

# ЦИФРОВІ МЕТОДИ У КОНТРОЛЮВАННІ БУР'ЯНІВ

**Мета.** Дослідити складові цифрових технологій для підвищення ефективності контролювання бур'янів й продуктивності посівів сільськогосподарських культур, скорочення витрат на технології вирощування та для екологічно безпечної застосування гербіцидів. **Методи.** Визначали зміни нормалізованого диференційного вегетаційного індексу (NDVI) посівів з використанням сервісу супутникового моніторингу Cropwise Operation. Обробку даних проводили за допомогою програмного забезпечення від компанії SkyGlyph. У польових умовах величини NDVI визначали приладом GreenSeeker (Trimble Agriculture). Вміст хлорофілу в листках рослин вимірювали польовим хлорофіломіром SPAD-502 (Konica Minolta, Японія). Показник стресу Y(II), або реальний квантовий вихід електронного транспорту, що оцінює ефективний квантовий вихід фотохімічного перетворення енергії у ФСІІ, визначали за допомогою польового флуориметра Y(II) meter & Plant Stress Kit (OptiScience, США). Результати обробляли статистично. **Результати.** Наведено приклади з використання цифрових технологій у рослинництві для вдосконалення систем контролювання бур'янів. У рослинництві активно впроваджуються обчислювачі з інтелектуальними системами ідентифікації бур'янів та цільового внесення гербіцидів. Показано, що композиція гербіцидів флуметсулам + флорасулам у посівах зернових колосових культур ефективно контролює дводольні бур'яни — сухоребрик Льозеліїв, мак дикий, осот рожевий тощо. За визначення вмісту хлорофілу (величини SPAD-індексу) через тиждень після обробки відмінностей між обробленим варіантом та контролем не виявлено. Також, не виявлено суттєвих відмінностей у величинах NDVI. Показник стресу Y(II), або реальний квантовий вихід електронного транспорту ФСІІ, є достатньо чутливим та інформативним для визначення відмінностей у фотосинтетичній активності рослин бур'янів та, відповідно, загальної експрес оцінці ефективнос-

**<sup>1</sup>В.В. ШВАРТАУ,**

доктор біологічних наук

**<sup>1</sup>Л.М. МИХАЛЬСЬКА,**

кандидат біологічних наук

**<sup>2</sup>О.Л. ЗОЗУЛЯ,**

кандидат біологічних наук

<sup>1</sup>Інститут фізіології рослин і генетики  
НАН України, вул. Васильківська,  
31/17, м. Київ, 03022, Україна

<sup>2</sup>ТОВ Сингента-Україна, вул. Козацька,  
120/4, м. Київ, 03022, Україна

ті/селективності дії гербіциду на посіві. Наведено приклад використання супутникових даних для оцінювання забур'яненості поля. На початкових фазах розвитку кукурудзи спостерігали високий рівень індексу NDVI (0,4—0,5), коли саме рослини бур'янів активно розвивалися, відповідно визначали високі рівні вегетаційного індексу посіву. Величина NDVI посіву у полі суттєво змінилася після внесення гербіциду: показник індексу швидко знизився до 0,25—0,30. Таким чином, мультиспектральні (супутникові) знімки можуть бути використані для створення карт поширення бур'янів на полях раннього розвитку широко-рядних культур, що дозволяє фермерам визначати зони з високими рівнями засмічення бур'янами та вчасно застосовувати цільові заходи. **Висновки.** Застосування цифрових методів для вдосконалення систем контролювання бур'янів є невід'ємною складовою розвитку технологій вирощування сільськогосподарських культур у сучасному рослинництві, вони дозволяють зменшити рівні використання гербіцидів, знизити витрати на вирощування, підвищити врожайність. Розвиток мультиспектральних підходів у визначенні видів рослин перспективний не тільки щодо вдосконалення контролювання бур'янів гербіцидами, але й для оперативного визначення присутності/виникнення резистентних біотипів бур'янів на полях. Впровадження цифрових технологій (диджиноміка (diginomics)) або

цифровізація є ключовою складовою розвитку сучасного рослинництва на шляху підвищення рентабельності, продуктивності та якості врожаю за зниження впливу агропромисловості на екосистеми, а також за суттєвого зниження витрат на технології вирощування.

**диджиноміка; рослинництво; продуктивність; контроль бур'янів; цифровізація**

Продуктивність сільськогосподарських культур наближається до біологічних меж, тому досягнути приросту врожайності дедалі складніше, це завдання вимагає глибшого розуміння детермінованих шляхів формування врожайності [1]. Складність узгодження численних взаємозв'язків обґрунтовує необхідність розвивати системи управління біоценозами з використанням цифрових технологій і штучного інтелекту (ШІ). Цей підхід надзвичайно актуальний нині. «Horizon Europe — Digital» охоплює розвиток ключових цифрових технологій, підтримку зеленої та цифрової трансформації, орієнтований на реалізацію Європейського зеленого курсу/European Green Deal. За напрямом Цифрова трансформація в сільському господарстві та сільських територіях за програмами Horizon 2020 та Horizon Europe виконується 22 проекти, серед них:

- Demeter project: <https://h2020-demeter.eu/>
- Sieusoul project: <https://www.sieusoul.eu/>
- AFarCloud project: <http://www.afarcloud.eu/> AFarCloud
- SmartAgriHubs project <https://www.smartagrihubs.eu/>
- StarGate project <https://www.stargate-h2020.eu/project/>
- DataBio <https://www.databio.eu/en/>

- Innovar project <https://www.h2020innovar.eu/about-innovar/>

Традиційна агрономія під впливом викликів сучасності, насамперед необхідності суттєво підвищувати продуктивність рослинництва за дефіциту ресурсів, стрімко трансформується у напрямках формування оптимальних з екологічної точки зору агроценозів. В Україні аграрна складова економіки домінує в наповненні бюджету країни, тому її розвиток безумовно важливий, особливо під час війни та в період повоєнного відновлення.

Сучасне рослинництво характеризується швидким зростанням обсягів інформації, необхідністю приймати рішення щодо нарощування продуктивності культурних рослин за дефіциту часу, ресурсів, а також за змін клімату. Складність узгодження численних взаємозв'язків обґрунтовує необхідність розвивати системи управління біоценозами з використанням цифрових технологій, штучних нейронних мереж та штучного інтелекту. Початком розвитку цифрових технологій є використання вегетаційних індексів як базового елементу цифрової агрономії. Вже нині традиційні підходи класичного агроаналізу у рослинництві, садівництві та ландшафтному дизайні замінюються цифровими методами, наприклад для оцінки ґрунтово-кліматичних умов, прогнозування і т. ін. Ці дані, наразі, можна отримувати з багатьох супутників, які постійно працюють на орбіті Землі, дронів, БПЛА тощо. В арсеналі агронома нині цифрові прилади для якісного експрес-аналізу ґрунту, контролю водного обміну ґрунту й рослин, стресу рослин, визначення дефіциту елементів живлення, викидів парникових газів, моніторингу фітосанітарного стану та багато іншого [2, 3].

Впровадження нових технологій, таких як точне землеробство, геномні підходи та роботизація контролю бур'янів, пов'язане також з низкою проблем, серед яких технологічна складність, високі початкові витрати, необ-

хідність оперувати великими масивами даних *on-line*. Тим не менше, вже сьогодні цифрові рішення у системах вирощування культурних рослин дозволяють вирішувати багато складних питань та суттєво підвищувати рентабельність рослинництва.

