

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет захисту рослин, біотехнологій та екології

ПОГОДЖЕНО

Декан факультету захисту рослин,
біотехнологій та екології

_____ **Юлія КОЛОМІЄЦЬ**
(підпис)

«_____» _____ 2026 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИТСУ

завідувач кафедри екобіотехнологій та
біорізноманіття

_____ **Олена КВАСКО**
(підпис)

«_____» _____ 2026 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Біотехнологічна оцінка ефективності хітозану як еліситора імунної
відповіді рослин на вірусні інфекції»

Спеціальність 162 «Біотехнології та біоінженерія»

Освітньо професійна програма «Біотехнологія та біоінженерія»

Гарант освітньої програми

Кандидат біологічних наук, доцент

_____ **Олена КВАСКО**
(підпис)

Керівник кваліфікаційної роботи

Кандидат біологічних наук

_____ **Оксана ТАРАН**
(підпис)

Виконав

_____ **Іван Турзін**
(підпис)

КИЇВ – 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИПОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет захисту рослин, біотехнологій та екології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

екобіотехнології та біорізноманіття

к.б.н., доцент _____ Олена КВАСКО

«_____» _____ 2026 р.

**З А В Д А Н Н Я
ДО ВИКОНАННЯ БАКАЛАВРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
ЗДОБУВАЧУ**

Турзіну Івану Павловичу

Спеціальність 162 Біотехнології та біоінженерія

Освітньо професійна програма «Біотехнологія та біоінженерія»

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи: «Біотехнологічна оцінка ефективності хітозану як елісатора імунної відповіді рослин на вірусні інфекції» затверджено наказом від «30» жовтня 2025 р. № 2596 «С».

Термін подання завершеної роботи на кафедру 22 травня 2026 р.

Вихідні дані до роботи: рослини тютюну (*Nicotiana tabacum* L.); препарати Fungimet Alga та Fungimet Alga з додаванням іонів срібла; вірус тютюнової мозаїки (TMV); лабораторні та вегетаційні умови вирощування рослин.

Перелік питань, які потрібно розробити:

1. Оцінити вплив препаратів Fungimet Alga та Fungimet Alga з додаванням іонів срібла на проростання насіння і ріст рослин *Nicotiana tabacum* L.
2. Дослідити вплив препаратів на морфометричні показники та фізіологічний стан рослин тютюну.
3. Визначити зміни показників фотосинтетичної активності рослин *Nicotiana tabacum* L. методом індукції флуоресценції хлорофілу під впливом препаратів.

Дата видачі завдання «30» жовтня 2025 року.

Завдання прийняв до виконання _____ **Іван ТУРЗІН**
(підпис)

Керівник кваліфікаційної роботи _____ **Оксана ТАРАН**
(підпис)

РЕФЕРАТ

Загальний обсяг роботи становить 50 сторінки, вона включає вступ, три розділи, висновки, список використаних джерел, містить 18 рисунки та 2 таблиць.

Ключові слова: ХІТОЗАН, ЕЛІСИТОРИ, ІНДУКОВАНА СТІЙКІСТЬ РОСЛИН, ВІРУС ТЮТЮНОВОЇ МОЗАЇКИ (TMV), *NICOTIANA TABACUM L.*, БІОТЕХНОЛОГІЯ РОСЛИН, БІОПРЕПАРАТИ, FUNGIMET ALGA, ФЛУОРЕСЦЕНЦІЯ ХЛОРОФІЛУ, ФОТОСИСТЕМА II.

Мета дослідження — дослідити вплив препаратів Fungimet Alga та Fungimet Alga з додаванням іонів срібла на ріст, фізіологічний стан і стійкість рослин *Nicotiana tabacum L.* до вірусу тютюнової мозаїки (TMV).

Для досягнення поставленої мети було проведено аналіз літературних джерел, досліджено вплив препаратів на проростання насіння, ріст і розвиток рослин, оцінено зміни морфометричних та фізіологічних показників, фотосинтетичну активність і ефективність препаратів щодо підвищення стійкості рослин до TMV.

Об'єкт дослідження — рослини *Nicotiana tabacum L.* в умовах лабораторного та вегетаційного вирощування.

Предмет дослідження — вплив препаратів Fungimet Alga та Fungimet Alga з додаванням іонів срібла на ріст, фізіологічний стан і стійкість рослин тютюну до TMV.

Методи дослідження: фізіологічні, біотехнологічні, спектрофотометричні, метод індукції флуоресценції хлорофілу, аналітичні та статистичні методи обробки результатів.

У результаті досліджень встановлено, що препарати Fungimet Alga та Fungimet Alga з додаванням іонів срібла позитивно впливали на проростання насіння, ріст і розвиток рослин. Найвищі показники схожості та приросту біомаси відзначено у варіанті із додаванням іонів срібла. Обробка рослин сприяла покращенню морфометричних показників і фотосинтетичної активності. Встановлено зменшення проявів симптомів вірусу тютюнової мозаїки у дослідних варіантах порівняно з контролем, що свідчить про перспективність використання препаратів Fungimet Alga для підвищення стійкості рослин до вірусних інфекцій.

ABSTRACT

The thesis comprises 50 pages and includes an introduction, three chapters, conclusions, and a list of references. The work contains 18 figures and 2 tables.

Keywords: CHITOSAN, ELICITORS, INDUCED PLANT RESISTANCE, TOBACCO MOSAIC VIRUS (TMV), *NICOTIANA TABACUM L.*, PLANT BIOTECHNOLOGY, BIOPREPARATIONS, FUNGIMET ALGA, CHLOROPHYLL FLUORESCENCE, PHOTOSYSTEM II.

The aim of the study was to investigate the effects of Fungimet Alga and Fungimet Alga supplemented with silver ions on the growth, physiological condition, and resistance of *Nicotiana tabacum L.* plants to Tobacco Mosaic Virus (TMV).

To achieve this aim, a review of scientific literature was conducted, and the effects of the preparations on seed germination, plant growth and development were investigated. Changes in morphometric and physiological parameters, photosynthetic activity, and the effectiveness of the preparations in enhancing plant resistance to TMV were also evaluated.

The object of the study was *Nicotiana tabacum L.* plants grown under laboratory and vegetation conditions.

The subject of the study was the effect of Fungimet Alga and Fungimet Alga supplemented with silver ions on the growth, physiological condition, and resistance of tobacco plants to TMV.

Research methods included physiological, biotechnological, and spectrophotometric approaches, chlorophyll fluorescence induction analysis, as well as analytical and statistical methods for data processing.

