МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Агрономічний факультет
Кафедра ґрунтознавства та землеробства

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Кияниченко Михайло Олегович

УДК 633.85:631.582:631.358:629.735.05

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АГРОДРОНУ ДЛЯ ПОСІВУ РЕДЬКИ ОЛІЙНОЇ В ЯКОСТІ СИДЕРАЛЬНОЇ КУЛЬТУРИ В УМОВАХ НАВЧАЛЬНО-ДОСЛІДНОГО ПОЛЯ ПОЛІСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

201 «Агрономія»

Подається на здобуття освітнього рівня «Магістр»

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання
на відповідне джерело_____ М.О. Кияниченко

Керівник роботи **С. В. Журавель,**
канд. с. г. наук, доцент

Житомир–2025

Зміст

Анотація	3
Вступ	5
Розділ 1. Літературний огляд	9
Розділ 2. Умови, об'єкти і методика проведення досліджень.	15
2.1. Місце та умови проведення досліджень .	15
2.2. Об'єкти і методика проведення досліджень	18
Розділ 3. Результати досліджень	23
3.1. Аналіз посівних властивостей насіння редьки олійної за результатами лабораторних досліджень	23
3.2. Вплив висоти польоту та норми висіву на рівномірність розподілу насіння редьки олійної	26
3.3. Результати густоти та виживабельності рослин редьки олійної у системі сидерального землеробства з використанням агродронів	29
3.4. Економічна ефективність і технологічні переваги використання агродронів у вирощуванні редьки олійної як сидеральної культури	31
Висновки	33
Рекомендації виробництву	34
Список використаних джерел	35

АНОТАЦІЯ

Кияниченко М.О. «Оцінка ефективності використання агродрону для посіву редьки олійної в якості сидеральної культури в умовах навчально-дослідного поля Поліського національного університету». – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня магістра за спеціальністю 201 – агрономія. – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Робота викладена на 37 сторінках комп'ютерного набору, містить 4 таблиці, 6 рисунків, складається зі вступу, 3 розділів, висновків, рекомендацій виробництву. Список використаних джерел включає 34 найменувань.

У роботі розглянуто ефективність використання агродронів для посіву редьки олійної як сидеральної культури в умовах навчально-дослідного поля Поліського національного університету. Стрімкий розвиток цифрових технологій та впровадження елементів точного землеробства в XXI столітті суттєво змінюють традиційні підходи до агровиробництва, проте застосування дронів саме для сівби залишається малодослідженим напрямом. В умовах воєнних дій, коли доступ до полів та можливості використання важкої техніки часто є обмеженими, агродрони виступають як технологія, здатна забезпечити оперативний, безпечний і точний висів насіння, мінімізувати вплив погодних умов та стану ґрунту, а також забезпечити доступ до важкодоступних ділянок. Застосування агродронів для посіву сидеральних культур, зокрема редьки олійної, має стратегічне значення для розвитку екологічно орієнтованого та органічного землеробства в Україні. На тлі скорочення поголів'я худоби та дефіциту органічних добрив потреба у сидератах як джерелі органічної речовини різко зростає. Редька олійна сприяє покращенню структурно-фізичних властивостей ґрунту, підвищенню його біологічної активності та оздоровленню фітосанітарного стану. Отримані результати досліджень дозволяють оцінити потенціал агродронів у формуванні нового технологічного підходу до сівби сидератів, що поєднує точність, ресурсозбереження та екологічну ефективність, і може стати основою для модернізації системи землеробства України у післявоєнний період.

Ключові слова: агродрон, точне землеробство, редька олійна, сидеральні культури, ресурсозбереження, органічна речовина, Полісся, органічне землеробство.

SUMMARY

Kiyanychenko M.O. “Assessment of the Efficiency of Using an Agrodron for Sowing Oilseed Radish as a Green Manure Crop under the Conditions of the Educational and Research Field of Polissia National University.” – Qualification Thesis (Manuscript).

A qualification thesis submitted for the Master’s degree in the specialty 201 – Agronomy. – Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

The thesis consists of 37 pages of computer-typed text and includes 4 tables and 6 figures. It is structured into an introduction, three chapters, conclusions, and production recommendations. The list of references contains 34 sources.

The study examines the efficiency of using agrodrones for sowing oilseed radish as a green manure crop under the conditions of the educational and research field of Polissia National University. The rapid development of digital technologies and the introduction of precision agriculture elements in the 21st century significantly transform traditional approaches to crop production; however, the use of drones specifically for sowing remains an underexplored direction. Under wartime conditions, when access to fields and the operation of heavy machinery are often restricted, agrodrones offer a technology capable of providing timely, safe, and precise seed placement, minimizing the influence of weather conditions and soil state, and enabling work in hard-to-reach areas. The application of agrodrones for sowing green manure crops, particularly oilseed radish, is of strategic importance for the development of environmentally oriented and organic farming in Ukraine. Against the background of declining livestock numbers and a shortage of organic fertilizers, the need for green manure crops as a source of organic matter is rapidly increasing. Oilseed radish improves soil structural and physical properties, enhances biological activity, and contributes to the phytosanitary improvement of agroecosystems. The results of the research make it possible to assess the potential of agrodrones in forming a new technological approach to sowing green manure crops, one that integrates precision, resource efficiency, and ecological effectiveness, and may serve as a basis for modernizing Ukraine’s agricultural systems in the post-war period.

Keywords: agrodron, precision agriculture, oilseed radish, green manure crops, resource efficiency, organic matter, Polissia, organic farming.

ВСТУП

Актуальність теми. XXI століття характеризується інтенсивним розвитком цифрових технологій, що суттєво трансформують аграрний сектор та сприяють переходу до концепції точного землеробства. Використання безпілотних літальних апаратів у рослинництві вже стало важливою складовою моніторингу посівів, внесення засобів захисту рослин та мікродобрив. Проте застосування агродронів для сівби залишається малодослідженим напрямом, який потребує наукового опрацювання, технічного вдосконалення та адаптації до різних ґрунтово-кліматичних умов. Недостатній рівень розробки цієї технології визначає потребу у комплексних дослідженнях, що дозволять оцінити її ефективність і перспективи практичного впровадження.

В умовах воєнних дій в Україні, які ускладнюють доступ до полів, обмежують можливості застосування важкої техніки та створюють додаткові ризики для аграрного виробництва, агродрони набувають особливого значення. Розвиток вітчизняних безпілотних технологій відкриває унікальні можливості для модернізації технологічних процесів землеробства. Застосування агродронів для посіву сидеральних культур, таких як олійна редька, дозволяє скоротити виробничі витрати, підвищити оперативність виконання агротехнічних операцій та забезпечити доступ до важкодоступних площ - крутих схилів, ущільнених або перезволожених ділянок. Водночас цей підхід мінімізує залежність технологічного циклу від погодних умов, що є ключовим чинником за сучасних кліматичних коливань.

Додаткової актуальності дослідження набуває у контексті розвитку екологічно орієнтованого та органічного землеробства. На тлі зменшення обсягів внесення органічних добрив і скорочення поголів’я худоби зростає потреба у сидератах як джерелі органічної речовини для відновлення родючості ґрунтів. Редька олійна є ефективною сидеральною культурою, здатною покращувати структурно-фізичні властивості ґрунту, підвищувати його біологічну активність та оздоровлювати фітосанітарний стан.

Поєднання потенціалу сидератів з інноваційними технологіями посіву за допомогою дрону формує новий екологічно та економічно обґрунтований підхід до управління ґрунтовими ресурсами.

Отже, розробка та наукове обґрунтування технології посіву редьки олійної з використанням агродронів є актуальним і перспективним напрямом, що відповідає сучасним вимогам ресурсозбереження, екологічної стабільності та підвищення стійкості аграрного сектору України. Дослідження, проведені на навчально-дослідному полі Поліського національного університету, здатні закласти наукове підґрунтя для широкого впровадження цієї технології у виробництво та формування нового стандарту сидерального землеробства у післявоєнний період.

Мета досліджень полягає в оцінці ефективності технології посіву редьки олійної як сидеральної культури за допомогою агродрона та в обґрунтуванні оптимальних технологічних параметрів її застосування в умовах навчально-дослідного поля Поліського національного університету.