Використання супутників чи дронів для аналізу стану посівів, управління господарською діяльністю, контролю якості проведення агротехнічних заходів є поширеною практикою. Багато господарств користуються послугами ІТ-компаній у виробничому процесі. Цифрові технології допомагають здійснювати комплексний моніторинг великих площ та вчасно приймати коректні технологічні рішення, що сприяють підвищенню рентабельності й продуктивності виробництва. Наприклад, щоб провести маршрутне обстеження одного поля площею до 100 га агроному потрібно щонайменше 3—4 години. Використовуючи супутниковий моніторинг агроном може за суттєво менший час оцінити стан посівів усього господарства. Прилад SoilScan працює на основі спектрального аналізу зразка ґрунту з подальшим використанням штучної нейронної мережі (ШНМ). Використовуючи SoilScan агроном може протягом півгодини оцінити наявність у ґрунті вуглецю, рН, основних елементів живлення, вмісту органічної речовини. Система Integra Scan проводить аналіз ізотопів ґрунту з подальшою обробкою за допомогою ШНМ. Згадані системи дозволяють побудувати карти поля щодо розподілу елементів живлення, вуглецю, а також карту відсоткового вмісту органічної речовини. Саме остання відкриває можливості диференційного внесення ґрунтових гербіцидів, норми внесення більшості яких залежать від вмісту органічної речовини. Широко використовуються N-тестер (SPAD-502 або аналогічні), ручний NDVI тестер, пенітрометри з GPS прив'язкою до місця вимірювання та можливістю отримання показників на різних глибинах ґрунту тощо. На основі одержаних даних за допо-

могою спеціальних програм будуються інтерактивні карти щільності ґрунту на полі.

Використання цифрових методів для контролю поширення бур'янів можна умовно розділити на три етапи.

**Перший етап** — моніторинг, визначення рівнів забур'яненості, видового складу, планування робіт по контролюванню. Використовуючи дані про погодні умови, типи ґрунтів, історію полів тощо, можна створювати моделі, які передбачають ймовірність появи, розповсюдження та рівні шкідливості бур'янів. Дослідники з Purdue University (США) розробили модель прогнозування росту бур'янів на основі даних про температуру, опади та інші кліматичні фактори. Ця модель була успішно застосована для прогнозування появи бур'янів на полях кукурудзи та сої, дозволяє фермерам вчасно вживати відповідних заходів [2].

Нині можливо проводити моніторинг рівнів забур'яненості за допомогою вегетаційних індексів на початкових етапах розвитку широкорядних культур. В цей період, за рахунок фону ґрунту, нормалізований диференційний вегетаційний індекс (NDVI) повинен мати низькі показники (0,2—0,3). На ділянках з високим рівнем індексу (більше 0,5), з великою часткою вірогідності, будуть знаходитися осередки забур'яненості [2].

Є можливість використовувати знімки RGB-камери з високим рівнем розподільчої здатності, які розміщують на дронах. Обліт поля дроном дозволяє оперативно зробити вибіркові знімки по всьому масиву поля. Потім ці знімки агроном може проаналізувати на комп'ютері, визначити видовий склад та рівень забур'яненості [2, 5].

Розвиток технологій комп'ютерного зору та машинного навчання відкрив нові можливості для виявлення та ідентифікації бур'янів за допомогою аналізу зображень. Спеціальні камери та сенсори, встановлені на сільськогосподарській техніці або безпілотних літальних апаратах

(БПЛА), можуть збирати зображення полів у високій розподільчій здатності. Ці зображення потім аналізуються за допомогою алгоритмів машинного навчання для виявлення та класифікації бур'янів за їхніми візуальними характеристиками. Одною з таких доробок є дослідження вчених з Wageningen University & Research (WUR) (Нідерланди), які розробили систему комп'ютерного зору для виявлення бур'янів на полях буряків цукрових (*Beta vulgaris* var. *Saccharifera* L.) з точністю визначення цільових об'єктів до 95%. Подібні системи були успішно застосовані для виявлення бур'янів на полях пшениці, кукурудзи та інших культур [6–8]. Одержана інформація може бути використана для створення карт розподілу бур'янів та цільового внесення гербіцидів лише в необхідних місцях, що зменшить їхнє загальне використання, витрати та сприятиме підвищенню рентабельності й продуктивності виробництва. Використовуючи супутниковий моніторинг, агроном може за менший час оцінити стан посівів усього господарства, а на окремих полях провести детальну оцінку завдяки фотокамерам з дрона (рис. 1). Переваги очевидні, але відсутність спеціальної інформації та методики використання цифрових даних в агрономічній практиці гальмує процес впровадження технологій.

Важливим аспектом моніторингу бур'янів є визначення стресового стану рослин. Залежність ефективності контролю виду рослини/ефективності гербіциду(дів) від фізіологічного стану/рівнів стресу у рослин бур'янів висока. Нагадаємо, що

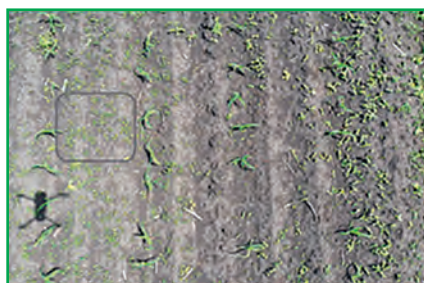


Рис. 1. Обстеження квадрокоптером посіву культури для визначення рівнів забур'яненості

у всіх рекомендаціях по застосуванню гербіцидів є застереження щодо їхнього використання в період стресового стану посіву. Застосування цифрових рішень у визначенні рівнів стресового стану рослин культури/бур'янів є важливим у розробці ефективних систем контролювання бур'янів. Можливе використання методів вимірювання стресу рослин за допомогою PlantStress Meter, або визначення температури рослинного покриву тепловізійними камерами [2].

**Другий етап** — застосування машин з вбудованим обладнанням, яке здатне визначати рослини бур'янів у полі і знищувати їх. Поєднання технологій комп'ютерного зору та робототехніки дозволило розробити роботизовані системи прополювання. Ці системи використовують камери та алгоритми машинного навчання для виявлення рослин бур'янів серед рослин культури, а потім застосовують точні механічні або хімічні методи для їх видалення. Такі роботизовані системи можуть працювати автономно або під наглядом оператора, забезпечуючи ефективне та точне прополювання без використання гербіцидів або механічного обробітку.

Компанія Nano Technologies (Франція) розробила автономного робота-прополювача Oz, який здатний виявляти та видаляти бур'яни за допомогою механічних інструментів. Подібні роботизовані системи розробляються також в США, Японії [Blue River Technology (сьогодні Deere & Company); Yamaha Motor Co., Ltd.] та інших країнах.

**Третій етапом** у розвитку технології контролю бур'янів є поєднання різних цифрових методів в інтегровані рішення. Наприклад, системи точного землеробства, забезпечені даними щодо розподілу бур'янів, потім використовуються для керування роботизованими системами прополювання. Моделі прогнозування можуть допомагати визначати найкращі засоби, а аналіз зображень може забезпечувати постійний моніторинг та оцінку

ефективності проведених заходів та передбачати доцільність методів, що плануються.