The results demonstrated that Fungimet Alga and Fungimet Alga supplemented with silver ions positively affected seed germination, plant growth, and development. The highest germination rate and biomass accumulation were observed in the treatment containing silver ions. Application of the preparations improved morphometric characteristics and enhanced photosynthetic activity. A reduction in the severity of Tobacco Mosaic Virus symptoms was observed in treated plants compared with the control, indicating the potential of Fungimet Alga preparations for increasing plant resistance to viral infections.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	11
1.1. Хітозан: походження, властивості та біологічна активність	11
1.2. Використання хітозану у біотехнології рослин	12
1.3. Молекулярні механізми імунної відповіді рослин на дію хітозану	14
1.4. Еліситори в біотехнології рослин	15
1.5. Імунна відповідь рослин на вірусні інфекції	16
1.6. Вірус тютюнової мозаїки (TMV) як модельний об'єкт досліджень	17
1.7. Методи оцінки фізіологічного стану рослин: індукція флуоресценції хлорофілу	18
1.8. Біопрепарати на основі хітозану в рослинництві	20
1.9. Сучасні дослідження застосування хітозану для підвищення стійкості рослин	21
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	23
2.1. Місце проведення досліджень	23
2.2. Об'єкти дослідження	23
2.3. Характеристика досліджуваного препарату	24
2.4. Методика пророщування насіння у лабораторних умовах	24
2.5. Дослідження впливу препарату Fungimet Alga з додаванням іонів срібла.....	25
2.6. Дослідження впливу Fungimet Alga (без іонів срібла).....	25
2.7. Вегетаційний експеримент з препаратом Fungimet Alga з додаванням іонів срібла.....	26
2.8. Дослідження впливу Fungimet Alga (без іонів срібла) на розвиток рослин, інфікованих TMV.....	26
2.9. Дослідження фотосинтетичної активності рослин	26

2.10. Статистична обробка результатів досліджень	28
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	29
3.1. Дослідження впливу препарату Fungimet Alga з додаванням іонів срібла на проростання насіння.....	29
3.2. Дослідження впливу препарату Fungimet Alga з додаванням іонів срібла на ріст і розвиток рослин	32
3.3. Дослідження впливу препарату Fungimet Alga без срібла на проростання та розвиток рослин.....	34
3.4. Дослідження впливу препарату на основі хітозану на розвиток рослин тютюну в стані біотичного стресу.....	36
3.5. Результати дослідження фотосинтетичної активності рослин.....	39
3.6. Узагальнення та обговорення отриманих результатів.....	41
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	43
ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	45

ВСТУП

Вірусні інфекції є однією з причин зниження продуктивності рослин. Через відсутність ефективних методів хімічного контролю особливого значення набувають способи підвищення природної стійкості рослин шляхом активації їх захисних механізмів [14, 22, 30, 31].

Одним із перспективних напрямів сучасної біотехнології рослин є використання так званих еліситорів — речовин, здатних індукувати імунну відповідь рослинного організму. Еліситори можуть мати різне походження: мікробне, рослинне або синтетичне. Їх дія полягає у запуску комплексу захисних реакцій рослин, які включають синтез фітонцидів, активізацію антиоксидантних систем, посилення експресії генів захисту та зміни у метаболізмі клітин. У результаті цього рослина здатна ефективніше протистояти патогенам, у тому числі вірусним інфекціям [3, 15, 25, 44].

Серед природних еліситорів особливу увагу привертає хітозан — біополімер, який отримують шляхом деацетилювання хітину, основного структурного компонента панцирів ракоподібних, комах та клітинних стінок деяких грибів. Хітозан характеризується високою біологічною активністю та здатністю впливати на різні фізіологічні процеси в рослинах. Встановлено, що ця речовина може стимулювати проростання насіння, покращувати розвиток кореневої системи, підвищувати інтенсивність фотосинтезу та активувати механізми імунної відповіді рослин [2, 11, 12, 18, 21].

Хітозан здатний індукувати системну стійкість рослин та активувати антиоксидантні механізми захисту [11, 12, 15, 16].

Особливий інтерес становлять комбіновані препарати на основі хітозану, які містять додаткові біологічно активні компоненти. До таких препаратів належать засоби, що поєднують хітозан з екстрактами морських водоростей, мікроелементами або іншими природними стимуляторами росту. Морські

водорості є джерелом широкого спектра біологічно активних речовин, включаючи фітогормони, амінокислоти, вітаміни та мікроелементи. Завдяки цьому вони здатні посилювати фізіологічні процеси у рослинах та підвищувати їх адаптивний потенціал [4, 6, 17, 29, 35].

Важливим напрямом досліджень є також використання наночастинок або іонів металів у складі біопрепаратів. Зокрема, іони срібла відомі своїми антимікробними властивостями і можуть потенційно посилювати біологічну активність препаратів на основі хітозану. Поєднання хітозану з іонами срібла може забезпечувати як стимулюючий ефект на рослини, так і пригнічення розвитку деяких патогенів [2, 4, 5, 10-12, 21, 35].

Вірусні захворювання рослин є однією з основних причин втрат урожаю у світовому сільському господарстві [8, 10, 17, 32]. Серед численних вірусів, що уражають культурні рослини, важливе місце займає вірус тютюнової мозаїки (*Tobacco mosaic virus*, TMV) [14, 22, 30, 31]. Цей вірус належить до роду *Tobamovirus* і характеризується високою стабільністю у зовнішньому середовищі та широким колом рослин-господарів [14, 22, 30, 31]. Інфікування рослин TMV призводить до появи характерної мозаїчної симптоматики на листках, порушення фотосинтетичних процесів, пригнічення росту та зниження врожайності [14, 22, 30, 31].

Вірусні інфекції значною мірою впливають на фізіологічний стан рослин [24, 30, 39]. Одним із найбільш чутливих показників змін у фотосинтетичному апараті є індукція флуоресценції хлорофілу [38, 39, 40]. Цей метод широко використовується у фізіології рослин для оцінки функціонального стану фотосистеми II та визначення рівня стресу у рослинних організмів. Порушення фотосинтетичних процесів, викликане вірусним інфікуванням, відображається у зміні параметрів флуоресценції хлорофілу, що дозволяє використовувати цей показник для діагностики фізіологічного стану рослин.

З огляду на це, актуальним є дослідження впливу біопрепаратів на основі хітозану на фізіологічні процеси у рослинах та їх здатність підвищувати стійкість до вірусних інфекцій.

У роботі досліджували препарат Fungimet Alga на основі хітозану та екстракту морських водоростей, а також його модифікований варіант з іонами срібла [2, 11, 12, 21].

Дослідження проводились у лабораторії кафедри екобіотехнології та біорізноманіття Національного університету біоресурсів і природокористування України протягом 2025 року. У роботі використовувалися модельні рослини, зокрема квасоля (*Phaseolus vulgaris*), кукурудза (*Zea mays*) та тютюн (*Nicotiana tabacum*). Вивчався вплив препарату на проростання насіння, розвиток рослин та фізіологічний стан рослин, інфікованих вірусом тютюнової мозаїки.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Хітозан: походження, властивості та біологічна активність

У сучасній біотехнології рослин значна увага приділяється пошуку природних сполук, здатних стимулювати ріст і розвиток рослин та підвищувати їх стійкість до несприятливих факторів середовища [4, 5, 6, 35]. Однією з таких перспективних речовин є хітозан. Хітозан є природним полімером, що утворюється шляхом деацетилювання хітину — другого за поширеністю біополімеру в природі після целюлози [2, 18, 21, 28]. Хітин входить до складу екзоскелетів ракоподібних і комах, а також клітинних стінок багатьох грибів [18, 28]. Після часткового видалення ацетильних груп із молекули хітину утворюється хітозан — полімер, що складається переважно з залишків β -(1 $\rightarrow$ 4)-зв'язаного D-глюкозаміну [18, 28].