Для досягнення мети, нами були вирішені такі завдання:

1. Оцінити посівні якості насіння редьки олійної сорту Райдуга (енергія проростання, лабораторна схожість) та визначити їхній вплив на формування сходів у технології поверхневого висіву агродроном.

2. Проаналізувати вплив технологічних параметрів посіву агродроном XAG P100 Pro (висота польоту, норма висіву, конструкційні особливості шнекового висівного апарата) на рівномірність розподілу насіння та густоту стояння рослин редьки олійної.

3. Дослідити роль попередньої гербіцидної підготовки ґрунту у забезпеченні виживабельності та початкової продуктивності рослин при різних варіантах посіву.

4. Визначити динаміку росту та розвитку редьки олійної в польових умовах залежно від норми висіву, висоти польоту дрона та технологічного фону, зокрема встановити ключові фактори, що обмежують формування сидеральної біомаси.

5. Оцінити технологічну та економічну ефективність використання агродронів для поверхневого висіву сидеральних культур у ґрунтово-кліматичних умовах Полісся та порівняти її з традиційними механізованими операціями.

6. Розробити практичні рекомендації для впровадження технології посіву дрібнонасінних сидератів агродронами, включно з оптимізацією норм висіву, алгоритмів прольоту та схем перехресного посіву.

Об'єктом дослідження є процес посіву редьки олійної як сидеральної культури із застосуванням агродрона, що розглядається як сучасний технологічний засіб для точного, ефективного та ресурсозберігаючого виконання агротехнічних операцій в умовах сільськогосподарського виробництва України, включно з обмеженнями та ризиками, спричиненими воєнними діями.

Предметом дослідження є технологічні особливості та параметри посіву редьки олійної агродроном, зокрема точність внесення насіння, рівномірність висіву, економічна ефективність та вплив даної технології на продуктивність сидеральної культури й екологічну стійкість агровиробництва в умовах сучасних викликів сільського господарства України.

Методи досліджень: включали лабораторну оцінку насіннєвого матеріалу (схожість, енергія проростання), польові спостереження за розвитком редьки олійної після посіву агродронами MC A22 та XAG P100 Pro за двох технологічних підходів (гербіцидного та безгербіцидного), а також облік рівномірності розподілу насіння, польової схожості, густоти стояння, морфометричних показників і нарощування зеленої маси. Для контролю просторової однорідності використовували NDVI-картування (Sentinel-2) та RTK GNSS-вимірювання. Забур'яненість оцінювали методом проєктивного покриття. Аналітичні та статистичні методи застосовували для обробки результатів, визначення достовірності різниць між варіантами та

встановлення впливу норм висіву й технологій підготовки площі на ефективність посіву сидеральної культури.

Перелік публікацій автора за темою досліджень:

1. Zhuravel, S., Kravchuk, M., Zhuravel, S., Razumna, K., & Kyianichenko, M. (2025). Development of a drone-based sowing technology for oilseed radish as a green manure crop. Scientific Horizons, 28(11), 58-66. doi: 10.48077/ scihor11.2025.58.

Структура та обсяг кваліфікаційної роботи. Робота викладена на 37 сторінках комп'ютерного набору, містить 4 таблиці, 6 рисунків, складається зі вступу, 3 розділів, висновків, рекомендацій виробництву. Список використаних джерел включає 34 найменувань.

При написанні даної дипломної роботи ми використовували Положення про кваліфікаційні роботи у Житомирському національному агроекологічному університеті.

РОЗДІЛ І. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

У сучасному сільському господарстві точне землеробство розглядається як інтегрована система управління технологічними процесами, що базується на використанні GPS/GNSS-навігації, геоінформаційних систем, дистанційного зондування та сенсорних технологій для просторово диференційованого обробітку полів. Такий підхід дозволяє оптимізувати внесення добрив і засобів захисту рослин, регулювати норми висіву, адаптувати технології до неоднорідності ґрунтового покриву та стану посівів, зменшуючи витрати ресурсів і екологічне навантаження на агроекосистеми [1, 4, 5]. У працях українських та зарубіжних дослідників підкреслюється, що розвиток точного землеробства є ключовою передумовою підвищення конкурентоспроможності аграрного сектору та забезпечення продовольчої безпеки в умовах кліматичних змін і зростання вартості ресурсів [1, 2, 28]. До впровадження супутникових технологій у сільськогосподарській авіації широко застосовувалися візуальні орієнтири та радіозв’язок, що зумовлювало значні перекриття й пропуски при внесенні добрив та пестицидів. Поява GPS-навігації та методів диференційної корекції, здатних забезпечити точність до сантиметрового рівня, стала важливим пріоритетом у становленні точного землеробства і створила базу для інтеграції безпілотних літальних апаратів у технологічні процеси [1, 4].

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) та агродрони зайняли особливе місце в цій системі як універсальний інструмент для моніторингу посівів, картографування агрофону, дистанційного зондування та виконання окремих польових операцій. Встановлено, що використання агродронів забезпечує високу точність просторового позиціонування, зниження перекриттів, кращий контроль норм внесення засобів захисту рослин та мікродобрив, а також здатність працювати в умовах, де використання традиційної наземної техніки утруднене або економічно недоцільне [2, 3, 5, 6, 7]. Дослідження засвідчують, що застосування БПЛА дає змогу скоротити витрати хімічних засобів завдяки точному дозуванню, поліпшити якість обробки полів і

підвищити продуктивність праці, що особливо важливо для великих господарств та агрохолдингів [2, 5, 7].

Світовий ринок агродронів демонструє стійку тенденцію до зростання, що пов’язано як із технічним удосконаленням платформ, так і зі зниженням вартості обладнання та програмного забезпечення [5, 7, 9]. Китайські, європейські та північноамериканські виробники пропонують широкий спектр рішень для моніторингу, обприскування, внесення добрив і гранульованих матеріалів, інтегрованих із системами точного землеробства та хмарними платформами аналізу даних [5, 7, 9]. У той же час у багатьох країнах, зокрема й в Україні, формуються національні виробники та сервісні компанії, що адаптують агродрони до локальних умов та потреб аграріїв [2, 30]. Вітчизняний досвід свідчить, що в умовах воєнних дій, обмеженого доступу до окремих територій і дефіциту трудових ресурсів агродрони стають важливим інструментом підтримки технологічних процесів у рослинництві, дозволяючи виконувати операції в зонах, де використання важкої техніки є ризикованим або неможливим [2, 3, 30].

Окремим напрямом еволюції БПЛА стало розширення сфер їх застосування від моніторингу та обприскування до посіву насіння покривних і сидеральних культур. Низка наукових робіт відзначає, що сучасні агродрони здатні виконувати функції розкидання насіння з урахуванням заданих норм, ширини захвату та схеми прольоту, що відкриває нові можливості для оперативного посіву покривних культур на великих площах, у міжряддях та на важкодоступних ділянках [8, 11, 12]. У наукових працях розроблено підходи до конструювання мультифункціональних БПЛА, оснащених змінними модулями для внесення рідких і твердих матеріалів, включно з насінням дрібнонасінних культур, таких як гірчиця, редька олійна та інші сидерати [8, 11].

Водночас наукові публікації акцентують увагу на тому, що рівномірність розподілу насіння при посіві дронами залишається однією з найбільш проблемних ланок технології. Встановлено, що на рівномірність

посіву істотно впливають конструкція висівного апарата (дисковий, шнековий, відцентровий тип), висота польоту, швидкість руху дрона, а також аеродинамічні характеристики повітряних потоків, які формуються під час польоту [9, 10, 14]. При роботі з дрібним і легким насінням, що характеризується малою масою 1000 насінин, зростає ризик його знесення вітром, утворення зон надлишкового та недостатнього висіву, що проявляється у «плямистій» структурі посівів [9, 10]. Для об'єктивної оцінки якості розподілу матеріалу застосовують стандартизовані процедури, зокрема ASABE S341, які передбачають використання лотків-уловлювачів, розміщених у поперечному напрямку до траєкторії польоту дрона, а також проведення статистичного аналізу варіації норми внесення [9, 10].