Застосування диференційного внесення гербіцидів блокуватиме застосування мінімальних норм витрати і, тим самим, сприятиме запобіганню виникнення резистентності у біотипів бур'янів. Зазначимо, що домінування численних зареєстрованих гербіцидів з одним сайтом дії — переважно це інгібітори ацетолактатсинтази (АЛС) — зумовлює високий рівень небезпеки швидкого утворення резистентних до дії гербіцидів біотипів бур'янів й, відповідне, падіння рентабельності виробництва. В Україні в усіх ґрунтово-кліматичних зонах ідентифіковано шкідливі біотиipi АЛС-резистентних бур'янів. Встановлено, що імідазолінон-резистентний біотип злакового виду плоскухи звичайної крос-резистентний до широко уживаних гербіцидів класів сульфонілсечовин, триазолпіримідинів. При цьому суттєво обмежуються можливості хімічного контролю виду у посівах рису, пшениці, кукурудзи, соняшнику, сої тощо. Виявлено АЛС-резистентність у розповсюджених дводольних видів шириці загнутої та лободи білої до гербіцидів класу імідазолінонів — імазапіру та імазамоксу. Спостерігали крос-резистентність у біотипів бур'янів до гербіцидів — інгібіторів АЛС класу сульфонілсечовин, а також до похідного триазолінонів, до похідних триазолпіримідинів. Також виявлено АЛС-резистентність у біотипів сухоребрика Льозелів, канатника Теофраста, видів полевички тощо. Вперше в рослинництві України ідентифіковано мультирезистентний до гербіцидів інгібіторів ацетолактатсинтази і протопорфіриногеноксидази біотип бур'яну амброзії полинолістої на посівах соняшнику у Центральній частині та на Півдні України у 2022–2024 рр. [9–11].

Традиційно для контролю резистентних біотипів бур'янів використовують гербіциди чи їхні композиції з іншими механізмами дії. Економічно ефективними заходами запобігання виникненню

й розповсюдженню резистентних біотипів бур'янів є використання високоякісного насіння без домішок бур'янів, збільшення частки агротехнічних методів контролю бур'янів, відновлення сівозмін з обов'язковою ротацією гербіцидів, які відрізняються за механізмами дії, введення до сівозмін з домінуванням злаків дводольних/бобових культур [2, 11].

За даними міжнародної бази даних резистентності бур'янів перші випадки резистентності у бур'янів почали спостерігати на початку 70-х років попереднього століття [12]. З відтермінуванням у 10–15 років у виробництві почали ідентифікувати мультирезистентні (до 2-х та більше гербіцидів з різними механізмами дії) біотиби бур'янів. Швидкість утворення нових моно(крос)резистентних та мультирезистентних біотипів бур'янів висока. Очевидним є висновок, що застосування композицій гербіцидів з різними механізмами дії лише відтермінує у часі необхідність вирішення проблеми резистентності [2, 11, 13]. Впродовж епохи створення та застосування гербіцидів залишилися невирішеними питання екологічної безпеки використання численних ксенобіотиків, серед яких, практично, не існує сполук, які в агрофітоценозах повністю метаболізують до простих молекул, що включаються у метаболізм мікроорганізмів.

Нині у рослинництві ще не можна відмовитися від традиційних методів обстеження. Хоча цифрові технології відкривають нові можливості для більш точного та ефективного контролю бур'янів, їх не слід розглядати як заміну традиційних методів, а радше — як доповнення до них. Поєднання цифрових та традиційних підходів може формувати нову комплексну та збалансовану стратегію контролю бур'янів, максимізувати переваги обох методів та мінімізувати їхні недоліки.

Важливо поєднувати цифрові методи з традиційними візуальними спостереженнями та експертними оцінками. Фахівці по захисту від бур'янів забезпечують додатковий контекст та

досвід, які корисні для інтерпретації даних, отриманих за допомогою цифрових технологій. Впровадження цифрових підходів у вирішенні численних проблем рослинництва також є перспективним для дослідження особливостей прояву фітотоксичності/селективності у виробничих умовах гербіцидів, або композицій гербіцидів.

**Метою роботи** було дослідити складові цифрових технологій для підвищення ефективності контролювання бур'янів й продуктивності посівів сільськогосподарських культур, скорочення витрат на технології вирощування та для забезпечення екологічної безпеки застосування гербіцидів.

**Матеріали і методи.** Дослідження склалися з трьох блоків:

1. Аналіз систем контролю присутності бур'янів у полях для створення інтелектуальних систем вибіркового внесення гербіцидів.
2. Визначення відмінностей фітотоксичності та селективності гербіцидів у виробничих умовах.
3. Аналіз даних з супутника для оцінювання рівнів забур'яненості посівів.

NDVI посівів визначали з використанням сервісу супутникового моніторингу Cropwise Operation. Дані, одержані із дрона, обробляли за допомогою програмного забезпечення від компанії SkyGlyph. У польових умовах величини індексу NDVI визначали приладом GreenSeeker (Trimble Agriculture). Вміст хлорофілу в листках рослин вимірювали за допомогою польового хлорофіломіру SPAD-502 (Konica Minolta, Японія) [2]. Показник стресу Y(II), або реальний квантовий вихід електронного транспорту, який оцінює ефективний квантовий вихід фотохімічного перетворення енергії у ФСII, визначали за допомогою польового флуориметра Y(II) meter & Plant Stress Kit (Opti-Science, США) та розраховували за формулою (Genty B., Harbinson J., 1996) [14]:

$$Y(II) = (F_m - F_s)/F_m,$$

де Y(II) — показник стресу, або

реальний квантовий вихід електронного транспорту;  $F_m$  — значення імпульсу насичення, яке не адаптоване до темряви;  $F_s$  — рівень флуоресценції, створюваний актинічним світлом.

Результати оброблено статистично з використанням програми Microsoft Excel 2019 з StatPlus від AnalystSoft Inc. Version v.7.

### *Результати та обговорення.*

#### **1. Системи контролю присутності бур'янів у полях для створення інтелектуальних систем вибіркового внесення гербіцидів**

Апарати від супутників до дронів мають низку переваг порівняно з традиційними методами фітосанітарного контролю полів щодо забур'янення, це — оперативне обстеження всього поля з виявленням місць забур'яненості, зменшення термінів обстеження, збільшення кількості облікових ділянок. За допомогою RGB-камер дронів можна проводити обстеження під різним кутом огляду, здійснювати облік у високорослих культурах. Збільшення облікових ділянок у цифровому форматі на моніторі дає змогу визначити тип забур'яненості та здійснити первинну оцінку видового складу. Також, за побудови детальної карти забур'яненості регіону/поля/ділянки, можна обґрунтовано зменшувати площі внесення гербіцидів.

Створено програми, які дають можливість виділити площу поля під основною культурою та точно визначити площу покриття бур'янами. На основі цих даних формується мапа рівнів забур'яненості та розподілу видів рослин по полю і планується диференційне внесення гербіцидів. Обприскувач, на основі даних цифрової мапи, буде призупиняти внесення препарату на ділянках, де бур'ян відсутній. Звертаємо увагу, що недоцільно зменшувати норми використання препаратів залежно від щільності стеблостою. Критичною для належного прояву фітотоксичності й селективності гербіцидів є концентрація діючої речовини,

або (зарєєстрована) доза внесення токсиканту, зниження якої зумовлює втрату ефективності й сприяє утворенню резистентних біотипів бур'янів.

