фермерських господарствах і сервісних компаніях, а також про роль дронів у сучасних системах точного землеробства й управління агровиробництвом.

Навчиться аналізувати реальні практичні кейси застосування БПЛА для моніторингу посівів, інженерної оцінки територій, контролю будівництва та виробничих процесів, оцінювати ефективність дронів технологій у порівнянні з традиційними методами, а також обґрунтовувати вибір типу дрона й технологічної схеми залежно від конкретних умов господарства.

Оволодіє знаннями щодо організації робіт із використанням БПЛА, зокрема щодо планування польотів, логістики обслуговування дронів, основ фотограмметрії та створення ортофотопланів, принципів агротехнічного й інженерного моніторингу, а також економічних, безпекових і нормативних аспектів практичного застосування агродронів.

4.1. Практичний досвід впровадження БПЛА в аграрному секторі України: експертні інтерв'ю

Представлено серію відеоінтерв'ю з провідними фахівцями аграрної галузі, представниками бізнесу, дорадчих служб та освітніх установ, які діляться досвідом використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в сільському господарстві. Матеріали ілюструють широке коло застосувань агродронів – від моніторингу стану посівів і точного внесення засобів захисту до освітніх ініціатив і цифровізації виробництва. Інтерв'ю дають змогу простежити сучасні тенденції, технологічні підходи та актуальні виклики у впровадженні БПЛА на практиці.

1. Компанії AGRONIX

Микола Черняк, засновник компанії AGRONIX



Рис. 4.1. Микола Черняк



<https://youtu.be/tZbByiW0jcA>

Микола Черняк, кандидат с.г. наук (PhD in Agriculture), засновником компанії «AGRONIX», рис. 4.1., один із провідних фахівців у сфері ультрамалооб'ємного внесення пестицидів за допомогою агродронів в Україні. У розмові Черняк розповідає про становлення власного бізнесу, розвиток технології агродронів із 2021 року та напрями діяльності компанії: внесення пестицидів і продаж агродронів. Він пояснює, що робота з БПЛА потребує глибокої експертизи – від агрономії та фізики до менеджменту й економіки, адже ефективне застосування пов'язане з фізикою руху краплі, погодними умовами та організацією команди. Компанія також розробляє допоміжне обладнання – змішувальні станції, генератори, причепи, а в дослідницькому напрямі співпрацює з великими компаніями (BASF, FMC, Bayer). Черняк підкреслює, що агродрони – це не заміна обприскувачів, а окремий ефективний інструмент для малих і середніх фермерів, який дозволяє оптимізувати витрати, підвищити точність і зменшити ризики. Він також наголошує на важливості освіти та підготовки нових фахівців, які мають не лише володіти фактами, а й уміти шукати та впроваджувати нові знання в умовах стрімкого технологічного розвитку.

2. ФГ «Золота Рибка»

Микола Гадіцький, керівник фермерського господарства «Золота Рибка»



<https://youtu.be/8gCDypfb3HA>

Рис. 4.2. Микола Гадіцький

Інтерв'ю з фермером Миколою Гадіцьким, рис. 4.2., власником господарства «Золота Рибка» (Миколаївська область), провів консультант програми «Агро» Микола Биков. У розмові фермер ділиться практичним досвідом використання агродронів для обробки 1200 га сільськогосподарських угідь. Зокрема, він розповідає про заміну традиційного обприскувача на дрон AGRAS T50, що дозволило ефективно вносити пестициди, гербіциди та фунгіциди без утворення колій, знизити витрати й підвищити продуктивність. Микола пояснив організаційні аспекти роботи, створення карт полів і мобільну систему заправки, підкреслюючи, що БПЛА стали реальним інструментом підвищення ефективності, безпеки та економічності агровиробництва.

3. Громадська спілка «Зелені Агро Рішення»

**Віталій Воронцов, голова сільськогосподарської дорадчої служби
ГС «Зелені Агро Рішення»**



<https://youtu.be/pfTYNlkwZLk>

Рис. 4.3. Віталій Воронцов

Інтерв'ю з представником громадської спілки «Зелені Агро Рішення» Віталієм Воронцовим, рис. 4.3., яка є сільськогосподарською дорадчою службою. У розмові фахівець ділиться досвідом використання БПЛА в роботі дорадників, агрономів та фермерів. Основну увагу приділено застосуванню навіть найпростіших моделей дронів – таких як DJI Mavic – для інженерного та аграрного скаутингу.

Спікер демонструє приклади зйомки тепличного комплексу й саду фундуку, показуючи, як дрон дозволяє здійснювати огляд території, контролювати виконання робіт, вести фотофіксацію об'єктів і виявляти технічні проблеми чи зміни в інфраструктурі. Такий підхід допомагає планувати розміщення теплиць, водойм, комунікацій, відстежувати хід будівництва або догляду за насадженнями. Наголошується, що БПЛА – це доступний інструмент для кожного аграрія, який дає змогу швидко отримати точну візуальну інформацію без спеціальної підготовки. Також підкреслюється важливість включення базових навичок керування БПЛА до освітніх програм аграрних університетів – вміння працювати з дроном стає таким самим необхідним, як користування смартфоном.

4. Компанія DroneUA

Анатолій Безолюк, керівник агронапрямку міжнародної групи компаній DroneUA



Рис. 4.4. Анатолій
Безолюк



<https://youtu.be/cSXUAg8dgEo>

Інтерв'ю з Анатолієм Безолюком, рис. 4.4., керівником агронапрямку міжнародної групи компаній DroneUA. У бесіді розглянуто розвиток і впровадження безпілотних технологій у сільському господарстві України, досвід компанії DroneUA та її внесок у цифровізацію агросектору. Анатолій розповідає про становлення компанії, співпрацю з виробником XAG, створення мережі лабораторій і навчальних центрів у вищих та професійно-технічних закладах, а також про підготовку операторів агродронів. Значну увагу приділено розвитку агроскаутингу, цифровому картуванню полів і використанню програмного забезпечення Pix4D для диференційованого внесення препаратів. Спікер наголошує, що агродрони – це не заміна обприскувачів, а окремий технологічний інструмент, який забезпечує гнучкість, точність і економічність у виконанні агрооперацій. Він прогнозує, що після завершення війни кожне друге господарство матиме дрон для скаутингу, а кожне третє – продуктивний агродрон. Також підкреслюється важливість підготовки фахівців нового покоління, здатних інтегрувати цифрові технології у виробництво та професійно керувати агродронами.

5. Компанія «Дрон Агрофлот»

Родіон Сорока, керівник компанії «Дрон Агрофлот»



<https://youtu.be/oKStZuk2kaQ>

Рис.4.5. Родіон Сорока

Інтерв'ю з Родіоном Сорокою, рис. 4.5., представником компанії «Дрон Агрофлот». У розмові обговорюється розвиток технологій агродронів в Україні, їх роль у точному землеробстві та підготовці нових фахівців аграрної сфери. Спікер розповідає про діяльність компанії – від імпорту та продажу агродронів до навчання пілотів, технічного обслуговування й надання послуг із внесення пестицидів, добрив і трихограми. Наразі компанія має понад 60 дронів, якими оброблено понад 500 тисяч гектарів сільськогосподарських площ. Радіон підкреслює, що агродрони – це майбутнє агровиробництва, особливо для малих і середніх господарств. Вони дозволяють ефективно виконувати десикацію, вносити фунгіциди, інсектициди, добрива та біологічні засоби захисту. Окремо він наголошує на розвитку агромоніторингу й NDVI-картування, які дають змогу аналізувати стан посівів і приймати точні рішення щодо внесення препаратів.