Практичні польові дослідження посіву покривних культур за допомогою БПЛА у США та Європі показують, що ефективність цієї технології значною мірою залежить від погодних умов і вологості ґрунту в післяпосівний період. За достатнього зволоження й наявності опадів після посіву дронами можливо досягти густоти сходів, близької до традиційних сівалок, проте нерівномірність розміщення рослин у просторі, як правило, залишається вищою через відсутність загортання насіння у ґрунт [12, 13]. Особливо критичною є ситуація у разі тривалих періодів без опадів, коли насіння, розташоване на поверхні, зазнає дії коливань температури та висихання поверхневого шару ґрунту, що призводить до зріджених сходів і зниження сидеральної продуктивності [12, 13]. У відповідь на ці виклики пропонується оптимізувати висоту та швидкість польоту, використовувати комбіновані схеми прольоту, а також адаптувати норми висіву до конкретних ґрунтово-кліматичних умов [9, 12].

Паралельно розвивається напрям використання БПЛА для післяпосівного моніторингу густоти посівів. У сучасних наукових роботах описано підходи до оцінювання густоти рослин і просторової неоднорідності посівів за допомогою RGB- та мультиспектральних зображень, отриманих з дронів, з подальшим застосуванням алгоритмів глибинного навчання для

автоматизованого підрахунку рослин і виявлення зон із недостатньою чи надлишковою густотою [13]. Такий підхід дозволяє замкнути технологічний цикл: від посіву дронами до цифрового контролю результатів і коригування технологічних параметрів у наступні сезони.

У контексті сидерального землеробства значну увагу науковців привертає така сільськогосподарська культура як редька олійна (Raphanus sativus var. oleiferus), яка вже тривалий час використовується як високопродуктивна сидеральна та покривна культура. За даними монографічних і експериментальних досліджень, редька олійна характеризується швидким наростанням зеленої маси, добре розвиненою кореневою системою, здатною розпушувати ущільнені горизонти, покращувати водно-фізичні властивості ґрунту й сприяти формуванню агрегатної структури [15, 16, 17, 18]. Крім того, її біомаса є важливим джерелом органічної речовини, що особливо актуально в умовах дефіциту гною й інших органічних добрив [18, 21]. Ряд авторів зазначають, що вирощування редьки олійної у складі покривних сумішей або як монокультури може сприяти мобілізації фосфору, поліпшенню забезпеченості ґрунту іншими елементами живлення, а також реалізації фітосанітарних ефектів – зниженню ураженості наступних культур окремими хворобами та шкідниками [17, 20, 22].

У той же час результати використання редьки олійної як сидерату є суттєво варіабельними й залежать від ґрунтово-кліматичних умов, агротехніки, строків і норм висіву, тривалості вегетації та способу заробки зеленої маси в ґрунт [18, 20, 23]. У деяких дослідженнях показано, що очікуваний позитивний вплив на окремі компоненти біоти ґрунту, зокрема глибокохідних дощових червів, може бути обмеженим, якщо сидеральна система не поєднується з іншими елементами екологізації землеробства [16, 23], що в свою чергу підкреслює необхідність локальних досліджень, орієнтованих на конкретні ґрунтово-кліматичні умови та системи землеробства.

У системах сталого та органічного землеробства сидерати розглядаються як ключовий елемент підтримки родючості ґрунтів, регулювання балансу органічної речовини та біологічної активності, а також як інструмент обмеження забур'яненості та ерозійних процесів [17, 23, 28]. Доведено, що покривні культури здатні зменшувати кількість бур'янів і, відповідно, потребу в застосуванні гербіцидів, особливо в перехідних системах, де інтегруються органічні та традиційні підходи [17, 23, 25]. У той же час наголошується на необхідності врахування залишкової дії пестицидів, зокрема гліфосату, в ґрунті. Експериментальні дані свідчать, що навіть після формального завершення «періоду безпеки» залишкові концентрації гліфосату можуть впливати на проростання та ранній розвиток культур, висіяних після обробки, що вимагає більш обережного планування сівозмін і строків висіву сидератів [24].

У вітчизняних дослідженнях, присвячених редьки олійній, основну увагу приділяють вивченню сортових особливостей, формуванню продуктивності, сидеральної маси та впливу культури на родючість ґрунтів у різних природно-кліматичних зонах, зокрема в умовах Лісостепу та Полісся [18, 26, 27]. Відмічено, що за правильного добору норм висіву та строків посіву редька олійна забезпечує значну сидеральну продуктивність і позитивно впливає на агрофізичні та агрохімічні показники ґрунту, зокрема на вміст гумусу, рухомих форм фосфору та калію, показники структурного стану. Окремі наукові роботи фокусуються на моделюванні технологічних схем вирощування редьки олійної із застосуванням сучасних технічних засобів, включно з можливістю посіву за допомогою агродронів [26], що створює теоретичне підґрунтя для подальшого вдосконалення відповідних технологій у виробничих умовах.

Окремого значення набувають питання якості насіння, від якої залежать результати як традиційного, так і посіву за допомогою дрону. Згідно з ДСТУ 4138-2002, основними показниками посівних якостей є енергія проростання, лабораторна схожість, маса 1000 насінин та інші

параметри, що визначають стартовий розвиток рослин у польових умовах [31]. Забезпечення високої якості насіннєвого матеріалу є необхідною умовою інтерпретації результатів польових дослідів, спрямованих на оцінку впливу технологічних факторів, зокрема способу посіву й параметрів роботи агродрона.

Аналіз літературних джерел дозволяє зробити висновок, що технологія посіву сидеральних культур за допомогою агродронів має значний потенціал для підвищення оперативності та ресурсоефективності землеробства, однак низка ключових аспектів залишається недостатньо вивченою. Насамперед це стосується рівномірності розподілу дрібного насіння, адаптації висівних систем до конкретних культур і умов, оптимізації висоти польоту та швидкості руху дрона, а також інтеграції посіву й подальшого моніторингу посівів на основі даних БПЛА [8, 9, 10, 13]. Для редьки олійної, яка має доведений високий сидеральний потенціал, практично відсутні системні дослідження з оцінювання ефективності посіву агродронами в умовах Полісся України з урахуванням специфіки клімату, ґрунтових умов та сучасних викликів воєнного часу. Це зумовлює актуальність та наукову новизну досліджень, спрямованих на оцінку ефективності використання агродронів для посіву редьки олійної як сидеральної культури в умовах навчально-дослідного поля Поліського національного університету.

РОЗДІЛ ІІ. УМОВИ, ОБ'ЄКТИ І МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Місце та умови проведення досліджень

Дослідження з оцінки ефективності посіву редьки олійної агродроном проведено на навчально-дослідному полі Поліського національного університету, розташованому поблизу с. Велика Горбаша Черняхівської селищної територіальної громади Житомирського району Житомирської області (географічні координати: 28°41'33" сх. д., 50°26'24" пн. ш.). Територія належить до зони Полісся України, для якої характерні помірно континентальний клімат, відносно достатнє зволоження та переважання дерново-підзолистих і сірих лісових ґрунтів, що зумовлює підвищену чутливість агроекосистем до порушення водно-фізичного стану ґрунту та дефіциту органічної речовини.

Ґрунтовий покрив представлений ясно-сірими лісовими ґрунтами з низьким вмістом гумусу (1,1-1,2 %), зниженим рівнем забезпеченості основними елементами живлення та підвищеною кислотністю (pH 5,7). Бал бонітету становить 28, що свідчить про обмежену природну родючість і робить дослідну ділянку показовою для оцінки ефективності сидеральних культур у малородючих умовах. Узагальнена ґрунтово-агрохімічна характеристика профілю наведена на рис. 1.

Для редьки олійної як сидеральної культури важливими є характеристики верхнього шару ґрунту, оскільки насіння за поверхневого висіву не загортається, а тому проростання залежить від вологості, структурності та водно-повітряного режиму ґрунту. З огляду на це перед закладкою досліду було проведене ґрунтове обстеження із відбором зразків з глибин 0–10, 10–20 та 20–30 см. Аналіз включав визначення pH, умісту гумусу, концентрації рухомих форм N, P, K, а також оцінку гранулометричного складу й об’ємної маси ґрунту. Ці параметри є вирішальними для встановлення вихідного агрофону, який може впливати на

проростання та початковий розвиток редьки олійної. Особливої уваги надавалося кислотності ґрунту, оскільки редька олійна здатна рости на слабокислих ґрунтах, але надмірне підкислення може знижувати доступність фосфору й уповільнювати формування кореневої системи.