Після зімкнення рядків культурної рослини ідентифікація бур'янів RGB-камерою стає неможливою. В той же час, можна побудувати мапу забур'яненості, поєднуючи непрямий метод (індексну карту стану рослин) та пряме маршрутне обстеження на ділянках в різним рівнем вегетаційного індексу. Спостерігається пряма залежність між щільністю забур'янення видами та рівнем вегетаційного індексу.

Зазначимо, що створення/пошук модельних ділянок, заповнення коректної бази даних — це багаторічна і високоартісна робота. Слід враховувати й гетерогенність модельних ділянок в різних регіонах. Часто на знімках з надвисокою деталізацією можуть виникати сторонні оптичні ефекти. Наприклад, завдяки змінам у позиціонуванні, ділян-

ки листків соняшнику можуть мати темніший колір, що не дозволяє коректно ідентифікувати види культурної рослин(и) та бур'янів. Витрати на дослідження й отримані результати при цьому не відповідають головній меті — зменшити витрати часу на проведення обстеження [15, 16]. Тому виробничники використовують переважно RGB-камери, щоб отримати ортофотознімки для подальшого візуального аналізу. Подібні технології активно впроваджуються на теренах нашої країни. На рисунку 2 наведено один з таких цифрових обприскувачів, які вже працюють на полях України. Вбудовані камери та штучний інтелект для обробки інформації з камер дозволяють визначати зони забур'яненості *on-line* і вносити препарат безпосередньо на цільові рослини бур'янів. Таким чином, розчин гербіциду менше потрапляє на рослини культури, що є складовою підвищення селективності та екологічної безпеки використан-

ня ксенобітиків, а економія витрати гербіцидів може сягати 80% залежно від рівнів забур'яненості ділянок поля.

Для виявлення бур'янів проводили зйомку з квадрокоптера. За один виліт протягом 20—25 хв коптер здатний провести зйомку 30—40-ка облікових точок, що набагато оперативніше у порівнянні з 2—3-ма годинами маршрутного обстеження. Зазначимо, для того щоб визначити видовий склад і фази розвитку бур'янів часто потрібно знизити висоту зйомки до кількох сантиметрів від верхівок рослин [2].

На рисунку 3 а наведено індексну карту, на якій стрілками з номерами позначено точки обліку. На фотографії ліворуч видно стан забур'яненості у кожній точці з різними індексами. У подальшому в цих точках було проведено зйомку з дрона RGB-камерою та підраховано чисельність бур'янів на 1 м<sup>2</sup> з накладанням віртуальної вимірювальної рамки (рис. 3 б). У даних точках провели також облік бур'янів традиційним способом візуально, з використанням на полі вимірювальної рамки (рис. 3 в). Порівняльні дані наведено в таблиці 1. За визначення бур'янів RGB-камерою дрона (I) та візуально (II) різниця між методами обліку не є суттєвою, загальна кількість бур'янів відрізняється не більше, ніж на 4%.

Слід зауважити, що точність визначення виду рослини зале-



Рис. 2. Обприскувач з інтелектуальною системою вибіркового внесення гербіциду, Київська обл., 2024 р.

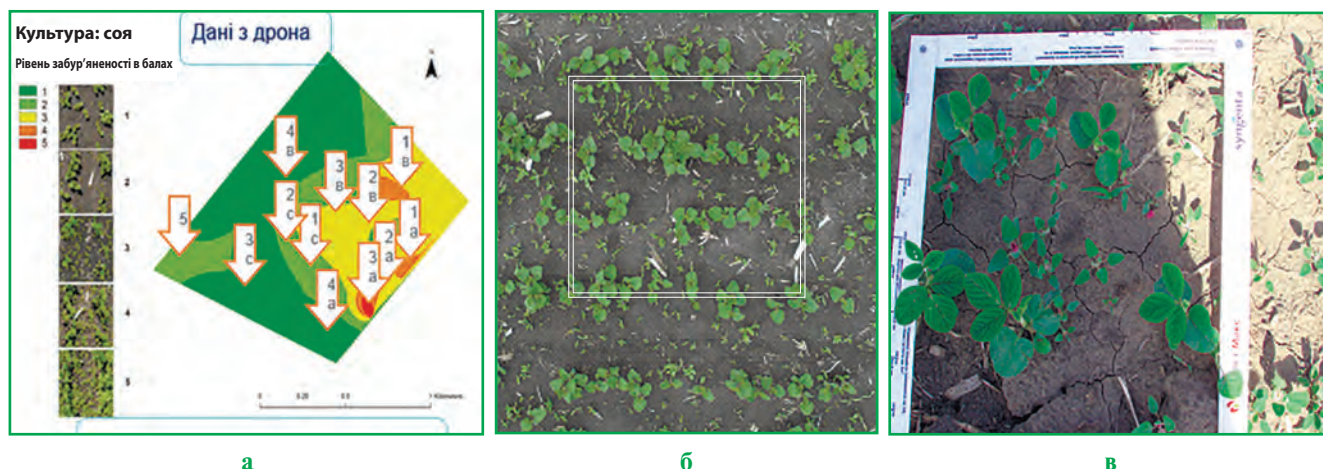


Рис. 3. Облік бур'янів у полі за допомогою дрона, Полтавська обл., 2021 р.: а — індексна карта поля; б — знімок, зроблений RGB-камерою з віртуальною рамкою; в — візуальний облік бур'янів у полі

**1. Обстеження рівнів забур'яненості у посівах сої, Полтавська обл., 2021 р.**

| Координати точки відбору | Кількість бур'янів, шт./м <sup>2</sup> , визначена за допомогою RGB-камери дрона (I) та візуально (II) |     |                               |     |                                 |    |                     |    |                                   |    |                           |    |         |      |
|--------------------------|--|-----|-------------------------------|-----|---------------------------------|----|---------------------|----|-----------------------------------|----|---------------------------|----|---------|------|
|                          | <i>Chenopodium album</i> L.  |     | <i>Polygonum aviculare</i> L. |     | <i>Raphanus raphanistrum</i> L. |    | <i>Setaria</i> spp. |    | <i>Capsella bursa-pastoris</i> L. |    | <i>Cirsium arvense</i> L. |    | Загалом |      |
|                          | I  | II  | I                             | II  | I                               | II | I                   | II | I                                 | II | I                         | II | I       | II   |
| 3с                       | 12   | 11  | 0                             | 0   | 4                               | 4  | 2                   | 2  | 0                                 | 0  | 0                         | 0  | 18      | 17   |
| 5                        | 63   | 61  | 6                             | 6   | 0                               | 0  | 4                   | 4  | 0                                 | 0  | 0                         | 0  | 73      | 71   |
| 4а                       | 34   | 34  | 7                             | 7   | 0                               | 0  | 4                   | 4  | 0                                 | 0  | 0                         | 0  | 45      | 45   |
| 3а                       | 74   | 72  | 210                           | 201 | 0                               | 0  | 0                   | 0  | 0                                 | 0  | 0                         | 0  | 284     | 273  |
| 2а                       | 96   | 92  | 165                           | 159 | 0                               | 0  | 4                   | 4  | 0                                 | 0  | 0                         | 0  | 265     | 255  |
| 1а                       | 10   | 10  | 72                            | 69  | 0                               | 0  | 3                   | 3  | 0                                 | 0  | 16                        | 16 | 101     | 98   |
| 2в                       | 21   | 21  | 44                            | 41  | 0                               | 0  | 5                   | 5  | 15                                | 15 | 0                         | 0  | 85      | 82   |
| 3в                       | 75   | 71  | 10                            | 10  | 0                               | 0  | 4                   | 4  | 0                                 | 0  | 0                         | 0  | 89      | 85   |
| 1в                       | 96   | 92  | 0                             | 0   | 0                               | 0  | 12                  | 12 | 7                                 | 7  | 0                         | 0  | 115     | 111  |
| 1с                       | 13   | 13  | 0                             | 0   | 6                               | 6  | 0                   | 0  | 12                                | 10 | 0                         | 0  | 57      | 55   |
| 2с                       | 25   | 25  | 0                             | 0   | 0                               | 0  | 13                  | 13 | 6                                 | 6  | 0                         | 0  | 51      | 51   |
| 4в                       | 5  | 5   | 0                             | 0   | 0                               | 0  | 35                  | 32 | 4                                 | 4  | 0                         | 0  | 44      | 41   |
| Разом                    | 524  | 507 | 514                           | 493 | 10                              | 10 | 86                  | 83 | 44                                | 42 | 16                        | 16 | 1227    | 1184 |