Завдяки своїй хімічній структурі хітозан має ряд унікальних фізико-хімічних властивостей. Він добре розчиняється у слабких органічних кислотах, має високу біосумісність, нетоксичний та біорозкладний. У водних розчинах хітозан набуває полікатіонного характеру, що забезпечує його здатність взаємодіяти з негативно зарядженими компонентами клітинних мембран та клітинних стінок мікроорганізмів [2, 11, 12, 21].

У рослинництві хітозан використовується як біостимулятор росту, індуктор імунної відповіді та компонент біопрепаратів, спрямованих на підвищення стійкості рослин до патогенів. Численні дослідження показали, що обробка рослин або насіння розчинами хітозану може позитивно впливати на різні фізіологічні процеси, включаючи проростання насіння, розвиток кореневої системи, фотосинтез та синтез вторинних метаболітів [2, 4, 5, 10-12, 21, 35].

Однією з важливих властивостей хітозану є його здатність активувати захисні механізми рослин. Відомо, що при контакті з рослинними клітинами хітозан може сприйматись як сигнал про наявність патогенного організму. Це призводить до запуску комплексу захисних реакцій, які включають синтез фітоалексинів, посилення активності антиоксидантних ферментів та зміни у метаболізмі клітин. [2, 11, 12, 21].

У результаті такої дії хітозан розглядається як еліситор — речовина, що індукує імунну відповідь рослин. Еліситори можуть бути як біотичного, так і абіотичного походження. Хітозан належить до біотичних еліситорів, оскільки його структура подібна до компонентів клітинних стінок грибів, що дозволяє рослинам розпізнавати його як сигнал про потенційну загрозу [2, 3, 11, 12, 15, 21, 25].

Застосування хітозану в рослинництві має ряд переваг. По-перше, ця речовина є екологічно безпечною і не накопичується у навколишньому середовищі. По-друге, вона може використовуватися як альтернатива або доповнення до традиційних засобів захисту рослин. По-третє, хітозан здатний стимулювати природні захисні механізми рослин без прямого токсичного впливу на патогени [2, 11, 12, 21].

Таким чином, хітозан є перспективною біологічно активною речовиною, яка може широко застосовуватися у сучасному рослинництві. Його здатність стимулювати ріст рослин, активувати їхні захисні механізми та підвищувати стійкість до патогенів робить його важливим компонентом біотехнологічних розробок у галузі захисту рослин [2, 11, 12, 21].

1.2 Використання хітозану у біотехнології рослин

У сучасному рослинництві значна увага приділяється екологічно безпечним біостимуляторам, здатним підвищувати стійкість рослин до стресових

факторів. Однією з таких речовин є хітозан (рис.1.1), який застосовують для обробки насіння, обприскування рослин та внесення у ґрунт [2, 11, 12, 21].

Одним із найбільш поширених способів застосування хітозану є обробка насіння перед посівом. Дослідження показали, що замочування насіння у розчинах хітозану може значно підвищувати енергію проростання та загальну схожість. Це пояснюється тим, що хітозан стимулює активність ферментів, які беруть участь у процесах мобілізації запасних речовин насіння [2, 11, 12].

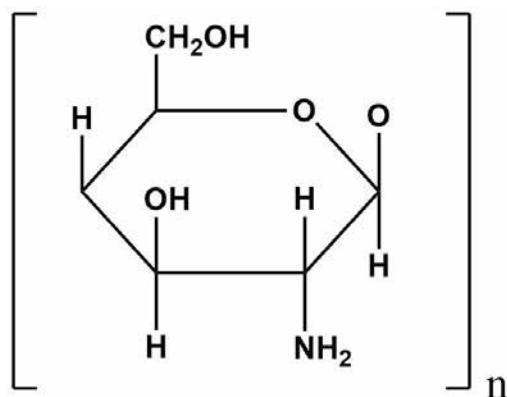


Рис.1.1. Хітозан (CASRN 9012-76-4; хімічна формула: $[C_6H_{11}NO_4]_n$).
Синоніми: 2-аміно-2-дезоксi-бета-D-глюкозамін; деацетильований хітин; поліглузам; полі. (D-глюкозамін) [21].

Крім того, хітозан сприяє формуванню більш розвиненої кореневої системи. У багатьох культурах після обробки насіння хітозаном спостерігається збільшення довжини коренів та кількості корневих волосків [11, 12].

Під впливом хітозану підвищується вміст хлорофілу та інтенсивність фотосинтезу, що стимулює ріст рослин [11, 12, 21].

Завдяки своїм властивостям хітозан знаходить застосування у різних галузях рослинництва, включаючи вирощування овочевих, зернових та декоративних культур. У багатьох випадках його використання дозволяє

зменшити застосування хімічних засобів захисту рослин та підвищити екологічність агротехнологій [2, 21].

1.3 Молекулярні механізми імунної відповіді рослин на дію хітозану

Рослини здатні реагувати на дію патогенів за допомогою системи захисних механізмів. Однією з речовин, що здатна індукувати такі реакції, є хітозан [2, 11, 12, 21].

Молекулярний механізм дії хітозану пов'язаний з його здатністю розпізнаватися рослинними клітинами як сигнал про наявність потенційного патогена. За своєю структурою хітозан нагадує фрагменти клітинних стінок грибів, що дозволяє рослинним клітинам сприймати його як молекулу, пов'язану з патогенами. У сучасній науковій літературі такі молекули називають PAMP (pathogen-associated molecular patterns) — молекулярні патерни, асоційовані з патогенами [2, 11].

Після взаємодії хітозану з рецепторами плазматичної мембрани активується PAMP-triggered immunity (PTI) — імунна відповідь рослин [2, 11, 12, 21].

Одночасно з цим у клітинах рослин відбувається інтенсивне утворення реактивних форм кисню (ROS). Цей процес називають «оксидативним вибухом».

Реактивні форми кисню, такі як супероксидний аніон, перекис водню та гідроксильні радикали, відіграють важливу роль у захисних реакціях рослин.

Вони можуть безпосередньо пошкоджувати патогени або виконувати функцію сигнальних молекул, які активують інші захисні механізми.

ROS також беруть участь у зміцненні клітинних стінок та обмеженні проникнення патогенів.

Хітозан також стимулює активність ферментів, пов'язаних із захисними реакціями рослин. До таких ферментів належать пероксидази,

поліфенолоксидази, фенілаланін-аміакліази, каталази, супероксиддисмутази [2, 11, 12, 21].

Хітозан також впливає на рівень сигнальних фітогормонів, зокрема саліцилової та жасмонової кислот, які регулюють захисні реакції рослин [2, 11, 12, 21].

Зокрема, саліцилова кислота є ключовим компонентом системної набутої стійкості рослин. Після її накопичення у рослинних тканинах активується експресія так званих PR-білків (pathogenesis-related proteins) — білків, пов'язаних із патогенезом. До них належать глюканази, хітинази та інші ферменти, здатні руйнувати клітинні стінки патогенних організмів.