Також розглядається перспектива застосування БПЛА у садівництві, виноградарстві та овочівництві – там, де техніка не завжди має доступ до полів. Родіон звертає увагу на дефіцит підготовлених кадрів і закликає аграрні заклади активніше впроваджувати курси з використання БПЛА. За його словами, навчання керуванню агродронами можливе без значних труднощів, а молоді фахівці мають широкі можливості для кар'єрного зростання в цій інноваційній сфері.

6. Компанія Corteva Agriscience

Максим Байдюк – кандидат с.г наук, керівник підрозділу продуктової агрономії та технічної підтримки ключових клієнтів

Богдан Красюк – фахівець із цифрового напрямку



<https://youtu.be/tRulVXBTS8E>

Рис.4.6. Максим Байдюк

Інтерв'ю з Максимом Байдюком, рис. 4.6., керівником підрозділу продуктової агрономії та технічної підтримки ключових клієнтів компанії «Corteva Agriscience», і Богданом Красюком, фахівцем із цифрових технологій тієї ж компанії. Спікери діляться досвідом впровадження безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у системи точного землеробства. Максим Байдюк розповідає, як компанія з 2019 року розвиває використання дронів для польових спостережень, аналізу густоти стояння рослин, діагностики проблем і навіть внесення засобів захисту. Богдан Красюк наголошує на ключовій ролі аналітичної обробки даних, отриманих із дронів: 80% ефективності залежить не від польоту, а від уміння працювати з програмним забезпеченням для обробки знімків, картографування, створення NDVI-індексів і цифрових карт завдань.

Учасники інтерв'ю підкреслюють, що сучасний агроном має бути комплексним фахівцем – поєднувати знання класичної агрономії з володінням цифровими інструментами. Наводяться приклади використання БПЛА для підрахунку густоти посівів, аналізу вегетаційних індексів, створення карт продуктивності полів і диференційованого висіву. Дрони також допомагають виявляти осередки хвороб і шкідників, контролювати ефективність сівалок, оптимізувати витрати засобів захисту та добрив.

7. Компанія «Сингента»

Олександр Зозуля, кандидат біологічних наук, керівник групи технічних експертів компанії «Сингента»



<https://youtu.be/xH6O-6joL74>

Рис.4.7. Олександр Зозуля

Інтерв'ю з Олександром Зозулею, рис. 4.7., керівником групи технічних експертів компанії «Сингента». Розмова присвячена розвитку цифрових технологій у сільському господарстві, зокрема використанню безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для моніторингу посівів і внесення засобів захисту рослин.

Олександр Зозуля, який має понад 30 років досвіду в аграрній науці та виробництві, ділиться практичними напрацюваннями компанії у впровадженні точного землеробства. Він пояснює, що БПЛА стають ключовим інструментом агроскаутингу – дозволяють швидко діагностувати стан рослин, оцінювати забур'яненість, рівень стресу культур, ураження хворобами та інші показники. Спікер розповідає про дослідження компанії щодо використання дронів для обприскування й розробку методики повітряного внесення препаратів, створеної у співпраці з партнерами. Також компанія тестує наземні безпілотні апарати, спектральні й тепловізійні камери, а також використовує цифрові інструменти для аналізу ґрунту, визначення вмісту карбону, вегетаційних індексів і фізіологічного стану рослин.

На думку експерта, майбутнє агровиробництва – за поєднанням штучного інтелекту, аналітики та дистанційного моніторингу, що дозволить зменшити витрати на засоби захисту та підвищити ефективність управлінських рішень. Олександр також наголошує на необхідності оновлення навчальних програм аграрних університетів: майбутні фахівці мають не лише вміти керувати дронами, а й розуміти, як аналізувати отримані дані, створювати карти завдань і приймати рішення на основі цифрових інструментів.

4.2. Практичні кейси використання дистанційного керування безпілотних літальних апаратів в Україні

Використання безпілотних літальних апаратів у дорадчій практиці ГС «Зелені Агро Рішення», за матеріалами інтерв'ю з Віталієм Воронцовим

Ключовим елементом ефективного впровадження безпілотних технологій у дорадчій практиці є не лише консультаційна підтримка, а й системне надання практичних занять у польових умовах. Практична складова дозволяє: сформулювати у фермерів і фахівців не лише реальне розуміння можливостей та обмежень БПЛА, а й практичні навички їх застосування; зменшити психологічний бар'єр перед використанням нових технологій; навчити інтерпретувати отримані зображення та аналітичні дані; продемонструвати економічну доцільність застосування БПЛА на конкретному прикладі господарства.

Особливим періодом є перехід від демонстраційного польоту до повного циклу роботи: планування маршруту, виконання зйомки, побудова ортофотоплану, аналіз отриманих даних та формування практичних рекомендацій. Саме на цьому етапі формується компетентність користувача – здатність не лише керувати БПЛА, а й використовувати його як інструмент прийняття управлінських рішень. У перспективі це створює основу для переходу від епізодичного використання дронів до системної інтеграції БПЛА в технологічний ланцюг господарства.

Кейс 1. Інженерний скаутинг тепличного комплексу

Завдання: здійснити оцінку тепличного комплексу площею близько 15 га та отримати високоточне фотозображення території для фіксації інженерних комунікацій – розташування теплиць, технічних приміщень, штучного водойму, траншей, кабельних ліній і водопроводів (рис. 4.8.).

Методика: здійснити політ на висоті 250 м за попередньо заданим маршрутом, автоматичне фотографування з прив'язкою до координат (108 знімків), зшивання зображень у спеціальному програмному забезпеченні (ортофотоплан), проведення аналізу отриманого зображення.

Результат: отримано детальну карту об'єкта (до 8 см/піксель), що дала можливість: визначити відхилення геометрії водойми; побачити неточності при монтажі теплиць; зафіксувати розташування інженерних споруд.

Практичний висновок: БПЛА став інструментом візуального контролю інженерних процесів, а ортофотоплан – документом для подальших технічних корекцій.



Рис. 4.8. Територія тепличного комплексу Київська область

Кейс 2. Контроль розвитку саду фундук площею 25 га.

Мета: провести оцінку стану розвитку насаджень багаторічних культури фундука, оцінка ефективності функціонування дренажної системи від штучного водойому, а також перевірити якість виконання технологічних операцій по в саду (рис.4.9, рис.4.10).



Рис. 4.9. Сад фундуку органічне господарство Nuts'N'Garden



Рис. 4.10. Розбивка території Фермерське господарство Nuts'N'Garden

Методика: сформовано маршрут польоту БПЛА з автоматизованою зйомкою на висоті 200–250 м; отримано об'єднане ортофотозображення території у високій просторовій роздільній здатності (180 аерофотознімків); виконано візуалізацію оцінку території, лінію поливу й зони поверхневого стоку вод, оцінка стану розвитку фундука

Результат: встановлено наявність зливових потоків, не врахованих під час планування посадки, а також виявлено ділянку замулення біля дамби; зафіксовано неоднорідність розвитку насаджень фундука в межах території.