$He_{орн.}$ 0–22 22	Гумусно-елювіальний горизонт, світло-сірий, супіщаний,порохувато-грудочкуватий, слабоущільнений, вологий, новоутворення відсутні, наявні корені рослин, перехід за глибиною обробіткухвилястий.
НЕ 22–38 16	Світло-сірий, супіщаний, грудочкуватий, щільний, злитний, вологий, збагачений затьоками гумусового матеріалу по кореневих ходах і червоточинах, наявні корені рослин, перехід поступовий.
I 38–59 21	Темно-бурий з численними темно-сірими затьоками гумусового матеріалу по червоточинах і кореневих ходах, важкий суглинок, горіхувато-дрібногрудочкуватий, щільний, вологий, наявні корені рослин, перехід поступовий.
Р і 59–86 27	Жовтувато-бурий з темно-сірими затьоками гумусового матеріалу по червоточинах і кореневих ходах, легкий суглинок, грудочкуватий, ущільнений, вологий, рідко зустрічаються корені рослин, з середини іржаві плями, перехід поступовий.
P_1 86–104 18	Жовтувато-палевий, легкий суглинок, слабо виражена грудочкуватість, слабоущільнений, злитний, вологий, розмиті іржаві плями, перехід добре помітний.
P_2 104–151 47	Палево-жовтий з сизим відтінком та іржавими плямами, оглеєний, середній суглинок, грубогрудочкуватий, ущільнений, вологий, перехід помітний по кольору.
P_3 *151–170* *19*	Темно-сірий з концентрованими великими іржавими плямами, важкий суглинок, призмовидно-горіхуватий, щільний, злитний, вологий, концентровані іржаві плями, включення відсутні.

Рис. 1. Ґрунтово-агрохімічна характеристика профілю ґрунту навчально-дослідного поля Поліського національного університету

Результати агрохімічного аналізу підтвердили низьку забезпеченість ґрунту основними елементами живлення та високу неоднорідність верхнього шару щодо структурності, що є суттєвим фактором у разі поверхневого висіву дроновими технологіями. Саме тому дані про ґрунтові умови розглядалися як ключові для подальшої інтерпретації польових результатів,

адже успіх сходів редьки олійної в умовах поверхневого висіву залежить від наявності вологи у верхньому шарі, мікрорельєфу та грудкуватості ґрунту.

Дослідна ділянка, на якій проводили посів, мала розміри 66 × 52,2 м і була поділена на три повторності відповідно до схеми дослідження (рис. 2), де кожна повторність формувала окремий ярус без рендомізації варіантів. Такий підхід був обумовлений особливостями роботи агродрона, оскільки забезпечував стабільну траєкторію польоту, уніфіковану ширину захвату та контрольовані параметри подачі насіння у шнековому висівному апараті. Відсутність рендомізації не впливала на об'єктивність результатів завдяки попередній перевірці однорідності ґрунтових властивостей по всій площі дослідного поля.

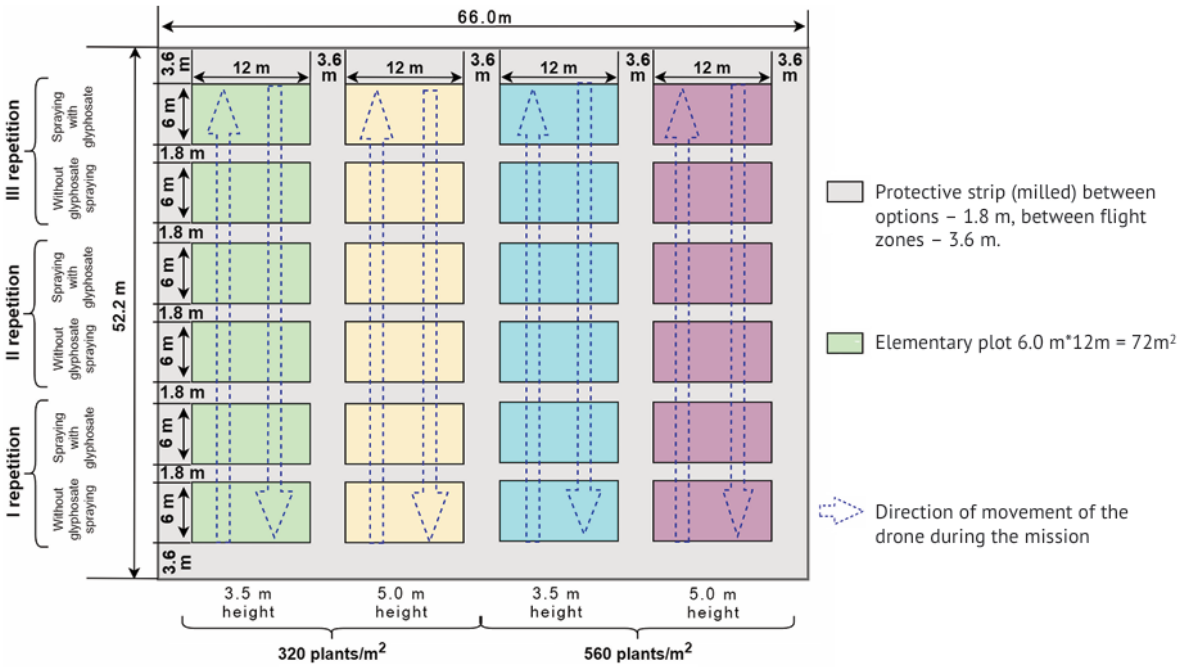

Рис. 2. Схема модельного досліду посіву редьки олійної в якості сидеральної культури

Різні варіанти у нашому досліді різнилися нормами висіву редьки олійної, які були визначені з урахуванням особливостей поверхневого розподілу насіння агродроном та результатів попередніх досліджень, що вказують на необхідність суттєвого збільшення кількості насіння порівняно з традиційним способом сівби. За умов класичної технології посіву редьки олійної оптимальна густота стояння розраховується як кількість рослин на

метрі квадратному, що забезпечує формування рівномірного рослинного покриву та належної сидеральної біомаси. Для редьки олійної при класичному способі посіву – даний показник становить у середньому 80 рослин/м². Однак під час поверхневого посіву без загортання значна частина насіння не потрапляє у зволожений мікрошар ґрунту та піддається впливу вітру, мікрорельєфу й інших зовнішніх чинників, що збільшує ризики втрати польової схожості.

З огляду на це у нашому досліді було застосовано дві підвищені норми висіву, які дозволяють компенсувати очікуване зменшення схожості: перша норма передбачала збільшення висіву у чотири рази від рекомендованої (320 рослин/м²), а друга — у сім разів (560 рослин/м²). Такі показники були вибрані з урахуванням специфіки роботи шнекового висівного механізму агродрона, який забезпечує рівномірний, але поверхневий розподіл насіння без механічного загортання.

Обрана схема досліду дала можливість оцінити вплив різної густоти стояння на рівномірність просторового розміщення насіння, особливості формування польових сходів, інтенсивність початкового росту та характер нарощування сидеральної маси. Порівняння морфометричних показників рослин за різних норм висіву дозволило встановити, як зміна густоти агроценозу впливає на конкурентоспроможність редьки олійної, швидкість укорінення та формування якісної біомаси в умовах поверхневого висіву агродроном.

2.2. Об’єкти і методика проведення досліджень

Об’єктом дослідження виступала редька олійна сорту Райдуга, оригінатором якої є Інститут рослинництва ім. В. Я. Юр’єва НААН України. Це однорічна холодостійка культура, яку широко використовують як сидерат, кормову та медоносну рослину. Сорт характеризується високою інтенсивністю нарощування зеленої маси, здатністю формувати потужну стрижневу кореневу систему та ефективно розпушувати ґрунт навіть на важких

глинистих ділянках. Рослини сорту Райдуга можуть досягати 1,2–2,0 м заввишки, добре ростуть на різних типах ґрунтів, зокрема на малородючих та ущільнених, стійкі до знижених температур, але чутливі до дефіциту вологи. Насіння містить 40-46% олії, багатої на омега-3 жирні кислоти, вітамін Е та антиоксиданти, що підвищує його господарську цінність. За традиційної технології нормою висіву є 16-22 кг/га, однак у дослідженнях з поверхневим висівом агродроном виникла необхідність застосування підвищених норм для компенсації втрат, пов’язаних із відсутністю загортання насіння.