Хітозан також може безпосередньо пригнічувати розвиток патогенних мікроорганізмів [2, 11, 12, 21].

Таким чином, хітозан є багатофункціональною біологічно активною речовиною, яка здатна впливати на рослини на різних рівнях організації — від молекулярного до організменного.

1.4 Еліситори в біотехнології рослин

Еліситори можуть стимулювати імунну відповідь рослин, активувати синтез захисних сполук та підвищувати стійкість рослин до патогенів і несприятливих умов навколишнього середовища.

Еліситори поділяють на біотичні та абіотичні. Біотичні еліситори мають біологічне походження, тоді як абіотичні представлені різними хімічними сполуками [2, 3, 11, 12].

Одним із найбільш досліджених еліситорів є хітозан, який активує захисні реакції рослин [15, 21, 25].

Дія еліситорів пов'язана з активацією сигнальних систем рослинних клітин та запуском імунної відповіді [3, 15, 25].

Еліситори стимулюють синтез фітоалексинів, фенольних сполук та інших компонентів захисної системи рослин.

У біотехнології рослин еліситори використовують для підвищення стійкості рослин та зменшення використання хімічних засобів захисту [10, 11, 12, 15].

Еліситори часто використовують у складі комплексних біопрепаратів разом з екстрактами морських водоростей, гуміновими речовинами та мікроелементами [21, 25, 35].

Таким чином, еліситори є перспективними компонентами біопрепаратів для підвищення стійкості рослин до патогенів. Одним із найбільш ефективних еліситорів є хітозан [12, 15, 21, 25].

1.5 Імунна відповідь рослин на вірусні інфекції

Вірусні інфекції є однією з основних причин зниження продуктивності рослин. Віруси використовують клітинний апарат рослини-господаря для реплікації, що призводить до порушення фізіологічних процесів у рослинах [3].

Віруси рослин складаються з нуклеїнової кислоти та білкової оболонки й здатні розмножуватися лише у клітинах рослини-господаря [15, 25].

Вірусні інфекції викликають мозаїчне забарвлення листків, хлороз, деформацію тканин та пригнічення росту рослин [15, 25].

Мозаїчна симптоматика пов'язана з порушенням фотосинтетичних процесів та нерівномірним розподілом хлорофілу у листках [15, 25].

Однією з основних захисних реакцій рослин є гіперчутлива відповідь, яка обмежує поширення інфекції шляхом локальної загибелі клітин.

У рослин також може формуватися системна набута стійкість (SAR), пов'язана з активацією захисних механізмів у віддалених тканинах [3, 15, 25].

Важливу роль у регуляції імунної відповіді рослин відіграють сигнальні фітогормони, зокрема саліцилова кислота [3, 15, 25].

Вірусні інфекції порушують фотосинтез, водний баланс та обмін речовин у рослин.

Через відсутність ефективних хімічних засобів боротьби з вірусами важливим напрямом є підвищення природної стійкості рослин за допомогою еліситорів, зокрема хітозану [2, 11, 12, 21].

Дослідження показали, що хітозан може підвищувати стійкість рослин до вірусних інфекцій шляхом активації імунної системи рослин. Після обробки рослин хітозаном у них посилюється синтез захисних ферментів, активується антиоксидантна система та змінюється експресія генів, пов'язаних із захисними реакціями [12, 21].

Хітозан також може утворювати захисну плівку на поверхні рослинних тканин, обмежуючи проникнення патогенів [11, 12].

Використання препаратів на основі хітозану є перспективним напрямом підвищення стійкості рослин до вірусних інфекцій [25, 35].

1.6 Вірус тютюнової мозаїки (TMV) як модельний об'єкт досліджень

Вірус тютюнової мозаїки (TMV) є одним із найбільш досліджених вірусів рослин та широко використовується як модельний об'єкт у фітовірусології [14, 22, 30, 31].

TMV належить до роду *Tobamovirus* і характеризується високою стабільністю у зовнішньому середовищі. Структура забезпечує високу стійкість вірусу до дії різних фізичних і хімічних факторів [14, 22].

Однією з характерних особливостей TMV є його здатність зберігати інфекційність протягом тривалого часу. Це значно ускладнює боротьбу з даним патогеном у сільському господарстві.

Передача TMV відбувається переважно механічним шляхом через заражений рослинний матеріал або пошкодження тканин [30, 31].

Після проникнення у клітини рослини TMV активно реплікується та поширюється через плазмодесми і провідну систему рослини.

Інфікування TMV викликає мозаїчне забарвлення листків, деформацію тканин, пригнічення росту та порушення фотосинтетичних процесів [30, 31].

TMV порушує функціонування фотосинтетичного апарату та знижує вміст хлорофілу у листках [30, 31].

Для оцінки фізіологічного стану рослин використовують метод індукції флуоресценції хлорофілу, який дозволяє оцінювати ефективність функціонування фотосистеми II [38–41].

При зараженні TMV спостерігаються зміни параметрів флуоресценції, пов'язані з порушенням фотохімічних процесів у хлоропластах.

Метод флуоресценції хлорофілу є швидким і неінвазивним способом оцінки фізіологічного стану рослин [38–41].

TMV широко використовується як модельний об'єкт у дослідженнях взаємодії рослин із вірусами завдяки добре вивченому геному та простоті експериментального використання [14, 22, 30, 31].

TMV часто використовують для оцінки ефективності біопрепаратів та еліситорів [3–5, 35].

Таким чином, TMV є важливим модельним об'єктом для дослідження стійкості рослин до вірусних інфекцій [14, 22, 30, 31].

1.7 Методи оцінки фізіологічного стану рослин: індукція флуоресценції хлорофілу

Аналіз індукції флуоресценції хлорофілу є неінвазивним методом оцінки функціонального стану фотосинтетичного апарату рослин та впливу стресових факторів [38, 39].

Флуоресценція хлорофілу виникає внаслідок повернення молекул хлорофілу із збудженого стану та відображає ефективність фотохімічних процесів у фотосистемі II [40, 41].

Зміни параметрів флуоресценції свідчать про порушення функціонування фотосинтетичного апарату під впливом стресових факторів [38, 39].

Метод аналізу індукції флуоресценції хлорофілу ґрунтується на реєстрації змін інтенсивності флуоресценції у часі після короточасного освітлення темноадаптованого листка. У процесі вимірювання формується характерна індукційна крива, яка відображає динаміку фотохімічних реакцій у фотосистемі II [38- 41].

Одними з найбільш важливих параметрів, які визначаються під час аналізу флуоресценції, є:

- F_0 (мінімальна флуоресценція) — рівень флуоресценції, який реєструється у темноадаптованому листку при слабкому освітленні. Цей показник відображає стан фотосистеми II до початку фотохімічних реакцій [39, 40, 41].
- F_m (максимальна флуоресценція) — максимальний рівень флуоресценції, який спостерігається після короткого імпульсу інтенсивного світла. У цей момент усі реакційні центри фотосистеми II перебувають у закритому стані. [39- 41]
- F_v (варіабельна флуоресценція) — різниця між максимальним і мінімальним рівнем флуоресценції:

$$F_v = F_m - F_0$$

Цей показник характеризує здатність фотосистеми II до фотохімічної активності [39- 41, 47].