жатице від якості RGB-камери, висоти зйомки, можливості програмного забезпечення та інших складових. Наразі обстеження забур'яненості проходило за таким алгоритмом:

- аналізували індексні карти (одержані зі супутника або після сканування поля дрона);
- визначали координати місць із різним рівнем розвитку рослин. У цих точках проводили RGB-зйомку на низькій висоті, щоб мати чітке зображення;
- після «зшивання» фотографій підраховували нетипові рослини та видовий склад на моніторі комп'ютера.

Важливо порівняти ступінь забур'яненості на ділянках з різними значеннями NDVI, щоб визначити, що саме бур'яни є головним чинником змін величин вегетаційного індексу. Якщо є кореляція між ділянками з різними величинами вегетаційного індексу та рівнем забур'яненості, тоді саме бур'яни є лімітуючим фактором розвитку культурної рослини в полі.

Нині здійснюються успішні спроби машинної обробки показників забур'яненості поля: бур'яни програмно виділяються в одну групу, решта рослин — в другу (рис. 4). Навчити машинний зір визначати один вид рослин (саме

культури) це вже посильна задача для сучасних програм, на відміну від завдання відрізнити сотні видів інших рослин. При цьому можемо визначити приблизну площу під бур'янами.

Спроби визначати види за допомогою знімків (спектральних або візуальних) до останнього часу не мали успіху через суттєві величини похибок, тому цей напрям поки що активно досліджується. Штучні нейронні мережі знімок рослини, зроблений під різними кутами, з відмінностями в освітленні чи в різні години дня, сприймають як різні види рослин. Суттєво ускладнює вирішення питання ідентифікації швидкий ріст та розвиток рослин, відповідно, й постійні

морфологічні зміни. Зазначимо, що визначення видового складу бур'янів є важливою умовою точного вибору гербіциду або композиції гербіцидів, адже в кожного гербіциду свої відмінності у рівнях фітотоксичності та селективності щодо окремих біотипів рослин, тому без визначення їхніх видів і стадії розвитку важко коректно обрати ефективну тактику контролювання небажаної рослинності.

На основі досліджень поля можна створити карту забур'яненості, на якій видно ділянки, покриті небажаною рослинністю, та чисті від злісних бур'янів. Після визначення рівня засмічення поля чи окремих ділянок поля небажаною рослинністю стає



**Рис. 4.** Відокремлення бур'янів від культури в «машинному зорі». Полтавська область, 2021 р.

зрозумілою доцільністю обробки та можливий обґрунтований вибір гербіциду чи композиції гербіцидів для подальшого диференційного внесення препаратів.

## 2. Визначення відмінностей фітотоксичності та селективності гербіцидів у виробничих умовах

Класичним й мабуть першим питанням хімічного контролю бур'янів є вибір найбільш ефективного гербіциду. Важливо не тільки оцінити ефективність препарату проти бур'янів, але й визначити вплив препарату на культурну рослину, швидкість усунення шкідливого впливу бур'янів на культуру. Такою загальною оцінкою може бути динаміка розвитку рослин, яку визначають за показниками різних вегетаційних індексів. Перевагою даного підходу також є можливість побачити ці відмінності на всьому масиві поля, а не на окремих вибірках. Порівняємо ефективність гербіцидів: обидва

є композиціями АЛС-інгібіторів флуметсулам, 100 г/л + флорасулам, 75 г/л та флуметсулам, 120 г/л + флорасулам, 80 г/л (назвімо їх умовно композиції Г1 і Г2, відповідно), у препаративній формі концентрат суспензії, нормі внесення 0,05 л/га, на посівах пшениці озимої. Щоб визначити відмінності ефективності двох даних композицій провели комплексне обстеження ділянок щодо особливостей розвитку рослин за допомогою NDVI-сканера. Обстеження показали, що на ділянці з композицією Г1 на третій день після внесення вегетаційний індекс був вищим на 6%, порівняно з Г2. Це свідчить, що рослина легше перенесла гербіцидне навантаження від композиції Г1. Кращий розвиток рослин культури згодом вплинув і на ефективність (рис. 5). За аналізу стану рослин на всьому масиві відзначаємо, що за використання композиції Г1 площа з низьким індексом (менше 0,5) була на 10% меншою ніж після композиції Г2.

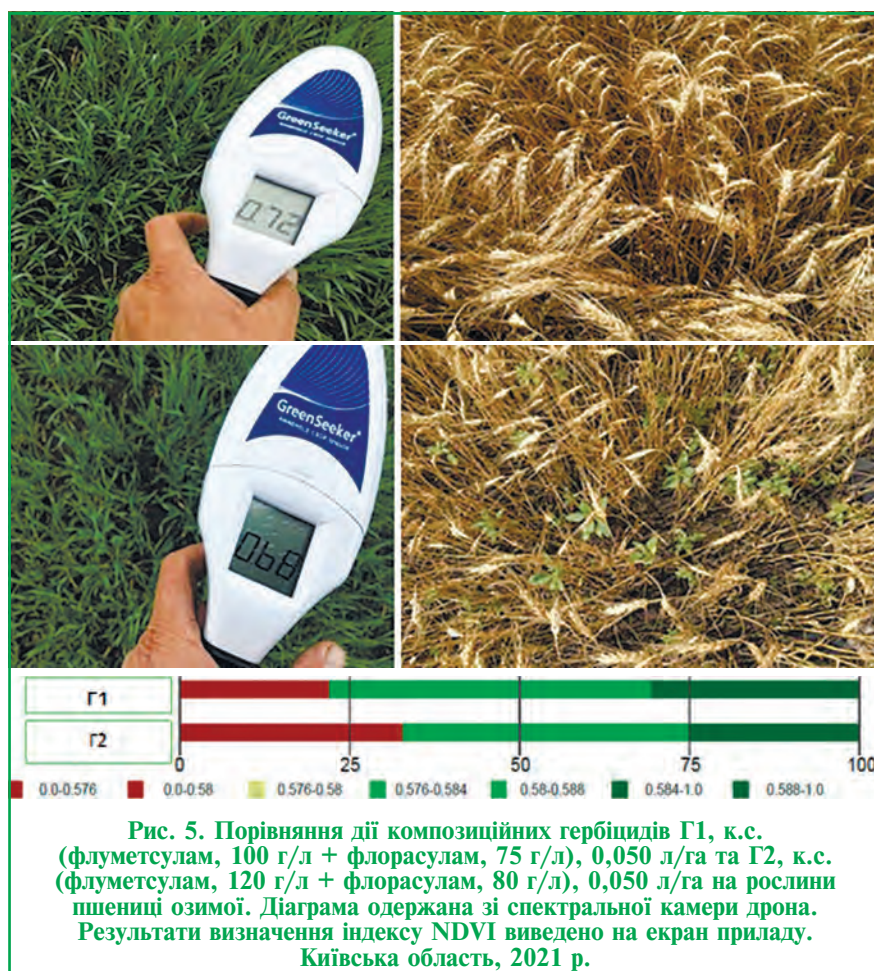
І навпаки площа з високим рівнем розвитку (вегетаційний індекс  $\geq 0,6$ ) була на 10% вищою.