Методика проведення досліджень була організована у кілька етапів. На підготовчому етапі проводили лабораторну оцінку насіннєвого матеріалу, визначаючи енергію проростання та схожість, що дозволяло встановити початковий біологічний потенціал сорту за умов поверхневого висіву насіння редьки олійної сорту Райдуга (рис. 3).

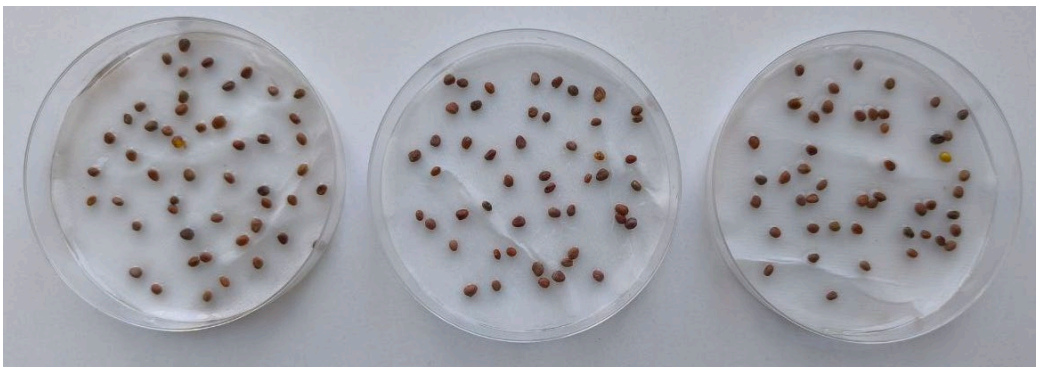

Рис. 3. Лабораторна оцінка посівних якостей насіння редьки олійної для коригування норми висіву

Також нами було здійснено вибір і розмітку дослідної ділянки відповідно до схеми експерименту та проведено попереднє камеральне опрацювання наявної інформації щодо ґрунтових умов, щоб сформувати оптимальні технологічні варіанти (рис. 4). На цьому ж етапі визначали норми висіву, що застосовувалися у досліді, які були суттєво збільшені порівняно з рекомендованими. Підвищені норми пояснювалися специфікою шнекового висівного механізму агродрона, нерівномірністю мікрорельєфу та впливом вітру, які знижують ефективність поверхневого розміщення насіння.

Рис. 4. Вибір та розмітка дослідної ділянки згідно зі схемою експерименту під посів редьки олійної агродроном

Основний етап досліджень охоплював апробацію двох технологічних підходів до підготовки площі — з використанням гербіциду гліфосатної дії та без хімічної обробки. У гербіцидному варіанті обприскування здійснювали дроном MC A22 за норми внесення препарату 2 л/га і робочої норми виливу 7,5 л/га. Висоту польоту встановлювали на рівні 4 м, швидкість – 8 м/с, за швидкості вітру 2 м/с та напрямку А338°, що забезпечувало оптимальну якість покриття поверхні. Посів редьки олійної проводили агродроном XAG P100 Pro у триразовій повторності при двох експериментальних нормах висіву — 320 рослин/м² (62 кг/га) та 560 рослин/м² (76 кг/га) (рис. 5). Перед проведенням польових робіт здійснювали калібрування висівного апарату для забезпечення максимально можливої рівномірності подачі насіння. Сівбу проводили за сприятливих метеорологічних умов, коли температура повітря становила +22,6 °C, відносна вологість — 60%, а швидкість вітру — 1,1 м/с, що мінімізувало ризики зносу насіння повітряними потоками та забезпечувало кращу осадку на поверхню ґрунту.

Рис. 5. Посів редьки олійної за допомогою дрона XAG P100pro

З метою об’єктивної просторової оцінки умов дослідження було проведено NDVI-картування всієї площі на основі супутникових знімків Sentinel-2 з подальшою обробкою у середовищі ArcGIS Pro (ESRI). Це дало змогу підтвердити відносну агроекологічну однорідність ділянки та встановити можливість використання її як експериментального майданчика для каліброваних польових досліджень. Для синхронізації просторових даних з польовими спостереженнями проводили фіксацію контрольних точок за допомогою RTK GNSS-приймача Hi-Target V30Plus, що забезпечувало високу точність прив’язки результатів до реальних координат (рис. 6).

Рис. 6. Фіксація наземних контрольних точок (GCP) за допомогою RTK GNSS-приймача Hi-Target V30Plus

Польові спостереження охоплювали весь цикл початкового розвитку редьки олійної та включали фенофазний моніторинг початкової польової схожості, густоти стояння, динаміки розвитку у фазах сім’ядоль, першої та другої пари листків, формування 3–4 листків, бутонізації та нарощування зеленої маси. Додатково фіксували ступінь забур’яненості, виявляли шкідників і відзначали інші біотичні та абіотичні чинники, які могли впливати на розвиток культури. На заключному етапі здійснювали математично-статистичну обробку отриманих даних, порівнювали вплив різних норм висіву та технологій підготовки площі, а також формували науково обґрунтовані висновки щодо ефективності застосування агродронів для посіву редьки олійної сорту Райдуга як сидеральної культури.

РОЗДІЛ ІІІ. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Аналіз посівних властивостей насіння редьки олійної за результатами лабораторних досліджень

Одним із ключових аспектів ефективності технології поверхневого посіву сидеральних культур за допомогою агродронів є високі посівні властивості насіння. Саме фізіологічний потенціал насіння визначає здатність культури формувати рівномірні та життєздатні сходи в умовах, де рослини зазнають впливу підвищеної варіабельності зовнішніх чинників. На відміну від традиційної сівби з загортанням у ґрунт, поверхневе розміщення насіння не забезпечує стабільного мікроклімату та посилює дію абіотичних і біотичних факторів — перепадів температури, коливань вологості, впливу вітру та потенційного пошкодження біотою. У зв’язку з цим визначення якісних показників насіння є необхідною передумовою для подальшої інтерпретації польових результатів і оцінки того, наскільки культура здатна адаптуватися до нових технологічних умов.

У підготовчій фазі наших досліджень було проведено лабораторний аналіз посівних якостей насіння редьки олійної сорту Райдуга, який відіграє вирішальну роль у відпрацюванні технології посіву з використанням агродрону. На відміну від механічних сівалок, що забезпечують занурення насіння у ґрунт і захищають його від зовнішніх впливів, технологія БПЛА передбачає висів на поверхню, де насіння одразу взаємодіє з природними факторами середовища. За таких умов швидкість активації проростання, енергія проростання та загальна життєздатність насіння стають критично важливими характеристиками, оскільки саме вони визначають успішність початкового етапу формування рослинного покриву. Лабораторна оцінка схожості та енергії проростання дозволила об’єктивно оцінити якість насіннєвого матеріалу та стала науково обґрунтованою основою для переходу до польових досліджень.

Проведений лабораторний експеримент (n = 3) показав, що насіння редьки олійної сорту Райдуга характеризується високими біологічними та фізіологічними показниками (табл. 1). Середнє значення енергії проростання становило 94,0%, а лабораторна схожість — 99,0%. Отримані дані істотно перевищують мінімальні стандартні вимоги для сидеральних культур (не менше 85% схожості), що свідчить про високу життєздатність зародків і рівномірність потенційного формування сходів. Висока енергія проростання є ознакою швидкої гідратації насіння, активізації ферментативних процесів та інтенсивного росту проростка — критично важливих механізмів за умови поверхневого розміщення насіння, коли швидкість проростання визначає шанси молодої рослини уникнути висихання або механічного зміщення.

Таблиця 1

Насіннєві кондиції насіння редьки олійної сорту Райдуга за результатами лабораторного досліду (n=3)

Культура	Енергія проростання, %				Схожість, %			
	I	II	III	Середнє	I	II	III	Середнє
Radish oil (редька олійна, сорт Райдуга)	94	96	92	**94,0**	98	100	98	**99,0**

Отримані лабораторні результати дозволили уникнути коригування норми висіву за показниками якості насіння, що є обґрунтованим рішенням для даного експерименту. Такий підхід забезпечив можливість аналізувати вплив виключно технологічних факторів — висоти польоту дрона, кратності проходів та норми висіву — без накладення ефекту біологічних втрат посівного матеріалу. Таким чином, лабораторна фаза стала базовою для подальшої інтерпретації польових даних, оскільки висока якість насіння гарантувала, що відмінності в польових сходах будуть зумовлені саме умовами та способом посіву.