Одним із найбільш інформативних параметрів є співвідношення F_v/F_m , яке відображає максимальну квантову ефективність фотосистеми II. У здорових рослин значення цього показника зазвичай становить приблизно 0,78–0,83.

Зниження цього показника свідчить про порушення функціонування фотосинтетичного апарату [40, 41] .

Метод використовують для оцінки впливу різних стресових факторів, зокрема посухи, температурного стресу та дії патогенів [38–40].

Вірусні інфекції порушують структуру хлоропластів і фотосинтетичні процеси, що відображається у змінах параметрів флуоресценції [38–41].

Застосування методу індукції флуоресценції дозволяє виявляти такі зміни на ранніх стадіях розвитку інфекції, ще до появи видимих симптомів.

Для проведення таких досліджень використовуються спеціальні прилади — флуорометри. Одним із таких приладів є український портативний флуорометр «Флоратест».

Перевагами використання цього методу є висока чутливість, швидкість отримання результатів, відсутність пошкодження рослин, можливість багаторазових вимірювань на одних і тих самих рослинах.

У дослідженнях, спрямованих на вивчення впливу біопрепаратів на рослини, аналіз флуоресценції хлорофілу дозволяє оцінити зміни у фотосинтетичній активності рослин після обробки препаратами. Порівняння параметрів флуоресценції у контрольних та оброблених рослин дозволяє зробити висновки про ефективність застосованих препаратів [4, 5, 10, 35, 40, 41].

Таким чином, метод індукції флуоресценції хлорофілу є ефективним інструментом оцінки фізіологічного стану рослин та впливу біопрепаратів на фотосинтетичні процеси [4, 5, 10, 35].

1.8 Біопрепарати на основі хітозану в рослинництві

У сучасному рослинництві все більшого значення набуває використання екологічно безпечних біопрепаратів на основі природних біологічно активних речовин [4, 5, 10, 35].

Хітозан широко використовується у складі біопрепаратів завдяки здатності стимулювати ріст рослин, активувати захисні механізми та пригнічувати розвиток деяких патогенів [2, 4, 5, 10–12, 21, 35].

Біопрепарати на основі хітозану можуть застосовуватися різними способами. Найбільш поширеними є обробка насіння перед посівом, обприскування рослин у період вегетації та внесення препаратів у ґрунт. У кожному з цих випадків спостерігається позитивний вплив на ріст і розвиток рослин [2, 11, 12, 21].

Обробка насіння розчинами хітозану дозволяє підвищити енергію проростання та загальну схожість насіння. Проростки розвиваються швидше та формують більш розвинену кореневу систему [2, 11, 12, 21].

У сучасних біопрепаратах хітозан часто поєднують з екстрактами морських водоростей, гуміновими речовинами та мікроелементами. Такі препарати здатні стимулювати ріст рослин, фотосинтетичну активність та підвищувати стійкість до стресових факторів [2, 11, 12, 21, 35].

У сучасних дослідженнях також вивчається використання іонів срібла у складі біопрепаратів. Поєднання срібла з хітозаном може посилювати антимікробні властивості препаратів [5, 12, 21, 35].

Біопрепарати на основі хітозану є екологічно безпечними, біорозкладними та придатними для використання в органічному землеробстві [11, 12, 21, 35].

У роботі досліджували біопрепарат Fungimet Alga на основі хітозану та екстракту морських водоростей. Оцінювали його вплив на проростання насіння, ріст рослин та їх фізіологічний стан.

1.9 Сучасні дослідження застосування хітозану для підвищення стійкості рослин

Сучасні дослідження підтверджують ефективність хітозану як компонента біостимуляторів та біопрепаратів для рослинництва [10–12, 21, 35].

Встановлено його позитивний вплив на проростання насіння, ріст рослин та фізіологічні процеси [11, 12, 21].

Одним із перспективних напрямів є використання хітозану для підвищення стійкості рослин до вірусних інфекцій. Після обробки рослин хітозаном підвищується активність антиоксидантної системи та посилюється імунна відповідь рослин [2, 11, 12, 21].

Застосування препаратів на основі хітозану позитивно впливає на фотосинтетичні процеси та може зменшувати прояв симптомів вірусних захворювань рослин [2, 11, 12, 21].

У сучасних біопрепаратах хітозан часто поєднують з екстрактами морських водоростей, амінокислотами та мікроелементами, що дозволяє посилювати стимулюючий і захисний ефект препаратів [2, 11, 12, 21].

Аналіз літературних даних свідчить про перспективність використання хітозану та препаратів на його основі для підвищення стійкості рослин до патогенів.

У зв'язку з цим актуальним є дослідження впливу препарату Fungimet Alga на фізіологічний стан рослин.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Місце проведення досліджень

Експериментальні дослідження, результати яких представлені у даній роботі, проводилися протягом 2025 року у лабораторних умовах кафедри екобіотехнології та біорізноманіття Національного університету біоресурсів і природокористування України (НУБіП України).

У дослідженнях використовували фітокліматичну камеру «Silverbox evolution» (Франція) (рис.2.1.). Температурний режим вирощування рослин становив 22 ± 2 °C, режим освітлення за співвідношення світло/темрява 14/10 годин.



Рис.2.1. Фітокліматична камера «Silverbox evolution».

2.2. Об'єкти дослідження

Об'єктами дослідження були квасоля звичайна (*Phaseolus vulgaris* L., сорт Pinto), соя (*Glycine max* Moench., сорт Опус), кукурудза (*Zea mays* L., гібрид Любава 279 MB) та тютюн (*Nicotiana tabacum* L., сорт Самсун). Квасоллю, сою та кукурудзу використовували для оцінки впливу препарату на проростання насіння

і початковий ріст рослин, а тютюн — як модельний об'єкт для дослідження вірусу тютюнової мозаїки.

2.3. Характеристика досліджуваного препарату

У дослідженнях використовувався експериментальний біопрепарат Fungimet Alga (Україна), який містить комплекс біологічно активних компонентів.

До складу препарату входять:

- хітозан — 50 г/л
- екстракт морських водоростей — 100 г/л
- органічна речовина — 20 г/л

Також препарат містить макроелементи:

- органічний азот (N) — 0,4 г/л
- фосфор (P_2O_5) — 12 г/л
- калій (K_2O) — 30 г/л

Крім того, у складі препарату присутні вітаміни групи В та мікроелементи, які можуть позитивно впливати на фізіологічні процеси у рослинах.

Основними діючими компонентами препарату є хітозан та екстракт морських водоростей, які здатні впливати на ріст, розвиток та фізіологічний стан рослин [2, 11, 12, 21].

У частині дослідів використовувався модифікований варіант препарату, який додатково містив іони срібла (Ag). Передбачається, що додавання срібла може підсилювати біологічну активність препарату та посилювати його захисний ефект.