На початковому етапі, після внесення препаратів, різниці (за візуальною оцінкою) в ефективності не було, а згодом виявилось, що композиція Г1 менш фітотоксична до пшениці озимої й у неї подовжена дія порівняно з композицією Г2. Врожайність під час збирання врожаю на ділянці з Г1 була на 3 ц/га вищою, ніж на ділянці з Г2.

Цифрові рішення дозволяють визначати прояви активності практично одразу після застосування пестицидів. Вимірювання стресу рослин важливе для оцінювання умов використання гербіцидів, також даний підхід стає в нагоді, коли потрібно оцінити дію деяких препаратів у виробництві. Багато сучасних гербіцидів мають повільну реалізацію фітотоксичності, що унеможливує візуальне оцінювання ефективності дії одразу після застосування. Візуально неможливо визначити ефективність флуметсуламу з флорасуламом за кілька днів після внесення, на відміну від застосування, наприклад діалену чи гліфосату. Також, практично неможливо візуально визначити відмінності у селективності багатьох діючих речовин гербіцидів щодо широкого переліку видів бур'янів, особливо проти тих видів/резистентних біотипів, які виживають після застосування гербіциду або композиції гербіцидів.

У традиційному підході до визначення ефективності використання гербіцидів часовий інтервал, необхідний для визначення дії гербіциду, становить, наприклад для АЛС-інгібіторів, від 1—2 тижнів і більше. Проте існують підходи до використання детектування змін фотосинтетичних показників, як інтегрального показника визначення проявів дії гербіцидів, навіть, якщо вони й не є селективними інгібіторами фотосистем (ФС) I чи II у рослин.

У виробничих умовах проводили визначення дії гербіцидів шляхом детектування вмісту



хлорофілу, величин NDVI та показника стресу Y(II).

Композиція гербіцидів флуметсулам + флорасулам ефективно контролює види дводольних бур'янів: сухоребрик Льозеліїв, мак дикий, осот рожевий тощо у посівах зернових колосових культур (рис. 6—8).

За визначення вмісту хлорофілу, через тиждень після обробки, відмінностей між обробленим варіантом та контролем не виявлено (величина SPAD-індексу). Також, за тиждень не виявлено суттєвих відмінностей у величинах NDVI. В той же час, показник стресу Y(II), або реальний квантовий вихід електронного транспорту ФС II є достатньо чутливим та інформативним для визначення відмінностей у фотосинтетичній активності рослин бур'янів та, відповідно, загальній оцінці експрес-визначення ефективності/селективності дії гербіциду на посіві (табл. 2).

### 3. Аналіз даних із супутника для оцінювання рівнів забур'яненості посівів

У сучасному рослинництві широко використовуються дані супутників для оцінки стану посівів протягом вегетаційного сезону. Наприклад, USDA Foreign Agricultural Service регулярно наводить цю інформацію (NDVI, Terra-MODIS) для теренів України у відкритому доступі [17]. Наведемо приклад використання супутникового знімка для оцінки забур'яненості поля. На початкових фазах розвитку кукурудзи спостерігаємо високий рівень індексу NDVI (0,4—0,5). Такий ви-



**Рис. 6. Ефективність композиції флуметсулам + флорасулам у контролюванні сухоребрика Льозеліїв (*Sisymbrium Loeselii* L.): справа — контроль. Київська область, 2021 р.**



**Рис. 7. Ефективність композиції флуметсулам + флорасулам у контролюванні маку дикого (*Papaver rhoeas* L.): справа — контроль. Київська область, 2021 р.**



**Рис. 8. Ефективність композиції флуметсулам + флорасулам у контролюванні осоту рожевого (*Cirsium arvense* (L.) Scop.): справа — контроль. Київська область, 2021 р.**

сокий показник NDVI сформував рівень забур'яненості (рис. 9). На початку вегетації культури рослини бур'янів активно розвивалися і визначали високі рівні вегетаційного індексу посіву. У цей

період розвитку посіву рослини культури лише сходять, тому на чистому від бур'янів полі рівні вегетаційного індексу NDVI повинні бути не вище 0,2.

Величина NDVI посіву у полі суттєво змінилася після внесення гербіциду: швидко знизився до 0,25—0,30, сама культура знаходиться ще на початкових фазах розвитку, а основний фон — грунт (рис. 9, нижні фото). Таким чином, мультиспектральні знімки можуть бути використані для створення карт поширення бур'янів на полях за раннього розвитку широкорядних культур, що дозволяє фермерам визначити зони з високими рівнями забур'янення та вчасно проводити відповідні заходи.

### 2. Особливості впливу композиції флуметсулам, 100 г/л + флорасулам, 75 г/л, концентрат суспензії, 0,050 л/га на рослини бур'янів. Київська область, 2021 р.

| Види бур'янів                     | SPAD-індекс                          | NDVI                                 | Показник стресу Y(II)                  |
|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|
| <i>Sisymbrium Loeselii</i> L.     | 48,1 <sup>a</sup> /47,5 <sup>a</sup> | 0,51 <sup>a</sup> /0,50 <sup>a</sup> | 0,071 <sup>a</sup> /0,350 <sup>b</sup> |
| <i>Papaver rhoeas</i> L.          | 44,1 <sup>a</sup> /44,4 <sup>a</sup> | 0,44 <sup>a</sup> /0,41 <sup>a</sup> | 0,707 <sup>a</sup> /0,301 <sup>b</sup> |
| <i>Convolvulus arvensis</i> L.    | 39,4 <sup>a</sup> /38,8 <sup>a</sup> | 0,77 <sup>a</sup> /0,75 <sup>a</sup> | 0,718 <sup>a</sup> /0,374 <sup>b</sup> |
| <i>Cirsium arvense</i> (L.) Scop. | 41,0 <sup>a</sup> /39,7 <sup>a</sup> | 0,68 <sup>a</sup> /0,67 <sup>a</sup> | 0,773 <sup>a</sup> /0,445 <sup>b</sup> |