Наступним етапом наших досліджень стало визначення рівномірності розподілу насіння на поверхні дослідної ділянки, оскільки цей показник є одним із ключових чинників формування конкурентоспроможного агрофітоценозу сидеральної культури. У досліді аналізували просторовий розподіл насіння після висіву дронами за різної висоти польоту (3 та 5 м) і норм висіву. Розподіл насіння оцінювали на контрольних квадратах площею 1 м² за кількістю насінин, що дозволяло визначити коефіцієнт варіації та встановити ступінь стабільності роботи висівного механізму. Цей підхід дав змогу поєднати результати лабораторного аналізу насіння з технологічною точністю висіву, що є необхідним при створенні науково обґрунтованої моделі ефективності дронових технологій у сидеральному землеробстві.

Таким чином, отримані лабораторні показники підтверджують високу придатність сорту Райдуга до використання в технології поверхневого посіву агродроном. Висока життєздатність та енергія проростання зумовлюють надійну стартову динаміку культури, що забезпечує коректність подальших польових спостережень і формує підґрунтя для об’єктивної оцінки технологічних параметрів застосування БПЛА для висіву сидеральних культур.

3.2. Вплив висоти польоту та норми висіву на рівномірність розподілу насіння редьки олійної

Оцінювання рівномірності розподілу насіння на поверхні поля є одним із ключових етапів дослідження технології поверхневого посіву агродронами, оскільки саме цей параметр визначає формування однорідного агрофітоценозу та подальшу продуктивність сидеральної культури. У випадку культур із малою масою насіння, зокрема редьки олійної, точність висіву істотно залежить від аеродинамічних умов у зоні руху дрона і чутливо реагує навіть на незначні повітряні потоки. Тому аналіз варіативності фактичної густоти та закономірностей зміщення насіння в межах посівної

смуги є необхідним для вдосконалення технології посіву з використанням БПЛА та оптимізації агротехнічних параметрів.

Отримані нами результати польових досліджень (табл. 2) засвідчили виражену нерівномірність просторового розподілу насіння редьки олійної при посіві агродроном, що проявлялося як у внутрішній варіації густоти в межах одного технологічного проходу, так і у суттєвому знесенні насіння за межі облікових ділянок. Виявлене бічне зміщення насіння відбувалося у напрямку руху дрона та відповідало напрямку мікропотоків повітря, що формуються в зоні дії пропелерів. Таке явище характерне для поверхневого розсіювання дрібного насіння та посилюється за умов недостатнього загортання ґрунтом.

Таблиця 2

. **Розподіл насіння редьки олійної по ділянці залежно від траєкторії руху дрона (середнє), 2025 р.**

Культура	Проективна густота, рослин/м^2	Висота висіву насіння, м	Відстань від умовної лінії проходу дрона, м			Середньо-зважений показник висіяного насіння, шт/м^2	% від заплано-ваної норми
			0	1,5	3		
			Кількість насінин, шт/м^2				
Редька олійна	320	3	304	404	142	283	88,5
		5	316	352	168	279	87,1
	560	3	522	680	118	440	78,6
		5	557	554	262	458	81,7

Просторовий аналіз розподілу насіння показав, що за висоти польоту 3 м та заданої норми 320 рослин/м² фактична кількість висіяного насіння становила 283 шт/м² (88,5 % від теоретичної норми). Зі збільшенням висоти польоту до 5 м точність висіву помітно знижувалась — середній показник густоти зменшився до 279 шт/м² (87,1 %), що свідчить про збільшення амплітуди горизонтального переносу насіння. Аналогічна закономірність спостерігалася і за підвищеної норми висіву 560 рослин/м²: фактичні

значення становили 440–458 шт/м² (78,6–81,7 %), що вказує на істотні втрати точності та значне відхилення від заданої густоти.

Такі відхилення зумовлені аеродинамічними властивостями насіння редьки олійної, оскільки маса 1000 насінин значно нижча, ніж у зернових чи бобових культур, що робить його надзвичайно чутливим до руху повітря у зоні польоту дрона. Додатковий вплив мають вихрові структури, які формуються позаду апарата під час руху та здатні спричиняти нерівномірність розподілу та формування асиметричних зон розсіювання.

Отримані результати підтверджують, що при посіві культур із легким та дрібним насінням виникає ризик формування ділянок із надмірним згущенням або, навпаки, недостатньою кількістю рослин, що негативно впливає на рівномірність майбутнього агрофітоценозу. Виявлена асиметрія висіву узгоджується з гіпотезою про закономірний бічний перенос легкого насіння під впливом аеродинамічних факторів і дозволяє визначити напрями технологічної оптимізації.

На основі проведеного аналізу можна стверджувати, що для підвищення просторової рівномірності посіву перспективним є застосування перехресного посіву (cross-seeding), коли дрон здійснює два перпендикулярні проходи з половинною нормою висіву. Такий підхід здатний компенсувати асиметрію руху повітряних потоків, вирівняти густоту рослин у межах ділянки та забезпечити рівномірне формування біомаси. Для сидеральних культур рівномірність рослинного покриву має особливе значення, оскільки визначає ефективність фітосанітарного впливу, здатність до пригнічення бур’янів та рівномірність розкладання зеленої маси.

Таким чином, результати польових досліджень свідчать про необхідність адаптації алгоритмів польоту та конструктивних параметрів висівних систем дронів з урахуванням маси та морфології насіння. Такий підхід стане підґрунтям для підвищення точності висіву та формування стабільних посівів редьки олійної як сидеральної культури в умовах ресурсозберігаючих технологій.

3.3. Результати густоти та виживабельності рослин редьки олійної у системі сидерального землеробства з використанням агродронів

Оцінювання динаміки росту й виживабельності рослин редьки олійної після висіву агродроном є ключовим елементом нашого дослідження, оскільки саме на етапі формування сходів закладається фундамент майбутньої сидеральної продуктивності культури. На відміну від традиційної сівби, де насіння загортається в оптимальний агроландшафт, поверхневий посів створює для проростків значно жорсткіші умови. Тому фактична густота стояння, варіація розподілу рослин та ступінь їх виживабельності виступають інтегральними показниками того, наскільки ефективно культура здатна адаптуватися до технологічних параметрів посіву (висоти польоту, норми висіву) та стану ґрунтової поверхні. Саме аналіз цих параметрів дозволяє оцінити реальний потенціал редьки олійної як сидеральної культури в умовах інноваційної технології поверхневого висіву за допомогою дрона.

Польові спостереження протягом ранніх фаз органогенезу редьки олійної дали змогу встановити, як технологія підготовки ґрунту, норма висіву та висота польоту дрона визначають фактичну густоту стояння та виживабельність рослин після сходів. Аналіз отриманих даних (табл. 3) засвідчив значну диференціацію густоти в межах варіантів, що були очікуваними з огляду на поверхневий характер висіву та високочутливість дрібного насіння редьки олійної до мікроагломеративних умов.

Найвищі показники збереженості сходів спостерігалися у варіантах із попереднім застосуванням гліфосату за норми висіву 320 рослин/м². Гербіцидна підготовка створила менш конкурентне середовище у верхньому шарі ґрунту, що дозволило проросткам швидше укорінюватися та ефективніше використовувати доступні ресурси. За висоти польоту 5 м було сформовано 42,9 рослин/м² (13,4 % від висіяного насіння), тоді як при висоті 3 м цей показник становив 37,7 рослин/м² (11,8 %). Різниця між варіантами свідчить про вплив висоти польоту на структуру посівної смуги: більша

висота зменшує локальне травмування насіння турбулентними потоками та знижує ризик мікропошкоджень зародка.