2.4. Методика пророщування насіння у лабораторних умовах

Пророщування насіння проводили за наступним протоколом. Насіння замочували у розчині Fungimet Alga (0,2 мл препарату на 200 мл води, 16 годин),

після чого пророщували протягом 7 діб при кімнатній температурі. Після пророщування насіння пересаджували в ґрунт у фітокамері «Silverbox evolution» (Франція). Рослини вирощували при штучному освітленні лампою ДНаТ, 600 Вт. Температурний режим підтримували на рівні 22 ± 2 °С, Світловий режим становив 14/10 годин співвідношення освітлення/темрява. Вологість повітря у камері підтримували на рівні 70-80%.

Фотофіксація результатів проводилася через 3 доби після висадки.

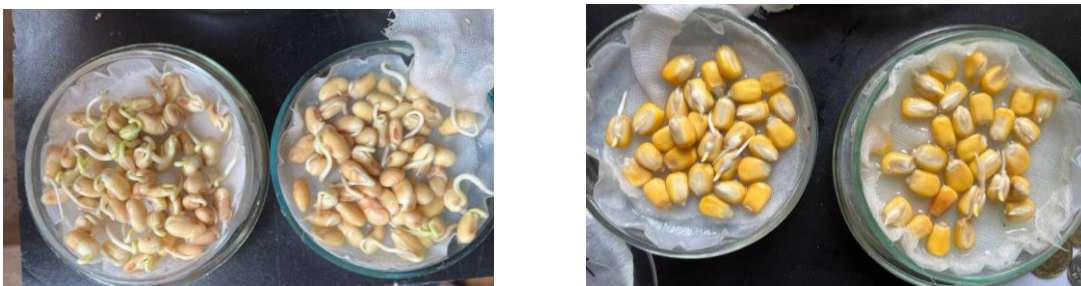


Рис. 2.2 – Пророщування насіння сої та кукурудзи в чашках Петрі.

2.5. Дослідження впливу препарату Fungimet Alga з додаванням іонів срібла

Для оцінки впливу препарату Fungimet Alga з додаванням іонів срібла використовували два варіанти: контроль (вода) та дослід (препарат). У кожному варіанті використовували по 30 насінин. Через 7 діб визначали морфологічні показники проростків.

2.6. Дослідження впливу Fungimet Alga (без іонів срібла)

Для оцінки впливу комплексу хітозан + екстракт морських водоростей використовували контрольний варіант (вода) та препарат Fungimet Alga без іонів срібла. Насіння замочували протягом 24 годин та пророщували в чашках Петрі протягом 7 діб. Кількість насіння — 30 шт. на варіант.

2.7. Вегетаційний експеримент з препаратом Fungimet Alga з додаванням іонів срібла

Після пророщування рослини висаджували у ґрунтовий субстрат та вирощували у фітокамері. Рослини обробляли препаратом Fungimet Alga з додаванням іонів срібла методом обприскування листкової поверхні тричі з інтервалами 2–2–3 тижні. Контрольні рослини обробляли водою. Оцінювали загальний стан рослин, інтенсивність росту та розвиток листкового апарату. Результати фіксували фотографуванням.

2.8. Дослідження впливу Fungimet Alga (без іонів срібла) на розвиток рослин, інфікованих TMV

Для оцінки впливу препарату на рослини, інфіковані вірусом тютюнової мозаїки (TMV), використовували тютюн сорту Самсун. Вміст вірусної інфекції встановлювали імуноферментним аналізом (ІФА) з використанням діагностиків LOEVE (Німеччина). Використовували протокол [47] з модифікаціями виробника діагностиків.

У даному експерименті досліджувалися два варіанти:

Досліджували контрольний варіант (без обробки) та варіант із застосуванням Fungimet Alga без іонів срібла. Препарат вносили під корінь та шляхом обприскування листків п'ять разів з інтервалом 7–10 діб.

У процесі дослідження оцінювалися ступінь прояву симптомів вірусної інфекції, загальний фізіологічний стан рослин, інтенсивність росту рослин.

Для фіксації результатів використовувалася фотографічна документація.

2.9. Дослідження фотосинтетичної активності рослин

Для оцінки фізіологічного стану рослин у дослідженнях використовувався метод індукції флуоресценції хлорофілу [38, 46].

Вимірювання проводилися за допомогою портативного флуорометра «Флоратест» Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, який широко використовується у дослідженнях фізіології рослин.

Перед проведенням вимірювань листки рослин піддавалися темновій адаптації, що є необхідною умовою для коректного визначення параметрів флуоресценції хлорофілу. Після цього проводилася реєстрація індукційної кривої флуоресценції, яка відображає зміну інтенсивності флуоресценції у часі після освітлення листка [46].

У процесі вимірювань визначалися основні параметри флуоресценції хлорофілу:

F_0 — мінімальна флуоресценція темноадаптованого листка.

F_m — максимальна флуоресценція після світлового імпульсу.

F_v — варіабельна флуоресценція, яка визначається як різниця між F_m і F_0 .

Одним із ключових показників, що характеризують ефективність фотосинтетичного апарату рослин, є відношення F_v/F_m , яке відображає максимальну квантову ефективність фотосистеми II [40, 41, 46].

Аналіз цих параметрів дозволяє оцінити вплив препарату на фотосинтетичні процеси та визначити зміни у фізіологічному стані рослин.



Рисунок 2.3 – Визначення параметрів флуоресценції хлорофілу за допомогою приладу «Флоратест».

2.10. Статистична обробка результатів досліджень

Статистичну обробку результатів проводили у Microsoft Excel. Для кожного показника визначали середнє арифметичне значення (M) та стандартну похибку середнього (m). Аналізували показники схожості насіння, морфологічні характеристики рослин та параметри флуоресценції хлорофілу [41, 46].

Оптимальне значення ефективності світлової фази (F_v/F_{max}), яке вказує на нормальну функцію фотосистеми II, становило 0,70.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1. Дослідження впливу препарату Fungimet Alga з додаванням іонів срібла на проростання насіння

Одним із перших етапів дослідження було вивчення впливу експериментального біопрепарату на основі хітозану на процес проростання насіння. Проростання насіння є важливим етапом життєвого циклу рослин, оскільки саме на цьому етапі формуються основи майбутнього розвитку рослини.

Ефективність застосування хітозану залежить від таких його властивостей, як розмір частинок, молекулярна маса, рівень деацетилювання, площа поверхні та кристалічна структура. Особливу увагу при виготовленні препаратів для застосування у вирощування рослин приділяють сумісності з різними культурами [48,49]. Тому існує потреба вивчення конкретних препаратів з вмістом хітозану стосовно їх ефективності для росту і розвитку рослин.

Дослідження проростання насіння квасолі, сої та кукурудзи у контролі та у варіанті не виявили суттєвої різниці. Зокрема, у контролі проростання квасолі становило 72%, у варіанті – 73% (табл.3.1).

Таблиця 3.1. Розвиток проростків культур при обробці препаратом Fungimet Alga з додаванням іонів срібла.

Культура	Варіанти	Проростання, %	Довжина первинного кореня, см	Кількість бічних корінців, шт/росл
Квасоля	Контроль	72	1,5±0,3	-
	Обробка препаратом	73	2,5±0,2	8,5±0,2
Соя	контроль	96	2,3±0,4	-
	Обробка препаратом	97	3,5±0,2	-
Кукурудза	контроль	90	1,5±0,3	7,2±0,3

	Обробка препаратом	92	$3,7 \pm 0,5$	$11,3 \pm 0,2$
--	--------------------	----	---------------	----------------

Не виявлено стимулюючого ефекту обробки препаратом на проростання сої, де проростання становило 96% у контролі та 97% у варіанті, та у дослідженнях з кукурудзою: 90 і 92%, відповідно у контролі та у варіанті.