Кейс 3. Проектування територій для побудови тепличного комплексу

Мета: забезпечити просторово обґрунтоване планування нових тепличних і садових комплексів із мінімізацією інженерних ризиків та оптимізацією розміщення інфраструктури (рис. 4.11.).

Передумов: під час закладання нових агровиробничих об'єктів критичним є врахування мікрорельєфу, напрямків стоку води, наявності природних перешкод і транспортної доступності. Традиційні геодезичні роботи потребують значних часових і фінансових витрат, тоді як дистанційна аерозйомка дозволяє оперативно отримати просторові дані високої деталізації.

Методика: виконано обліт ділянки з автоматизованою зйомкою за заданими маршрутами з перекриттям кадрів для подальшої обробки. Побудова ортофотоплану на основі отриманих аерофотознімків сформовано ротофото-

план і тривимірну модель поверхні. Зонування території: дороги, лінії електропередач, природні пониження, напрямки поверхневого стоку та ухили. **Інженерний аналіз:** визначено оптимальні ділянки для розміщення тепличних модулів; оцінено ризики підтоплення; перевірено відповідність фактичного рельєфу проектним призначенням.

Контроль реалізації проекту: після початку будівельних робіт виконано повторну зйомку для порівняння фактичного розміщення споруди з проектною документацією.

Висновок: Застосування БПЛА на етапі проектування дозволить досягнути точності інженерних рішень, зменшує ризики помилок і сприяє економічній ефективності інвестиційних проектів у садівництві. Що приводить до: скорочений час передпроектного аналізу території, виявлено деякі зони накопичення води до початку будівництва, оптимізовано розміщення споруд з урахуванням природних ухилів, забезпечено просторовий контроль відповідності будівництва проекту.



Рис. 4.11. Планування тепличного комплексу Київська область

Кейс 4. Агротехнічний моніторинг насаджень фундуку та аспарагусу

Мета: забезпечити системний дистанційний контроль стану посівів і багаторічних насаджень із зазначенням раннього виявлення стресових факторів, оптимізацію агротехнічних заходів та підвищення точності управлінських рішень (рис. 4.12.).

Передумов: у традиційній агрономічній практиці технологічні рішення обґрунтовують на основі вибіркового польових обстежень, які не дають змоги сформулювати цілісне уявлення про просторову неоднорідність поля. Унаслідок цього осередки захворювань або проблеми із системою поливу часто виявляють

із запізненням. Використання БПЛА створює можливість регулярного огляду всієї площі господарства незалежно від її конфігурації та масштабу.

Методика: планування обльоту БПЛА передбачає формування автоматизованого маршруту польоту з повним покриттям досліджуваної території. Аерофотознімання стану насаджень здійснюють у режимі оглядової або детальної зйомки для отримання актуального зображення поля.

Аналітична інтерпретація зображень передбачає виявлення ділянок зі слабким ростом рослин, зокрема випадів, осередків захворювань і ознак стресу; фіксацію ранніх стадій розвитку бур'янів; аналіз неоднорідності забарвлення та щільності рослинного покриву; оцінювання ефективності функціонування поливних систем і рівномірності розподілу вологи.

Висновок

БПЛА в системі агротехнічного моніторингу виступає інструментом просторового аналізу, який забезпечує оперативність отримання інформації та завершення обґрунтованості агрономічних рішень. Також базові моделі БПЛА здатні забезпечити достатній рівень деталізації для виявлення ключових проблем на ранніх стадіях розвитку культури.



Рис. 4.12. Обліт території Фермерське господарство Nuts'N'Garden

Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у системі точного землеробства компанії «Corteva Agriscience», за матеріалами інтерв'ю з Максимом Байдюком і Богданом Красюком

Використання безпілотних літальних апаратів у системі агрономічної підтримки компанії «Corteva Agriscience» розпочалося в 2019 році як інструмент оперативного моніторингу стану посівів. На першому етапі БПЛА застосовувалися переважно для візуального огляду полів, фіксації проблемних

ділянок і документування виробничих процесів. З розвитком технологій та накопиченням практичного досвіду паркової техніки було оновлено до сучасних платформ – DJI Mavic 3 та DJI Matrice. Це дозволило значно підвищити точність аерозйомки, покращити якість геоприв'язки та перейти від простого огляду до цифрового аналізу даних.

Сьогодні БПЛА використовують як повноцінний інструмент агромоніторингу та скаутингу. За допомогою них визначають межі полів, створені ортофотоплани, формується актуальна картографічна база господарства. Аерозйомка дає можливість оперативно виявити осередки проблеми – полегли посіви, забур'яненість, захворювання шкідниками чи локальні прояви хвороби. Окремим напрямком є оцінка густоти стояння рослин, що дозволяє оцінити якість сівби та рівномірність розвитку культури.

Застосування мультиспектральних камер і побудова NDVI-карт забезпечують об'єктивну оцінку стану вегетації. Отримані дані використовують не лише для діагностики, а й для формування цифрових карт-завдань, які передають агродронам для диференційованого внесення засобів захисту рослин. Таким чином БПЛА інтегрована в замкнутий технологічний цикл: моніторинг – аналіз – прийняття рішення – точкове виконання операції.

Накопичений досвід роботи, що системне використання БПЛА дозволяє підвищити оперативність агрономічного контролю, зменшити витрати ресурсів і перейти від реактивної моделі управління до превентивної, що є основою цифрової трансформації агровиробництва.

Кейс 1. Оцінка густоти стояння соняшнику

Мета: використовувати БПЛА для якісного визначення густоти стояння рослин соняшнику, оцінки рівномірності сходів і локалізації проблемних ділянок поля з відхиленням від використаної норми висіву (рис. 4.13.).

Передумов: під час польового обстеження стан посіву оцінювали з урахуванням нормативної густоти 70 000 рослин/га та очікуваного рівномірного розміщення рослин у рядках. Водночас суб'єктивна оцінка не давала змоги точно визначити ступінь неоднорідності посіву в межах поля. Для об'єктивізації показників проведено аерознімання з подальшим цифровим аналізом отриманих даних.

Методика: обліт поля виконує БПЛА із перекриттям знімків 70% для забезпечення коректної фотограмметричної обробки. Отримані зображення, завантажені в програмне середовище Pix4Dmapper або DroneDeploy, де яке формує ортофотоплан високої просторової роздільної здатності. Для кількісної оцінки використовується інструмент автоматичного підрахунку об'єктів (Count Objects / Plant Stand Count), який дозволяє ідентифікувати та підрахувати окремі рослини в межах визначеної площі. Отримані значення густоти порівняно з

агрономічною нормою. Результати представлені у вигляді карти густоти посіву з виділенням зони низької, середньої та високої щільності.