Таблиця 3

Вплив технології, норми висіву та висоти посіву з дрона на залишкову кількість рослин редьки олійної, шт/м²

Варіант (технологія вирощування)	Проєктивна густота, рослин/м²	Висота висіву насіння, м	Середнє по повторенням, шт/м²			Середнє по варіанту	Коефіцієнт варіації, %	Виживабельність рослин на 1 м², %
			0	1,5	3			
Без гліфосату	320	3	30	33	49	37,15±9,79	26,34	11,61
		5	28	32	31	30,21±10,27	34,01	9,44
	560	3	10	11	15	12,15±8,3	68,30	2,17
		5	17	12	17	15,16±5,05	33,32	2,71
Обробка гліфосатом	320	3	35	36	42	37,73±6,85	18,14	11,79
		5	40	42	46	42,94±14,94	34,79	13,42
	560	3	39	53	56	49,42±10,98	22,21	8,83
		5	36	30	35	33,8±7,88	23,33	6,04

Безгербіцидні варіанти за аналогічної норми висіву демонстрували нижчу виживабельність (9,4–11,6 %), що підтверджує суттєвий конкурентний тиск бур’янів у стартовий період. Механізм цього ефекту полягає не лише у ресурсній конкуренції (волога, світло, поживні речовини), але й у стратегічному пригніченні проростків алелопатичними виділеннями бур’янової рослинності, що особливо актуально за умов перелогу.

Суттєво нижчі показники виживабельності (2,2–9,4 %) були зафіксовані у варіантах з нормою висіву 560 рослин/м². Надмірна концентрація насіння у поєднанні з поверхневим висівом призводила до суттєвого зростання внутрішньовидової конкуренції вже на ранніх етапах розвитку. Крім того, високий коефіцієнт варіації (до 68,3 %) свідчить про різко нерівномірний розподіл насіння на поверхні ґрунту, що зумовлює формування компактних агрегацій проростків і швидке їх випадання через нестачу вологи та обмежену фіксацію коренів.

Аналіз загальної структури густоти дозволяє стверджувати, що найстабільніші та найбільш продуктивні посіви формувалися в комбінації

гербіцидної підготовки ґрунту та норми 320 рослин/м². Цей варіант характеризувався найнижчою внутрішньосмуговою варіабельністю, оптимальним співвідношенням густоти й ресурсного забезпечення проростків та передбачуваною поведінкою популяції впродовж вегетації.

З огляду на сидеральне призначення культури, саме цей варіант забезпечив найкращі передумови для формування однорідного рослинного покриву, що є критичним для: рівномірного нарощування зеленої маси; ефективного пригнічення бур'янових угруповань; покращення структури та аерації ґрунту; стабільності фітосанітарного ефекту. Отже, результати наших досліджень свідчать, що оптимізація густоти стояння редьки олійної у технології поверхневого висіву дронами неможлива без урахування взаємодії між нормою висіву, конкурентністю середовища та аеродинамічними характеристиками робочої зони БПЛА.

3.4. Економічна ефективність і технологічні переваги використання агродронів у вирощуванні редьки олійної як сидеральної культури

Сучасні виклики аграрного виробництва, пов'язані з дефіцитом трудових ресурсів, зростанням вартості пального та потребою мінімізувати негативний вплив на ґрунтове середовище, зумовлюють активний пошук технологій, здатних забезпечити високу точність і раціональність агротехнічних операцій. У зоні Житомирського Полісся, де ґрунти характеризуються низьким рівнем гумусу, підвищеною кислотністю та неоднорідною структурою, застосування традиційної важкої техніки спричиняє ризики додаткового ущільнення, що може зменшувати ефективність сидеральних культур і погіршувати водно-повітряний режим ґрунту. Саме тому використання агродронів для передпосівної обробки та поверхневого посіву дрібнонасінних культур, таких як редька олійна, набуває особливої актуальності.

Редька олійна як сидерат демонструє високу адаптивність до різних типів ґрунтів, швидко нарощує зелену масу, покращує структурність ґрунту й сприяє контролю бур'янової рослинності. Проте ефективність її вирощування залежить від рівномірності розподілу насіння та своєчасного виконання технологічних операцій, що традиційні способи посіву не завжди здатні забезпечити з огляду на мобільність техніки та погодні обмеження. Агродрони натомість дозволяють виконувати операції оперативно, з високою точністю та мінімальним механічним впливом на ґрунт, що є стратегічно важливим для збереження агрофізичних властивостей Полісся.

Економічний аналіз засвідчив значну перевагу технології з використанням агродронів порівняно з традиційними методами (табл. 4). Вартість гербіцидної обробки дронами становила лише 410 грн/га, що суттєво менше за традиційні 525 грн/га. Така економія пов'язана з низькими обсягами робочої рідини (3,5–7,5 л/га проти 200–250 л/га), високою точністю внесення та відсутністю витрат на паливо і технічне обслуговування самохідних чи причіпних обприскувачів. Посів редьки олійної за допомогою дрона також виявився економічно вигіднішим: 287 грн/га порівняно з 350 грн/га у традиційній технології, що зумовлено мінімальною трудомісткістю та автоматизованим виконанням операцій.

Таблиця 4

Економічні показники застосування агродронів у порівнянні з традиційними агротехнічними операціями

Показники	Технологія застосування дрону		Традиційна технологія	
	Без гербіциду	З гербіцидом	Без гербіциду	З гербіцидом
Обробка гліфосатом, грн.	**-**	**410,00 (10 $)**	**-**	**525,00 (12,8 $)**
Посів, грн.	**287, 00 (7 $)**	**287, 00 (7 $)**	**350,00 (8,5 $)**	**350,00 (8,5 $)**
Швидкість операційних процесів, хв/га	**5-7**	**5-7**	**25-45**	**25-45**
Затрати води, л/га	**-**	**3,5-7,5**	**-**	**200-250**

Однією з найвиразніших технологічних переваг агродронів є їхня висока продуктивність: 5–7 хв/га проти 25–45 хв/га за традиційних способів. У випадку вирощування сидеральних культур, де своєчасність виконання операцій визначає здатність рослин ефективно реалізувати біомасу до настання осінньо-зимового періоду, така перевага є критичною. Дрони забезпечують стабільність технологічного процесу навіть в умовах перезволожених ділянок, дрібноконтурних полів та територій зі складною конфігурацією меж.

Не менш важливим є екологічний аспект: використання ультранизьких норм виливу зменшує навантаження на агроекосистему, мінімізує ризики забруднення водних ресурсів і знижує вміст залишків препаратів у ґрунті. Це робить агродрони важливим інструментом екологічно орієнтованого землеробства й підтримує тенденції переходу до органічних або маловитратних систем.

Проте, незважаючи на очевидні переваги, технологія має певні обмеження. Ефективність посіву дрібнонасінних культур залежить від аеродинамічних характеристик дрона: навіть незначні повітряні потоки можуть зумовити нерівномірність висіву. Крім того, управління агродроном вимагає навичок оператора, особливо щодо коригування висоти, швидкості польоту та траєкторії в умовах просторової неоднорідності полів. Водночас швидкий розвиток цифрових платформ, систем автопілотування і програмованих алгоритмів внесення роблять ці обмеження поступово менш значущими.

У цілому результати наших досліджень свідчать, що для специфічних умов Житомирського Полісся застосування агродронів у технології посіву та передпосівної підготовки редьки олійної є економічно виправданим і технологічно перспективним напрямом. Поєднання економії ресурсів, високої продуктивності, екологічної безпечності та адаптивності до складних умов посіву формує основу для подальшого впровадження даної технології в системи сидерального землеробства регіону.

ВИСНОВКИ

1. Лабораторна оцінка якості насіння редьки олійної підтвердила високий рівень його фізіологічної придатності: енергія проростання становила 94 %, а лабораторна схожість — 99 %, що дало можливість використовувати стандартні норми висіву без коригування на біологічні втрати.

2. Встановлено значне бічне зміщення дрібного насіння редьки олійної, пов’язане з його малою масою та впливом аеродинамічних потоків під час польоту апарата, що зумовило асиметричний розподіл насінин у межах посівної смуги та зменшення фактичної густоти на 12–22 % порівняно із закладеними нормами.

3. Найвища життєздатність сходів редьки олійної спостерігалась за норми висіву 320 рослин/м² та попередньої гербіцидної обробки із застосуванням гліфосату. У цьому варіанті середня кількість рослин становила 42,9 шт/м² при висоті польоту 5 м та 37,7 шт/м² при висоті 3 м. Виживабельність культури була істотно вищою саме за гербіцидного фону, що підтверджує позитивний ефект зниження конкурентного тиску бур’янів на ранніх етапах органогенезу.

4. Варіанти із нормою висіву 560 рослин/м² продемонстрували значне падіння виживабельності (2,2–9,4 %). Отримані дані також вказують на вплив погодних умов року - дефіциту вологи та температурних коливань, що зумовили подовження міжфазних періодів і додаткове зниження густоти посіву.