Проте подальший розвиток проростків був значно інтенсивнішим у варіанті з обробкою препаратом Fungimet Alga. Позитивний вплив препарату було виявлено на формування проростками кореневої системи. Через 72 години після початку пророщування у варіанті проростки квасолі сформували корінь довжиною $2,5 \pm 0,5$ см, тоді як у контролі довжина кореня не перевищувала $1,5 \pm 0,5$ см (табл.3.1). У сої довжина кореня перевищувала показник у контролі у 1,5-2 рази, а у кукурудзи – у 2 -2,5 рази. Таким чином, ефективність обробки препаратом проявлялася у швидкому формуванні кореневої системи у проростків, що має сприяти кращій схожості у гранті.

Стимулююча дія препарату була виявлена і у ризогенезі проростків. У варіанті з препаратом проростки квасолі активно формували бічні корені, тоді як у контролі такого розвитку не спостерігали (рис.3.1).

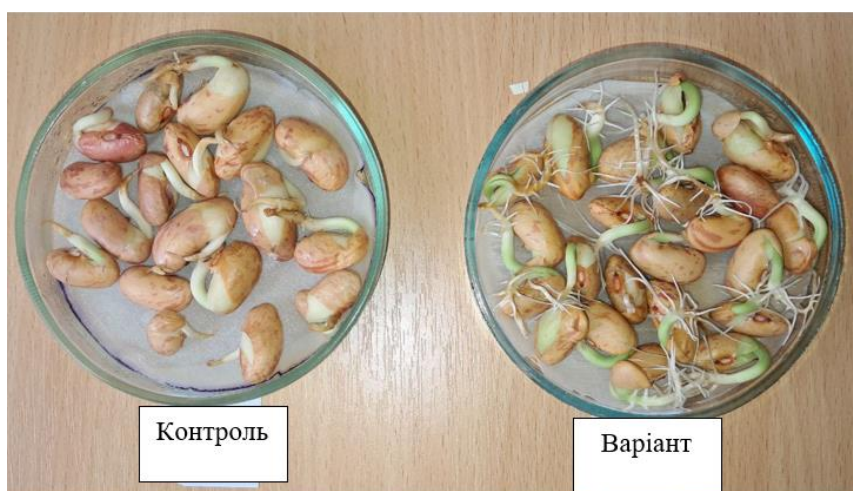


Рис. 3.1. Формування проростками квасолі кореневої системи з бічними корінцями при обробці препаратом Fungimet Alga з додаванням іонів срібла.

Проте у проростків сої такого ефекту не виявлено (рис.3.2.), а у проростків кукурудзи виявлено в обох варіантах, проте більш інтенсивне утворення бічних коренів спостерігали у варіанті. Таким чином, показано диференціальну відповідь проростків різних культур на обробку препаратом на основі хітозану та морських водоростей.



Рис.3.2. Розвиток проростків сої за дії препарату Fungimet Alga з додаванням іонів срібла.

У наших дослідженнях також встановлено, що під впливом препарату Fungimet Alga у проростків відбувалося накопичення хлорофілу, вони набували зеленого кольору, що свідчить про активне формування фотосинтетичної системи при проростанні насіння (рис.3.3).

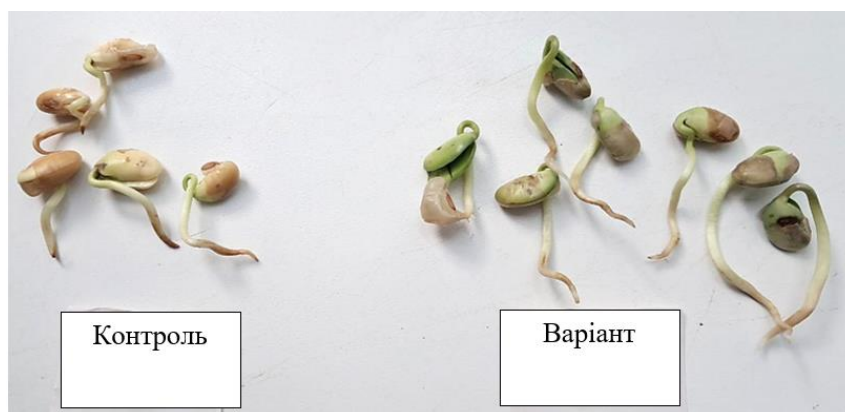


Рис.3.3. Накопичення хлорофілу сім'ядолями проростків сої при обробці препаратом.

Отримані результати свідчать про позитивний вплив препарату Fungimet Alga на розвиток кореневої системи та фотосинтетичного апарату проростків.

3.2. Дослідження впливу препарату Fungimet Alga з додаванням іонів срібла на ріст і розвиток рослин

У результаті проведених досліджень було встановлено позитивний вплив передпосівної обробки насіння препаратом Fungimet Alga з додаванням іонів срібла на лабораторну схожість досліджуваних сільськогосподарських культур (квасоля, соя, кукурудза). Загальна тенденція свідчить про підвищення показників схожості в усіх експериментальних варіантах порівняно з контролем, проте ступінь відгуку рослин залежав від конкретної культури. Найбільш виражений стимулювальний ефект від застосування препарату Fungimet Alga з іонами срібла було зафіксовано на посівах квасолі. Приріст схожості відносно контролю становив близько 34%, що свідчить про високу ефективність препарату для цієї культури (рис.3.4). Рослини у варіанті сходили на 5-7 днів раніше і випереджували контрольні у розвитку (рис.3.5).

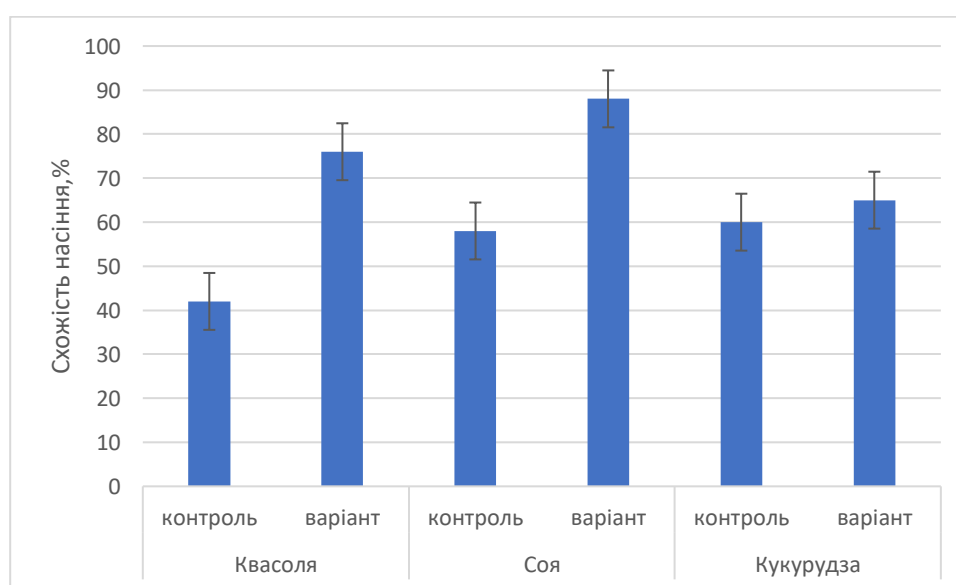


Рис.3.4. Схожість насіння культур, обробленого препаратом Fungimet Alga з додаванням іонів срібла.