Висновок

За результатами цифрового підрахунку встановлено фактичну густоту посіву — 50 000 рослин/га за нормативного показника 70 000 рослин/га. Просторовий аналіз виявив пропуски в рядках, ділянки з подвійними сходами та неоптимальною щільністю рослин. Додатковий огляд підтвердив наявність проблем у роботі сівалки, а також часткову втрату рослин на етапі появи сходів. Кейс демонструє ефективність застосування БПЛА для об'єктивної оцінки якості сівби. Використання цифрових методів підрахунку дозволяє перевірити технологічні недоліки, оцінити імовірні втрати врожайності та прийняти рішення щодо корекції технології на наступних етапах виробництва.



Рис. 4.13. Джерело: <https://www.cherk-consumer.gov.ua/novyny/3711-agrarijiv-cherkashchini-poperedzhuyut-pro-aktivizatsiyu-na-skhodakh-sonyashniku-dovgonosikiv-i-midlyakiv>

Кейс 2. Виявлення склеротинії на соняшнику

Мета: ідентифікувати зони уражень соняшника склеротинією на ранніх стадіях розвитку захворювання за допомогою мультиспектральної камери та індексного аналізу, з подальшим прийняттям обґрунтованого рішення щодо фунгіцидного захисту (рис. 4.14.).

Передумов: на полі в Білоцерківському районі було зафіксовано поодинокі осередки в'янення рослин соняшнику. Візуальна діагностика поля не

дозволяла оцінити реальне масштабне поширення хвороби на всьому полі, тому що симптоми проявлялися нерівномірно. Для уточнення площі ураження хворобою було прийнято рішення провести мультиспектральну зйомку з використанням БПЛА.

Методика: обліт поля виконано мультиспектральним БПЛА DJI Matrice, оснащеним камерою MicaSense RedEdge. Отримані знімки були оброблені з формуванням ортофотоплану та карти NDVI для просторової оцінки стану посіву.

Під час аналізу визначено ділянки зі зниженим індексом NDVI ($<0,4$), які розглядалися як уражені зони. Отримані дані були інтегровані з геопросторовим шаром в межах поля, що дозволило локалізувати проблемні осередки та розрахувати уражені площі.

Висновок

Аналіз показав зниження NDVI на 12% площі поля. Після проведення цільового польового обстеження підтверджено пошкодження рослин склеротинією саме в межах визначеної дронною зоною. Пошкодження хворобою оцінено на рівнях до 12% площі.

Практичний результат засвідчив ефективність ранньої дистанційної діагностики розвитку хвороб з використанням БПЛА, що дозволило оперативно локалізувати осередки захворювання та прийняти обґрунтоване рішення щодо застосування фунгіцидного захисту й коригування сівозміни на майбутнє. Інтеграція мультиспектрального моніторингу в систему агрономічного контролю перевіряє точність управлінських рішень і зменшує ризик поширення захворювання на значну площу.



Рис. 4.14. Ознаки хвороби соняшника. Джерело: <https://superagronom.com/articles/576-fakti-pro-10-naybilsh-poshirenih-hvorob-sonyashnika>

Кейс 3. Диференційоване внесення десиканту на соняшнику

Мета: оптимізувати процес десикації соняшнику шляхом диференційованого внесення препарату відповідно до фактичної неоднорідності стану посівів, зменшити витрати десиканту та забезпечити рівномірне висихання культури (рис. 4.15).



Рис. 4.15. Десикація соняшника з допомогою БПЛА. Джерело: <https://drone.ua/blogs/news/announcement-of-the-online-webinar-sunflower-desiccation-2-0-leadership-strategy-in-the-global-market-by-droneua>

Передумов: у період фізіологічного дозрівання соняшника зафіксовано просторову нерівномірність стиглості рослин. Частина площі характеризувалася підвищеною вологістю кошиків і зеленою листковою масою, тоді як окремі ділянки були готові до збирання. Суцільна десикація в таких умовах могла призвести до перевитрати десиканта. Для об'єктивної оцінки стану рослин було застосовано БПЛА з подальшим формуванням карти вегетаційних зон.

Методика виконання

Аерозйомка поля проводилася БПЛА на висоті 100 м у стабільних сонячних умовах, що дозволило мінімізувати похибки спектрального аналізу та забезпечити коректність розрахунку індексів рослинності. Отримані зображення були оброблені в програмному середовищі DroneDeploy, де сформована карта NDVI для просторової оцінки стану посіву.

На основі аналізу індексу NDVI поле було виділено на три технологічні зони. Перша зона (NDVI 0,7–0,8) характеризувалася високою вегетативною активністю та підвищеною вологістю рослин, що вимагало застосування повної норми десиканту. Друга зона (NDVI 0,5–0,7) відповідала середньому рівню, що дозволяло зменшити норму внесення препарату. Третя зона (NDVI <0,5) включала ділянки, які досягли фізіологічної стиглості для збирання, тому потреба в обробці була мінімальною або відсутньою.

Після цього виконано диференційовану обробку з урахуванням просторового розподілу норми внесення десиканту відповідно до визначених зон, що забезпечило точний характер застосування препарату та підвищення технологічної ефективності операції.

Висновок

У результаті впровадження диференційованого внесення десиканту досягається економічність препарату до 25% порівняно із суцільною обробкою, що дозволило зменшити пестицидне навантаження на посіви та підвищити екологічну обґрунтованість технології. Одночасно забезпечує вирівнювання стану рослин в їх готовності до збирання.

Практичний досвід підтверджує, що інтеграція БПЛА, NDVI-аналітики та агродронів для внесення препаратів забезпечує перехід від традиційної суцільної десикації до просторово диференційованої моделі управління. Такий підхід дозволяє прийняти рішення на основі фактичного стану посіву, раціонально використовувати ресурси та підвищити технологічну ефективність виробництва в системі точного землеробства.

Практика використання БПЛА у фермерському господарстві «Золота рибка», за матеріалами інтерв'ю з фермером Миколою Гадіцьким

Мета: забезпечити повну заміну традиційного самохідного обприскувача технологією дронowego внесення засобів захисту рослин (ЗЗР) з одночасним: підвищення технологічної мобільності господарства; зменшення залежності від колісної техніки; мінімізація людського фактора; оптимізація витрати на технічне забезпечення виробництва. Стратегічна мета – інтеграція БПЛА в систему точного землеробства з подальшим переходом до диференційованого внесення засобів захисту.

Передмова: Фермерське господарство обробляє близько 1200 га (± 200 га) з переважанням зрошуваних земель. Використовуються фронтальні поливні машини та підземне крапельне зрошення (на глибині 30 см). У вересні 2024 року придбано перший агродрон DJI Agras T50 для проведення десикації та роботи на високорослих культурах. Ключовим поштовхом до масштабного впровадження стала поломка самохідного обприскувача John Deere M4030 (рис. 4.16).

Методика: впровадження внесення засобів захисту рослин БПЛА у господарстві базувалася на поєднанні технічної оптимізації, раціональної логістики та чіткого алгоритму польових операцій.

Технічна база

В роботі використовувався агродрон DJI Agras T50, який забезпечив стабільне покриття за рахунок низької висоти та контрольованої дисперсії робочого розчину. Польоти відбувалися на висоті 3,5 м над культурою при ширині захвату 10,5 м. Об'єм бака становив 40 л, проте фактичне завантаження варіювалося в межах 22–37 л залежно від конфігурації маршруту та тривалості

гону. Тривалість одного польоту склала близько 9 хвилин. Час оперативної заміни акумуляторної батареї не перевищував 1,5–2 хвилини, що дозволяло мінімізувати втрати часу та підтримувати високу інтенсивність обробки.