5. Технологія застосування агродронів продемонструвала відчутну економічну ефективність, що виражається у зниженні витрат на посівні та передпосівні операції на 18–25 % порівняно з традиційними механізованими методами. Значне скорочення витрат води, пального та часу виконання робіт забезпечує підвищення операційної продуктивності та економію ресурсів, що робить використання дронів фінансово доцільним рішенням навіть для малих і середніх господарств.

РЕКОМЕНДАЦІЇ ВИРОБНИЦТВУ

Редька олійна сорту Райдуга продемонструвала високу адаптивність до поверхневого висіву агродроном та здатність формувати життєздатні й стабільні сходи, що підтверджує її придатність для використання у сучасних системах сидерального землеробства з мінімальним механічним втручанням у ґрунт. Для підвищення рівномірності посіву рекомендовано застосовувати перехресний висів половинними нормами, а в умовах значної забур'яненості — проводити попередню гербіцидну підготовку ґрунту, яка забезпечує кращу виживабельність рослин. Оптимальною нормою висіву слід вважати 320 рослин/м², із можливим збільшенням на 20–25 % у роки з високими кліматичними ризиками. Важливим елементом технології є попередня лабораторна оцінка якості насіння та врахування аеродинамічних особливостей його розсіювання, що вимагає оптимізації висоти польоту дрона в межах 3–5 м і регулярного калібрування висівного апарата.

Виробництву рекомендовано врахувати економічні переваги посіву редьки олійної за допомогою дрону, зокрема значне скорочення витрат води, пального і часу виконання операцій, а також зменшення техногенного навантаження на ґрунт. Використання агродронів в сільському господарстві забезпечує швидке та ресурсоефективне проведення посівних і передпосівних робіт, що є особливо цінним для господарств Полісся з перезволоженими або дрібноконтурними ділянками. У результаті впровадження дронів у технологію вирощування редьки олійної як сидерату сприяє підвищенню ефективності органічного землеробства та зміцненню екологічної стійкості агроландшафтів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аніскевич Л. В., Адамчук В. І. Технології точного землеробства. Науковий вісник Національного аграрного університету. 2006. Вип. 101. С. 8–27.

2. Васильковська К. В., Андрієнко О. О., Шепілова Т. П. Ефективність агродронів в системі точного землеробства. Аграрні інновації. Херсон: Видавничий дім «Гельветика», 2023. Вип. 16. С. 13–18.

3. Vasylkovska K. V., Andriienko I. A., Filonchuk A. S. Vykorystannia aghrodroniv v systemi tochnoho zemlerobstva. Матеріали X Міжнародної науково-технічної онлайн конференції «Крамаровські читання». Київ: НУБіП України, 2023. С. 201–203.

4. Lysenko V., Bolbot I., Romasevych Y., Loveykin V., Voytiuk V. Algorithms of robotic electrotechnical complex control in agricultural production. In: Control Systems: Theory and Applications. Gistrup: River Publishers, 2018. P. 271–289.

5. Zhang Y. et al. Efficiency of UAV application in crop management. Agriculture. 2019. Vol. 9. P. 1–15.

6. Peterson R., Williams T. Drone technology in precision agriculture. Precision Farming Journal. 2020. Vol. 8. P. 34–45.

7. Brown L. The role of UAVs in modern farming. 2020.

8. Qi P., Zhang Y., Li H. Development of multifunctional unmanned aerial vehicles for agriculture: a review. Agriculture. 2022. Vol. 12(5). P. 112–120. DOI: 10.3390/agriculture12050112.

9. Wang X., Li J., Chen Z. Distribution uniformity improvement methods of a large-load UAV spreader. Computers and Electronics in Agriculture. 2024. Vol. 215. 108246. DOI: 10.1016/j.compag.2024.108246.

10. Aman J. K. D. Study on distribution pattern of drone granular spreader (DJI Agras T-20) using ASABE S341 procedures. International Journal of Agriculture, Forestry and Plantation. 2022. Vol. 15. P. 37–45.

11. Carter P. Advancing sowing technologies using UAVs. 2020.

12. Penn State Extension. Drone Seeding Cover Crops into Standing Soybeans. 2024. URL: https://extension.psu.edu/drone-seeding-cover-crops-into-standing-soybeans

13. University of Wisconsin–Madison. Drone Seeding Cover Crops: Evaluating Establishment. 2024. URL: https://growiwm.wisc.edu/drone-seeding-cover-crops-evaluating-establishment

14. Luu T. H., Nguyen Q. T., Kim J. UAV-based estimation of post-sowing plant density using RGB imagery and deep learning across multiple altitudes. Frontiers in Computer Science. 2025. Vol. 7.

15. Lehrsch G. A., Gallian J. J. Oilseed radish effects on soil structure and soil water relations. Journal of Sugar Beet Research. 2010. Vol. 47(1–2). P. 1–21.

16. Stroud J. L., Irons D. E., Watts C. W., Storkey J. et al. Cover cropping with oilseed radish (Raphanus sativus) alone does not enhance deep burrowing earthworm midden counts. Soil & Tillage Research. 2017. Vol. 165. P. 11–15.

17. Smith J., Brown K. Enhancing soil fertility with radish cover crops. Journal of Soil Science. 2019. Vol. 42. P. 120–128.

18. Цицюра Я. Г., Цицюра Т. В. Редька олійна. Стратегія використання та вирощування: монографія. Вінниця: Нілан ЛТД, 2015. 624 с.

19. Рахметов Д. Б., Горобець С. О. Алелопатична роль альтернативних сидеральних культур у функціонуванні агрофітоценозів. Вісник аграрної науки. 2000. № 10. С. 20–24.

20. Novikova T. Agrobiological properties of oil radish. 2016.

21. Miller R. Nutritional value of oil radish. 2018.

22. Green S. Drone application in oilseed crop production. 2019.

23. Petrenko V. Siderates in organic farming. 2017.

24. Helander M., Saloniemi I., Saikkonen K. Glyphosate residues in soil affect crop plant germination and growth after the safety period. Scientific Reports. 2019. Vol. 9. P. 19653. DOI: 10.1038/s41598-019-56195-0.

25. Окрушко С. Є. Екологічна безпека сучасних систем захисту рослин. Збірник наукових праць ВНАУ. Сільське господарство та лісівництво. 2015. № 2. С. 126–134.

26. Журавель С. В., Кравчук М. М., Журавель С. С. та ін. Особливості відпрацювання технології вирощування редьки олійної в якості сидеральної культури за умов моделювання технологічної схеми посіву за допомогою агродрону. Sciences of Europe (Praha). 2024. № 153. С. 4–7.

27. Журавель С. В., Журавель С. С., Сладковська Т. А. та ін. Технологічні особливості вирощування різних сортів редьки олійної в умовах Житомирської області. Sciences of Europe (Praha). 2023. № 130. С. 19–24.

28. Zhuravel, S., Kravchuk, M., Zhuravel, S., Razumna, K., & Kyianichenko, M. (2025). Development of a drone-based sowing technology for oilseed radish as a green manure crop. Scientific Horizons, 28(11), 58-66. doi: 10.48077/ scihor11.2025.58.

29. Lammerts Van Bueren E. T., Jones S. S., Tamm L. et al. The need to breed crop varieties suitable for organic farming, using wheat, tomato and broccoli as examples: a review. NJAS – Wageningen Journal of Life Sciences. 2011. Vol. 58. P. 193–205.

30. Entz M. H., Kirk A. P., Vaisman I. et al. Farmer participation in plant breeding for Canadian organic crop production: implications for adaptation to climate uncertainty. Procedia Environmental Science. 2015. Vol. 29. P. 238–239.

31. Shevchenko M. Sustainable agriculture practices. 2019.

32. Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості: ДСТУ 4138-2002. К.: Держспоживстандарт України, 2003. 173 с.

33. Лихочвор В. В., Петриченко В. Ф., Іващук П. В., Корнійчук О. В. Рослинництво. Технології вирощування с.-г. культур. Львів: НВФ «Українські технології», 2010. 1086 с.

34. Мельник І. Сидеральні культури як елемент екологічного землеробства. Органічне виробництво і наукові дослідження. 2023; 1(2): 58–65.