**Примітка:** контроль/варіант; середні значення показника позначені однаковими літерами свідчать про недостовірну різницю за  $P < 0,05$ ; за 7 діб після обробки. SPAD-індекс — вміст хлорофілу, відносних одиниць SPAD (Konica-Minolta SPAD-502); NDVI — нормалізований диференційний вегетаційний індекс (Normalized Difference Vegetation Index), кількісний показник величини фотосинтетичної активної біомаси; показник стресу Y(II) — реальний квантовий вихід електронного транспорту ФС II у листках (Opti-Sciences), розраховували за формулою  $(F_m - F_c)/F_m$  [14]

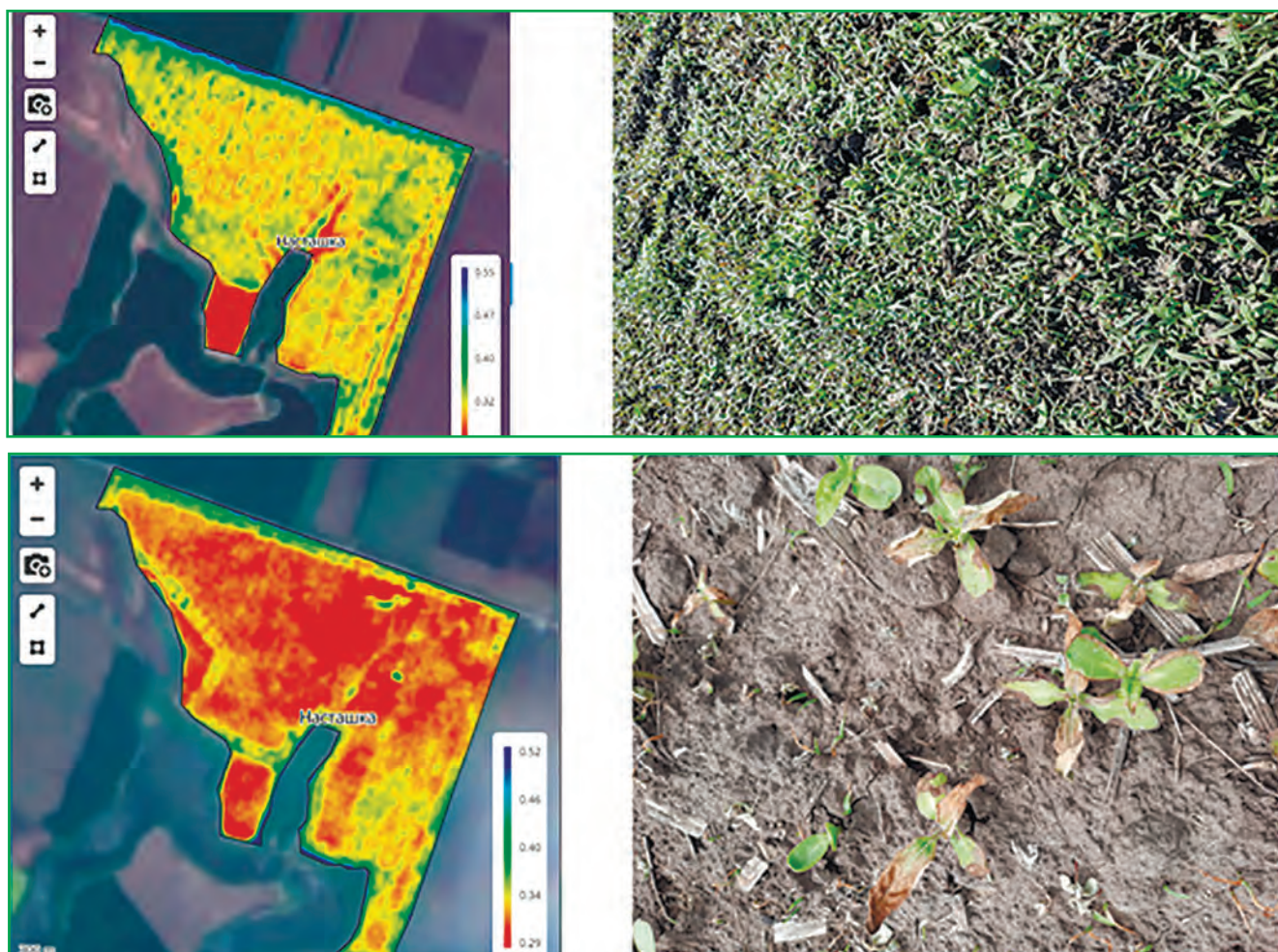


Рис. 9. Знімки із супутника. Показники вегетаційного індексу NDVI на забур'яненому полі (фото зверху) та після внесення гербіциду (фото внизу). Київська обл., 2021 р.

## ВИСНОВКИ

Застосування цифрових методів для вдосконалення систем контролювання забур'янення полів є невід'ємною складовою розвитку технологій вирощування сільськогосподарських культур у сучасному рослинництві. Цифрові методи дають можливість зменшити рівні використання гербіцидів, знизити витрати на технології вирощування, підвищити врожайність та розвинути сільське господарство у напрямках сталого та екологічно безпечного виробництва. Нові погляди на вдосконалення контролю бур'янів за впровадження цифрових технологій, штучного інтелекту та нейронних мереж — основа для підвищення урожаїв, ефективності використання ресурсів у сільському господарстві, скорочення викидів парникових газів. Створення і впроваджен-

ня цифрових технологій у рослинництві дозволяє отримувати суттєво більше інформації про поточний стан посівів й оптимізувати витрати для одержання максимально можливих врожаїв в умовах регіону. Незважаючи на значний прогрес у цій галузі, впровадження цифрових методів у контролюванні бур'янів все ще стикається з певними викликами. Необхідно забезпечити надійність та точність технологій, а також доступність.

Розвиток мультиспектральних підходів у визначенні видів рослин дозволить не тільки вдосконалювати системи контролювання бур'янів гербіцидами, але й, можливо, оперативно визначати присутність/виникнення резистентних біотипів бур'янів на полях. Впровадження цифрових технологій є ключовою складовою розвитку сучасного рос-

линництва на шляху підвищення рентабельності, продуктивності та якості врожаю за зниження впливу агровиробництва на екосистеми, а також за суттєвого зниження витрат на технології вирощування.

Нові погляди на функціонування біоценозів за впровадження цифрових технологій, штучного інтелекту та нейронних мереж — основа для підвищення урожаїв, ефективності використання ресурсів у сільському господарстві, скорочення викидів парникових газів.

**Фінансування:** дослідження проведені відповідно до виконання наукової роботи «Основи раціонального живлення та захисту для підвищення продуктивності пшениці озимої та інших сільськогосподарських культур», державний реєстраційний номер

роботи 0119U002235; а також згідно з планами дослідів ТОВ Сингента-Україна.