Організація логістики

Для забезпечення безперервності технологічного процесу створено мобільний обслуговуючий комплекс на базі модернізованої вантажівки ГАЗ-66. Комплекс включає два єврокуби по 1000 л, трирівневу систему мішалок для запобігання осадженню препаратів та подачі робочої рідини через пістолет зі шлангом довжиною до 40 м. Пункти заправки БПЛА переміщуються з інтервалом 200–300 м по краю поля, для скорочення часу повернення дрона та оптимізації виробничого циклу. Обслуговування здійснювали два оператори з досвідом керування БПЛА та практичним військовим досвідом, що позитивно вплинуло на дисципліну польотів і дотримання технічних регламентів.

Технологічний алгоритм внесення

Технологічний процес передбачує: попередню побудову цифрової карти поля та маршрутів польоту; поділ площі на логістичні сегменти; планування польотів з огляду на сторони вітру, густоти посіву та мікрорельєфу; виконання серійних вильотів із мінімальним часом повернення на базу; контроль норми виливу та рівномірності покриття. Такий підхід дозволяє забезпечити стабільну якість внесення та зменшити вплив людського фактора.

БПЛА використовувався для: інсектицидних обробок зернових культур; гербіцидного контролю падалиці пшениці в посівах ріпаку; внесення фунгіцидів на всі культури; застосування ґрунтових гербіцидів.



Рис. 4.16. Застосування БПЛА на ріпаку. Джерело: <https://agronix.com.ua/blog/yak-ubezpechiti-sebe-vid-vtrat-urozhayu-ripaku/>

У 2024 році всі 1200 га господарств були оброблені БПЛА без залучення колісної техніки, що підтверджує технологічну ефективність системи як повноцінної альтернативи традиційному способу обприскування.

Практичний кейс роботи сервісної компанії “AGRONIX”, за матеріалами інтерв’ю з Миколою Черняком

Мета: надати агровиробникам професійний сервіс малооб’ємного внесення пестицидів із використанням агродронів у ситуаціях, коли традиційна техніка є малоефективною або недоступною, забезпечивши при цьому агрономічну доцільність і технологічну безпечність операцій (рис. 4.17., рис. 4.18.).

Передумова: На тлі стрімкого зростання попиту на безпілотні технології в аграрному секторі України сформувалася об’єктивна потреба в альтернативних методах внесення засобів захисту рослин. Традиційні самохідні обприскувачі не завжди можуть забезпечити обробіток, особливо в умовах перезволоження ґрунту, проведення обробітку високорослих культур або обмежених строків виконання технологічних операцій. У цей період діяльною була переорієнтація на застосування ультрамалооб’ємного внесення за допомогою агродронів як технології, що дозволяє оперативно реагувати на агрономічні проблеми без механічного пошкодження посівів.

Компанія «AGRONIX» вибудовувала модель роботи, в якій сервісне обприскування поєднується з глибокою агрономічною експертизою та дослідницькою діяльністю. Такий підхід забезпечує не лише виконання обробітку посівів, а й попередній аналіз ситуації, підбір оптимальних параметрів внесення, а також сформувати звітність по проведенню операції та подальший контроль результатів.

Методика: науково обґрунтований підхід компанії базується на використанні ультрамалооб’ємного обприскування, агрономічної логіки та експериментальній перевірці результатів та порівнянні з раніше отриманими результатами.

Ключовим елементом є моніторинг параметрів ультрамалооб’ємного внесення: швидкість внесення, висота над культурою, ширина паралельного прольоту та розмір краплі яка створюється атомайзером. Це забезпечує правильне осадження препарату на цільовий об’єкт внесення і мінімізує дрейф краплі. Рішення щодо обробки приймаються з урахуванням фази розвитку культури, ступеня ризику фітотоксичності та прогнозу втрати урожаю.

Ефективність технології підтверджується польовими дослідженнями та співпрацею з міжнародними виробниками пестицидів, зокрема FMC, Bayer та BASF. Після внесення проводиться контроль результатів за допомогою використання вегетаційних індексів, а саме мультиспектральних даних в БПЛА.

Таким чином, агродрон використовується як технологічно вивірений інструмент у системі інтегрованого захисту рослин, а не як універсальна альтернатива традиційній техніці.

Приклад наукового кейсу

У 2024 році спільно з BASF реалізовано проект із пізнім внесенням гербіциду Євро-Лайтнінг на соняшнику. Агрохолдинг пропустив оптимальний строк обробки за дощової погоди, що створювало ризик втрати врожаю.

Застосування агродронів дозволило провести внесення на пізній стадії розвитку культури. Рослини зазнали 10–20% хімічного стресу, проте було збережено понад 80% урожаю.

Кейс засвідчив, що БПЛА є ефективним інструментом у критичних ситуаціях, коли наземна техніка не змогла працювати через погодні умови.



Рис. 4.17. Використання БПЛА для внесення пестицидів.



Рис. 4.18. Відсутність бур'янів у фазу BBCH 53-55

Висновок: науково обґрунтований підхід у практиці «AGRONIX» базується на поєднанні фізичних законів руху краплі, агрономічної моделі розвитку культури та експериментального підтвердження ефективності кожного рішення. Це дозволяє використовувати агродрони не як універсальний інструмент, а як технологічно виважений компонент інтегрованої системи захисту рослин, де кожна операція має фізичне, біологічне та економічне обґрунтування.

Практичний кейс роботи сервісної компанії Dron.ua та перспективи цифрової агрономії, за матеріалами інтерв'ю з Анатолієм Безолюком

Мета: формування системної моделі впровадження безпілотних технологій у сільському господарстві України – від сервісного застосування агродронів до інтегрованої цифрової агрономії з використанням аналітики, агроскаутингу та диференційованого внесення. Рис.4.19., Рис.4.20.

Передумов: компанія DroneUA розпочала діяльність із картографування полів та трансформувалась у комплексний інтегратор безпілотних рішень. Ключовим етапом розвитку стало партнерство з виробником агродронів XAG, що дозволило масштабувати комерційне застосування БПЛА в Україні. Спочатку технології випробовували спільно з агрохімічними та насінневими компаніями, після чого сформувалась сервісна модель, за якої агродрони використовували підрядники для виконання спеціалізованих робіт. Згодом сільськогосподарські підприємства почали самостійно купувати техніку, що сприяло переходу ринку до фази активного зростання.

Методика: організаційна модель роботи компанії - сервісні послуги (надання послуг агровиробникам), перехід до власного володіння дронами фермерами, формування навчально-освітньої екосистеми.

Технологічний алгоритм застосування БПЛА на агровиробництві

Агродрони використовують для: десикації соняшника та ріпака; внесення фунгіцидів, інсектицидів, гербіцидів; розкидання мікродобрив і використання покривних культур; внесення біологічних препаратів; запилення та феромонного моніторингу. Паралельно розвивається напрямок дистанційного агроскаутингу з використанням спеціалізованим програмного забезпеченням, яке дозволяє: будувати NDVI-карти; створювати продуктивність карти; формувати завдання для диференційованого внесення; інтегрувати дані в систему управління господарством.

Висновок

Практичний досвід використання дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів свідчить про їх високу універсальність і ефективність у вирішенні широкого спектра аграрних та інженерних завдань. Навіть відносно

прості та доступні моделі БПЛА здатні забезпечити якісні дані для моніторингу територій, оцінки стану посівів, контролю будівництва й організації виробничих процесів.

Застосування БПЛА дозволяє суттєво підвищити оперативність отримання інформації, зменшити залежність від людського фактора, скоротити витрати часу та ресурсів, а також покращити точність управлінських і агрономічних рішень. Особливого значення набуває інтеграція даних з цифровими інструментами аналізу, геоінформаційними системами та технологіями точного землеробства.



Рис.4.19. Знімок поля зроблений БПЛА

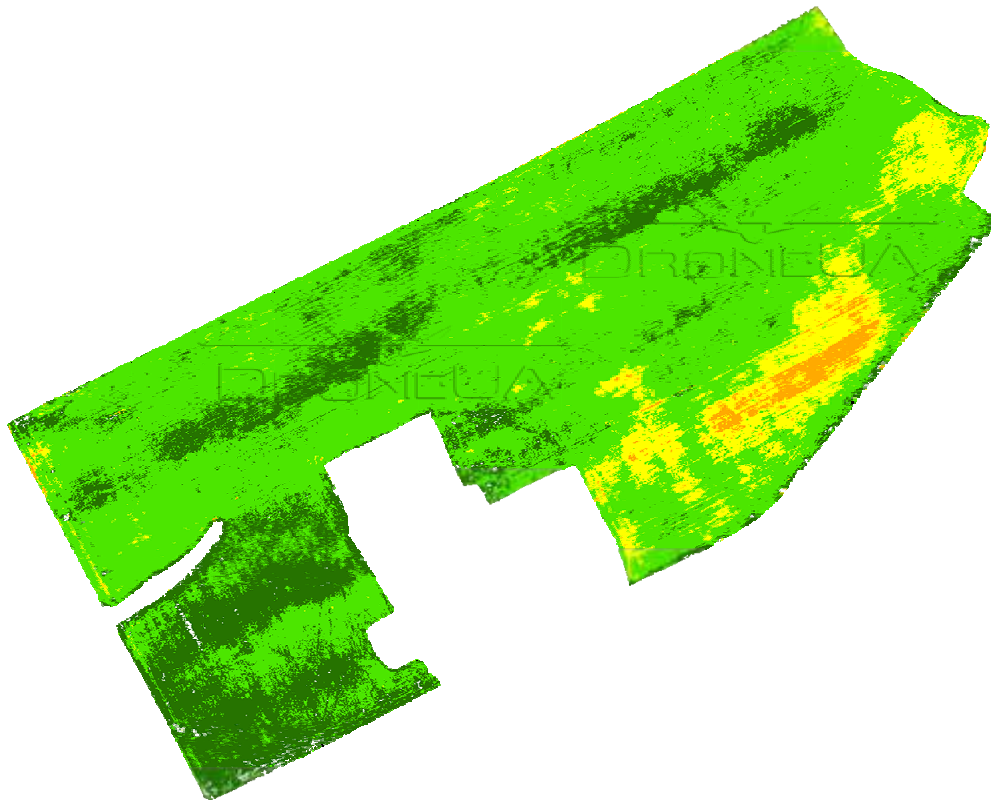


Рис.4.20. Візуальні та NDVI карти полів. Джерело: <https://drone.ua/pages/visual-and-ndvi-field-maps>

Контрольні завдання для самоперевірки знань

1. Охарактеризуйте основні напрями практичного використання ДК БПЛА в аграрному та інженерному скаутингу.
2. Які переваги надає застосування БПЛА у дорадчій діяльності та малих і середніх фермерських господарствах?
3. Поясніть роль ортофотопланів у контролі інженерних і агротехнічних процесів.
4. Які типи завдань можуть бути вирішені за допомогою навіть базових моделей БПЛА?
5. Опишіть основні етапи організації практичних робіт із використанням ДК БПЛА на господарстві.
6. У чому полягає економічна доцільність використання агродронів порівняно з традиційною технікою?
7. Які ризики та обмеження слід враховувати під час практичного застосування ДК БПЛА?
8. Як результати дистанційного агроскаутингу використовуються для прийняття агрономічних рішень?
9. Які компетенції повинен мати фахівець для ефективної роботи з ДК БПЛА у виробничих умовах?

Термінологічний словник

Безпілотне повітряне судно - повітряне судно, призначене для виконання польоту без пілота на борту, керування польотом якого і контроль за яким здійснюються за допомогою спеціальної станції керування, що розташована поза повітряним судном (пункт 6 розділу I Авіаційних правил України «Правила використання повітряного простору України», затверджених наказом Державної авіаційної служби України та Міністерства оборони України від 11 травня 2018 року № 430/210 (далі - Авіаційні правила).

Безпілотне повітряне судно (БПЛА/дрон) – це повітряне судно, призначене для виконання польоту без пілота на борту. Керування та контроль здійснюються за допомогою спеціальної станції, розташованої поза судном.

VLOS (Visual Line-of-Sight) – це базовий режим керування безпілотником, при якому оператор повинен постійно бачити апарат на власні очі без використання допоміжних засобів (крім окулярів чи лінз)

EVLOS (Extended Visual Line-of-Sight): дрон виходить за межі видимості пілота, але його бачить спеціально навчений спостерігач, який тримає зв'язок з оператором.

BVLOS (Beyond Visual Line-of-Sight): політ повністю за межами прямої видимості. Керування відбувається через камеру або за допомогою автономних систем.

Інформаційні матеріали

1. Методичні рекомендації з агроскаутингу за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА)

Розроблено за підтримки: Програма з аграрного і сільського розвитку (АГРО), зареєстрована в Кабінеті Міністрів України за № 72012120СА00001.

Програма АГРО — це семирічний проєкт міжнародної технічної допомоги, метою якого є прискорення економічного розвитку сільських громад України, що потребують найбільшої підтримки, шляхом удосконалення управління в аграрному секторі. Програма фінансується Урядом США та впроваджується компанією Chemonics International

Авторський колектив: М. Биков, А. Данкевич, В. Коваленко, В. Оверченко, М. Косолап, П. Горячев, В. Воронцов, О. Приходько, Н. Пенюк

Координатор: О. Приходько, менеджер із розвитку аграрних ринків Програми з аграрного і сільського розвитку (АГРО)

Консультант розділів: О. Зозуля

Комп'ютерна верстка: О. Печко

Бібліографія:

Методичні рекомендації з агроскаутингу за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА): програма з аграрного і сільського розвитку (АГРО) / М. Биков, А. Данкевич, В. Коваленко, В. Оверченко, М. Косолап, П. Горячев, В. Воронцов, О. Приходько, О. Зозуля. — Київ : Національний університет біоресурсів і природокористування України, 2025. — 69 с. ISBN 978-617-8798-52-9. Зареєстровано в Кабінеті Міністрів України № 72012120СА00001.