**Конфлікти інтересів:** автори декларують відсутність конфлікту інтересів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Моргун В.В., Швартау В.В., Коновалов Д.В., Михальська Л.М., Скрипльов В.О. Клуб 100 центнерів. Сучасні сорти та системи живлення і захисту пшениці озимої. Видання XI. Наук. видання. Київ: Вістка, 2022. 106 с.
2. Зозуля О.Л., Швартау В.В., Михальська Л.М., Ковель О.Л., Гнатієнко Г.М., Снитюк В.С., Домрачев В.М., Тменова Н.П. Сучасні методи цифрового моніторингу в рослинництві. Монографія. Київ: «Від А до Я», 2023. 254 с.
3. Balasundram S.K., Shamshiri R.R., Sridhara S., Rizan N. The Role of Digital Agriculture in Mitigating Climate Change and Ensuring Food Security: An Overview. *Sustainability*. 2023. 15. 5325. <https://doi.org/10.3390/su15065325>
4. Lindquist J.L., Mortensen D.A., Clay S.A., Schmenk R., Kells J.J., Howatt K., Westra P. Stability of corn (*Zea mays*)-velvetleaf (*Abutilon theophrasti*) interference relationships. *Weed Science*. 1966. 44(2). 309-313. <https://doi.org/10.1017/s0043174500093930>
5. Esposito M., Crimaldi M., Cirillo V., Sarghini F., Maggio A. Drone and sensor technology for sustainable weed management: a review. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. 2021. 8. 18. <https://doi.org/10.1186/s40538-021-00217-8>
6. Nieuwenhuizen A.T., Hofstee J.W., van Henten E.J. Adaptive detection of volunteer potato plants in sugar beet fields. *Precision Agriculture*. 2010. 11(5). 433-447. <https://doi.org/10.1007/s11119-009-9138-9>
7. Gerhards R., Christensen S. Real-time weed detection, decision making and patch spraying in maize, sugarbeet, winter wheat and winter barley. *Weed Research*. 2003. 43(6). 385-392. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2003.00349.x>
8. Dille J., Milner M., Groetke J., Mortensen D., Williams M. How good is your weed map? A comparison of spatial interpolators. *Weed Science*. 2009. 51. 44-55. [https://doi.org/10.1614/0043-1745\(2002\)051\[0044:HGIYWM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0043-1745(2002)051[0044:HGIYWM]2.0.CO;2)
9. Mykhalska L.M., Schwartau V.V. Identification of acetolactate synthase resistant *Amaranthus retroflexus* in Ukraine. *Regulatory Mechanisms in Biosystem*. 2022. 13(3). 231-240. <https://doi.org/10.15421/022230>
10. Schwartau V.V., Mykhalska L.M., Makoveychuk T.I., Tretiakov V.O. Identification of a herbicide-resistant biotype of *Echinochloa crus-galli* in Ukraine. *Biosystems Diversity*. 2023. 31(3). 297-304. <https://doi.org/10.15421/012334>
11. Швартау В.В., Михальська Л.М. Крос- та мультирезистентність у бур'янів до дії гербіцидів в Україні. Карантин і захист рослин. 2023. 3(274). 3-9. <https://doi.org/10.36495/2312-0614.2023.3.3-9>
12. Heap I. The International Herbicide-Resistant Weed Database. 2024. URL: [www.weedscience.org](http://www.weedscience.org)
13. Gao W.-T.; Su W.-H. Weed Management Methods for Herbaceous Field Crops: A Review. *Agronomy* 2024. 14. 486. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030486>
14. Genty B., Harbinson J. 1996. Regulation of light utilization for photosynthetic electron transport. In: *Photosynthesis and the Environment*. Ed. N.R. Baker. Dordrecht: Kluwer Acad. Publishers, pp. 67-99. [https://doi.org/10.1007/0-306-48135-9\\_3](https://doi.org/10.1007/0-306-48135-9_3)
15. Mesías-Ruiz G., Borra-Serrano I., Peña-Barragán J.M., De Castro A., Fernandez-Quintanilla C., Dorado J. Weed species classification with UAV imagery and standard CNN models: Assessing the frontiers of training and inference phases. *Crop Protection*. 2024. 182. 106721. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2024.106721>
16. Mesías-Ruiz G., Pérez-Ortiz M., Dorado J., De Castro A., Peña-Barragán J.M. Boosting precision crop protection towards agriculture 5.0 via machine learning and emerging technologies: A contextual review. *Frontiers in Plant Science*. 2023. 14. 1143326. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1143326>
17. USDA Crop Explorer. URL: <https://ipad.fas.usda.gov/cropeexplorer/imageview.aspx?regionid=umb>

<sup>1</sup>**Schwartau V.**

ORCID: 0000-0001-7402-5559

<sup>1</sup>**Mykhalska L.**

ORCID: 0000-0002-0677-5574

<sup>2</sup>**Zozulya O.**

ORCID: 0000-0003-3500-3423

<sup>1</sup>*Institute of Plant Physiology and Genetics of NAS of Ukraine, 31/17*

*Vasilkivska str., Kyiv, 03022, Ukraine*

<sup>2</sup>*Syngenta Ukraine, 120/4 Kozatska str., Kyiv, 03022, Ukraine*

### Digital methods in weed control

**Goal.** Explore the components of digital technologies to increase the efficiency of weed control and crop productivity, reduce the cost of cultivation technologies, and ensure the environmental safety of herbicide use. **Methods.** The Normalised Differential Vegetation Index (NDVI) of the crops was determined using the Cropwise Operation satellite monitoring service. In field conditions, NDVI values were determined with the GreenSeeker device (Trimble Agriculture). Chlorophyll content in plant leaves was measured using a SPAD-502 field chlorophyll meter (Konica Minolta, Japan). The stress index Y(II) or real quantum yield of electron transport, which estimates the effective quantum yield of photochemical energy conversion to FSII, was determined using a field fluorometer Y(II) meter & Plant Stress Kit (Opti-Science, USA). The results were statistically processed. **Results.** Examples of the use of digital technologies in crop production to improve weed control systems are presented. Sprayers with intelligent systems for identification of weeds and targeted application of herbicides are being actively implemented in crop production. It has been shown that

the combination of flumetsulam + florasulam herbicides effectively controls dicotyledonous weeds such as Lözeli's dry rib, wild poppy, pink thistle, etc. For the determination of chlorophyll content (the value of the SPAD index) one week after treatment, the differences between the treated variant and the control were not removed. No significant differences were also found in the NDVI values. At the same time, the stress indicator Y(II), or the real quantum yield of electron transport of FSII, is quite sensitive and informative for determining differences in photosynthetic activity of weed plants and, accordingly, for a general rapid assessment of the efficacy/selectivity of the herbicide on the crop. An example of the use of satellite data to assess the weediness of a field is presented. In the early stages of maize development, a high level of NDVI index (0.4—0.5) was observed when weeds were actively developing, and correspondingly high levels of crop vegetation index were recorded. The NDVI value of the crop in the field changed significantly after the herbicide application: the index value decreased rapidly to 0.25—0.30. Multispectral (satellite) imagery can therefore be used to produce maps of weeds in fields during the early development of wide-row crops, allowing farmers to identify areas with high levels of weed infestation and apply targeted measures in good time. **Conclusions.** The use of digital methods to improve weed control systems is an integral part of the development of cultivation technologies in modern crop production. Digital methods make it possible to reduce the use of herbicides, lower the cost of cultivation technologies, increase yields and develop agriculture towards sustainable and environmentally friendly production. The development of multispectral approaches in the identification of plant species is promising not only for the improvement of weed control with herbicides, but also for the operational determination of the presence/emergence of resistant weed biotypes in the fields. The implementation of digital technologies (diginomics) or digitalization is a key component of the development of modern crop production on the way to increasing the profitability, productivity and quality of the crop for reducing the impact of agricultural production on ecosystems, as well as for significantly reducing the costs of growing technologies.

**diginomics; crop production; productivity; weed control**

Надійшла до редакції: 10.06.2024

Прийнята до друку: 30.07.2024

Надруковано й опубліковано онлайн:  
жовтень 2024