Зміст

Вступ. Значення дистанційного моніторингу у сучасному рослинництві	3
1. Основи електромагнітного випромінювання та спектральні характеристики рослин	7
2. Вегетаційні індекси: NDVI та інші індекси стану рослин	12
3. Апаратно-програмні комплекси дистанційного моніторингу агроценозів	16
4. Типи сенсорів і камер. Порівняння RGB, мульти- та гіперспектральних камер	22
5. Практичні аспекти застосування БПЛА та супутників	28
6. Обробка та інтерпретація даних	33
7. Штучний інтелект й машинне навчання	36
8. Тепловізійний моніторинг у агрономії	39
9. Візуалізація результатів і прийняття рішень	44
10. Агроскаутинг в індикативному бюджетуванні: нові підходи до підвищення ефективності управління ресурсами підприємств	51
11. Сучасний менеджмент роботи польового агронома з використанням БПЛА	58
ВИСНОВОК	65
ДОДАТКОВІ ДЖЕРЕЛА	66
ДЖЕРЕЛА ДЛЯ САМООСВІТИ СТУДЕНТА	68

Посилання:

https://www.researchgate.net/publication/398929502_Metodicni_rekomendacii_z_agroskautingu_z_a_dopomogu_bezpilotnih_litalnih_aparativ_BPLA



2. Методичні рекомендації для закладів вищої освіти з підготовки операторів безпілотних літальних апаратів для агропромислового виробництва : навчально-практичний посібник

Розроблено за підтримки: Програма з аграрного і сільського розвитку (АГРО), зареєстрована в Кабінеті Міністрів України за № 72012120СА00001.

Програма АГРО — це семирічний проєкт міжнародної технічної допомоги, метою якого є прискорення економічного розвитку сільських громад України, що потребують найбільшої підтримки, шляхом удосконалення управління в аграрному секторі. Програма фінансується Урядом США та впроваджується компанією Chemonics International

Авторський колектив: М. Биков, А. Данкевич, В. Коваленко, В. Оверченко, М. Косолап, П. Горячев, О. Приходько, Н. Пенюк

Координатор: О. Приходько, менеджер із розвитку аграрних ринків Програми з аграрного і сільського розвитку (АГРО)

Бібліографія:

Методичні рекомендації для закладів вищої освіти з підготовки операторів безпілотних літальних апаратів для агропромислового виробництва: Програма з аграрного і сільського розвитку (АГРО) / М. Биков, А. Данкевич, В. Коваленко, В. Оверченко, М. Косолап, П. Горячев, О. Приходько, Н. Пенюк. — Київ : НУБіП України, 2026. — 140 с.

ISBN 978-617-8798-60-4. Класифікація JEL: № 250942

УДК 378.6:[631:629.73](477)

ЗМІСТ

КОРОТКИЙ ЗМІСТ КОЖНОГО РОЗДІЛУ	4
ПЕРЕДМОВА	6
ВСТУП	8
АВТОРИ	9
РОЗДІЛ 1. Упровадження дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів у точному землеробстві	11
РОЗДІЛ 2. Класифікація дистанційно керованих безпілотних апаратів	27
РОЗДІЛ 3. Основи аеродинаміки та фізики польоту безпілотних літальних апаратів	48
РОЗДІЛ 4. Налаштування дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів	60
РОЗДІЛ 5. Програмне забезпечення для планування та управління дистанційно керованими безпілотними апаратами	100
РОЗДІЛ 6. Програмна діагностика та підготовка програмного забезпечення до польотів сільськогосподарських БПЛА	112
РОЗДІЛ 7. Економічна ефективність упровадження дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів та цифрових інструментів у практику агровиробництва	121

Посилання:

https://www.researchgate.net/publication/404761629_Metodicni_rekomendacii_dla_zakladiv_visoi_osviti_z_pidgotovki_operatoriv_bezpilotnih_litalnih_aparativ_dla_agropromislovogo_virobnictva_navcalno-prakticnij_posibnik



Рекомендовані матеріали для самостійного вивчення

Штучний інтелект у сільському господарстві: Стратегічний посібник для лідерів галузі [2025-2030]

<https://www.startus-insights.com/innovators-guide/ai-in-agriculture-strategic-guide/>

Сервіси AgInsights – це агрономічні моделі, які поєднують передову агрономію з практичним застосуванням. Наші алгоритми використовують неперевершену глобальну базу даних та науковий досвід Syngenta та надають локально актуальну агрономічну інформацію, що сприяє впевненому прийняттю рішень.

<https://open-platform.cropwise.com/#aginsights-services>

Чи може ШІ бути чудовим зрівнювачем у сільському господарстві?

<https://www.syngenta.com/agriculture/agricultural-technology/artificial-intelligence/can-ai-be-agricultures-great-equalizer>

Комплексне IT-рішення для агровиробників <https://www.soft.farm/uk>

Випуск DJI Terra V5.1: Безкоштовна обробка LiDAR та реконструкція кластерів трансформують робочі процеси підприємства.

<https://enterprise-insights.dji.com/blog/dji-terra-v5.1-release-free-lidar-processing-and-cluster-reconstruction-transform-enterprise-workflows>

Які типи дронів існують? Посібник з усіх різних типів дронів на ринку

<https://uavcoach.com/types-of-drones/>

Блог DroneDeploy – Картографування дронів <https://www.dronedeploy.com/>

Документація ArduPilot – Програмне забезпечення для автопілотування БПЛА. <https://ardupilot.org>

PX4 Autopilot – програмне забезпечення для керування польотом з відкритим кодом. <https://px4.io>

Фонд Dronecode – платформа БПЛА з відкритим кодом. <https://dronecode.org>

Інтерв'ю з компаніями, які застосовують БПЛА:

https://www.youtube.com/playlist?list=PLg7h68cPZQhk_B3jK1hCU4pE6X6k-Lr2Y

Список використаних джерел

1. <https://www.gao.gov/assets/d24105962.pdf>
2. <https://agfundernews.com/dji-report-charts-rapid-rise-in-global-adoption-of-ag-spray-drones>
3. <https://www.marketresearchfuture.com/reports/europe-agricultural-drones-market-44404>
4. <https://www.globalagtechinitiative.com/in-field-technologies/drones-uavs/global-drone-usage-and-adoption-continues-to-skyrocket-while-largely-benefiting-the-agriculture-industry/>
5. <https://defenda.com.ua/dron>
6. <https://news.agropages.com/News/NewsDetail---49316.htm>
7. <https://kurkul.com/spetsproekty/1743-silske-gospodarstvo-40--prikлад-rozvitku-v-ukrayini>
8. <https://propozitsiya.com/articles/tekhnika-ta-obladnannya-inshe/nyuansy-zastosuvannya-droniv-u-hospodarstvakh-pidsumky>
9. <https://diydrones.com/profiles/blogs/finwing-based-tiger-drone-test-flight>
10. <http://www.drones-mart.com/product/10026/Tiger-Shark-VTOL-3500mm-airframe>
11. <https://espreso.tv/poyasnuemo-leleki-shcho-nesut-ne-nove-zhittya-a-smert-rosiyanam-vse-pro-ukrainskiy-bpla-leleka-100-yakiy-nazivayut-ochima-ukrainskoi-artilerii>
12. <https://talosdrones.com/products/dji-mavic-3-multispectral>
13. <https://talosdrones.com/products/talos-t60x-sprayer-drone>
14. https://ecodrive.in.ua/kvadrokopter-dji-mavic-3e-cp-en-00000411-01/?utm_source=google&utm_campaign=PM_drones&utm_medium=cpc&utm_term=&gad_source=1&gad_campaignid=20758980711&gbraid=0AAAAAot7CEL7_5__T5kuKW0Da8DrFzf55&gclid=Cj0KCQjwxo_CBhDbARIsADWpDH6_eCGh_IBv8zRlCNJbhrH6_B6y3i1RbG5q3YzQs21yZNvjlpBKedkaAtK-EALw_wcB
15. <https://nv.ua/ukraine/events/bayraktar-tb2-aist-100-switchblade-puma-cto-mogut-ukrainskie-bespilotniki-novosti-ukrainy-50250235.html>
16. <https://www.marketresearchfuture.com/reports/drones-market-1124>
17. Dankevych, A., Sosnovska, O., Dobrianska, N., Nikolenko, L., Mazur, Yu., Ingram, K. (2021). Ecological and economic management of innovation activity of enterprises. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 112–118. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-5/118>
18. <https://aggeek.net/ru-blog/kupiti-dron-chi-vzyati-v-orendu->

19. <https://propozitsiya.com/articles/tekhnika-ta-obladnannya/drony-na-varti-vashykh-statktiv-abo-yak-zmenshyty-vytraty-i>
20. Denysiuk, O., Svitlyshyn, I., Tsaruk, I., Vikarchuk, O., Dankevych, A. (2022). Diversification in the enterprises activities for sustainable development in the agricultural sector. *Rivista di Studi sulla Sostenibilità*, 85–102. <https://doi.org/10.3280/RISS2022-002007>
21. Prodanchuk, M., Dankevych, A., Aksonova, O., Tomchuk, O. (2023). Digital tools for accounting and analytical support of enterprises: Innovation and management aspect. *Economics Ecology Society*, 7, 27–39. <https://doi.org/10.61954/2616-7107/2023.7.4-3>
22. Chukurna, O., Zamlynskyi, V., Dankevych, A. (Eds.). (2023). *Modern trends in digital transformation of marketing management*. Košice: University of Safety Management in Košice. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7633350>
23. Данкевич, В. Данкевич А. Інтернет речей та штучний інтелект як ключові елементи інноваційного розвитку підприємств в епоху цифрових викликів [Електронний ресурс] / Актуальні проблеми економіки. – 2024. – № 7. – С. 165–173. DOI: 10.32752/1993-6788-2024-1-277-165-173.
24. Зубець М.В. (ред). (2010). Наукові основи агропромислового виробництва в зоні Полісся і західному регіоні України. К.: Аграрна наука, 944 с. ISBN 978-966-540-293-0.
25. Ostapchuk, T., Orlova, K., Biriuchenko, S., Dankevych, A., & Marchuk, G. (2021). Defuzzification in the process of managerial estimating the value of agricultural lands. *Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal*, 7(4), 62–81. DOI: <https://doi.org/10.51599/are.2021.07.04.04> .
26. Данкевич А. (2008). Методологічні основи розвитку бюджетування у сільському господарстві. *Економіка АПК*, № 6. С. 64–69. URI: <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/43190>.
27. Данкевич А. Є. Організаційно-економічні складові раціонального господарювання / *Економіка АПК*. – 2011. – № 6. – С. 22–27.
28. Методичні рекомендації щодо оптимізації виробничої структури високотоварних сільськогосподарських підприємств Житомирської області / Р. І. Рудик, Т. Ю. Приймачук, А.Є. Данкевич [та ін.] ; Інститут сільського господарства Полісся НААН. – Житомир, 2016. – 97 с.
29. Dankevych, A., Stoyanova-Koval, S., Polova, O., Los, Z., Burdeina, N., Kazak, O. (2024). State of economic security and directions of restoration socio-economic development and food security in the conditions of war. *Financial and Credit Activity: Problems of Theory and Practice*, 2(55), 441–460. <https://doi.org/10.55643/fcaptp.2.55.2024.4170>

30. Kovalchuk, S., Morokhova, V., Bondarenko, O., Mohylova, A., Dankevych, A., Liu, J. (2024). Creative economy and value creation through marketing analytics: New approaches and opportunities. *Pakistan Journal of Life and Social Sciences*, 22(2), 9812–9824. <https://doi.org/10.57239/PJLSS-2024-22.2.00741>
31. Методичні рекомендації розроблені на основі «Сучасні методи цифрового моніторингу в рослинництві: Монографія / О. Л. Зозуля, В. В. Швартау, Л. М., Михальська, О.Л. Ковель, Г.М. Гнатієнко, В. Є. Снитюк, Н. П. Тменова. – К: Прінтстор Груп, 2025. - 396 с
32. Методичні рекомендації з агроскаутингу за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) : Програма з аграрного і сільського розвитку (АГРО) / М. Биков, А. Данкевич, В. Коваленко, В. Оверченко, М. Косолап, П. Горячев, В. Воронцов, О. Приходько, О., Зозуля. – Київ: АГРО, 2025. – 69 с. Зареєстровано в Кабінеті Міністрів України за № 72012120СА00001. URI: <https://eztuir.ztu.edu.ua/123456789/8975>
33. Методичні рекомендації для закладів вищої освіти з підготовки операторів безпілотних літальних апаратів для агропромислового виробництва: Програма з аграрного і сільського розвитку (АГРО) / М. Биков, А. Данкевич, В. Коваленко та ін. - Київ : Нац. ун. біоресурсів і природокористування України, 2026. – 140 с. URI: <https://eztuir.ztu.edu.ua/123456789/9128>
34. Dankevych, A., Perevozova, I., Nitsenko, V., Lozinska, L., Nemish, Y. (2023). Effectiveness of Bioenergy Management and Investment Potential in Agriculture: The Case of Ukraine. In: Koval, V., Olczak, P. (eds) Circular Economy for Renewable Energy. Green Energy and Technology. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30800-0_6
35. Комплексний розвиток національної та світової економіки в умовах сучасних трансформацій: колективна монографія / кол. авторів. Полтава: ПП “Астроя”, 2026. 304 с.
36. Данкевич А. Є. Розвиток орендних земельних відносин в умовах корпоратизації // Землевпорядний вісник. – 2015. – № 10. – С. 34-39. URI: <http://eztuir.ztu.edu.ua/123456789/8496>
37. Данкевич, А. Є. Особливості розвитку земельних відносин в умовах концентрації землекористувань / А. Є. Данкевич // Землеустрій і кадастр. – 2011. – № 2. – С. 34–39. URI <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/44042>

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Безпілотні літальні апарати в точному землеробстві

Підписано до друку 08.06.26 Формат 60х84\16
Ум. друк. арк. 10,0 Наклад 100 прим. Зам. № 260327

Видавець і виготовлювач Національний університет біоресурсів
і природокористування України,
вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 4097 від 17.06.2011