Рис. 3.5. Сходи насіння сої, обробленого препаратом через 7 діб після посіву: А-варіант; В – контроль.

Високу чутливість до обробки продемонструвала також соя, яка показала найвищі абсолютні значення схожості в експерименті. Схожість насіння сої у контролі становила близько 58%, а в експериментальному варіанті після обробки препаратом показник зріс до 88%. Чистий приріст схожості рослин склав 30%. Насіння сої, оброблене препаратом зійшло на 5 діб раніше, ніж у контролі. Для кукурудзи також відзначено позитивну динаміку, хоча різниця між варіантами є найменш контрастною серед усіх досліджуваних культур. Приріст схожості склав близько 5%. Проте рослин кукурудзи у варіанті мали значно інтенсивніший ріст, що позначалося на розвитку рослин (рис.3.6)

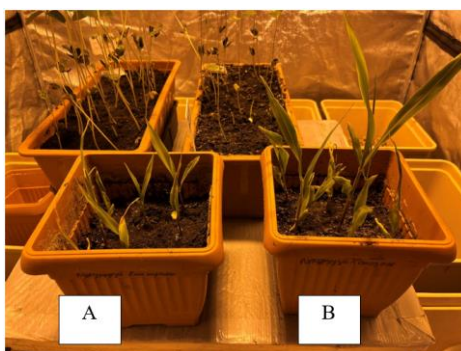


Рис. 3.6. Розвиток рослин кукурудзи, вирощених з обробленого препаратом насіння: А – контроль; В-варіант.

Таким чином, застосування препарату Fungimet Alga з додаванням іонів срібла є ефективним технологічним прийомом для підвищення посівних якостей насіння. Найвищу ефективність препарат продемонстрував на бобових культурах: схожість квасолі зросла в 1,8 раза, а сої — в 1,5 раза порівняно з контрольними групами. Для кукурудзи ефект виявився менш вираженим, проте також позитивним.

3.3. Дослідження впливу препарату Fungimet Alga без срібла на проростання та розвиток рослин

Для більш повного вивчення впливу препарату було проведено додатковий експеримент із використанням препарату без додавання іонів срібла. Насіння замочували у відповідних розчинах протягом 24 годин, після чого пророщували у чашках Петрі протягом 7 діб.

У ході спостережень було встановлено, що проростання насіння в обох варіантах відбувалося досить активно, проте у варіанті з препаратом ризогенез відбувався інтенсивніше (табл. 3.2).

Таблиця 3.2. Розвиток проростків квасолі при обробці препаратом Fungimet Alga без додавання іонів срібла.

Варіант	Проростання, %	Довжина первинного кореня, см	Кількість бічних корінців, шт/роsl	Схожість рослин, %
контроль	85	1,7±0,2	-	37
препарат	83	2,6±0,3	7,4±0,4	89

Відповідно, при висіві у ґрунт схожість рослин із варіанту з препаратом становила 89%, тоді як у контролі – 37%. Приріст схожості становив 52% за обробки препаратом. Очевидно, кращий стан проростків у варіанті забезпечив вищу схожість рослин (рис. 3.4). У варіанті з використанням препарату також

спостерігався більш інтенсивний розвиток кореневої системи порівняно з контролем, як і у дослідженні препарату з додаванням срібла. Це може свідчити про те, що препарат на основі хітозану та екстракту водоростей має стимулюючий вплив на розвиток проростків, зокрема ризогенез.



Рис.3.7. Стан посіву насіння квасолі, обробленого препаратом без додавання іонів срібла, контроль – обробка водою через 7 діб після посіву.

Накопичення фотосинтетичних пігментів також відбувалося більш інтенсивно у варіанті з обробкою препаратом, ніж у контролі. Оскільки у цьому дослідженні препарат містив тільки хітозан та екстракт водоростей, стимулюючий ефект на фотосинтетичний апарат, очевидно, справляли саме ці компоненти препарату.

При пророщуванні насіння зазвичай існує небезпека контамінації насіння патогенною флорою, що призводить до зниження схожості насіння. Обробка препаратом із вмістом хітозану могла проявити антимікробні властивості цієї речовини. Таким чином, у порівнянні з контролем, рослини квасолі сорту Пінто, оброблені препаратом Fungimet Alga, демонстрували кращу схожість, активніший розвиток первинних листків і більшу життєздатність. Такий ефект можна пояснити стимулюючим впливом хітозану на фізіологічні процеси у рослин. Відомо, що хітозан може активувати ферментні системи, які беруть

участь у мобілізації запасних поживних речовин насіння. У результаті цього проростки отримують додаткові ресурси для росту і розвитку [21, 53].

Крім того, до складу препарату входить екстракт морських водоростей, який містить природні фітогормони, амінокислоти та мікроелементи. Ці компоненти можуть додатково стимулювати процеси росту рослин та сприяти розвитку кореневої системи.

3.4. Дослідження впливу препарату на основі хітозану на розвиток рослин тютюну в стані біотичного стресу

Хітозан, за численними дослідженнями [10, 11, 12, 21, 51, 53] має виключні властивості посилення опірності рослин впливу стресових умов. Антистресовий ефект хітозану зумовлений його здатністю активувати каскад захисних реакцій на клітинному та організменому рівнях. Виступаючи в ролі сигнальної молекули (еліситора), хітозан індукує експресію оборонних генів, стимулює синтез фітоалексинів, фенольних сполук та специфічних PR-білків. Крім того, обробка хітозаном суттєво посилює активність антиоксидантних ферментів (супероксиддисмутази, каталази, пероксидази), що мінімізує розвиток окиснювального стресу та запобігає деструкції клітинних мембран. Тому представляло інтерес дослідження впливу препарату на рослини, уражені вірусом тютюнової мозаїки (TMV), тобто в стані біотичного стресу.

У досліді використовувалися два варіанти: контрольний варіант — інфіковані рослини без обробки препаратом експериментальний варіант — інфіковані рослини, оброблені препаратом Fungimet Alga.

Обробка проводилася п'ять разів з інтервалами 7–10 днів. Препарат вносили як по листу, так і під корінь, що дозволяло забезпечити комплексний вплив на рослину.

У процесі експерименту проводилися спостереження за розвитком симптомів вірусної інфекції. Рослини тютюну, які використовувалися у досліді,

на момент початку експерименту вже були інфіковані вірусом. На їхніх листках спостерігалися характерні симптоми вірусного ураження, зокрема: мозаїчне забарвлення листків, деформація листкової пластинки, уповільнення росту рослин.

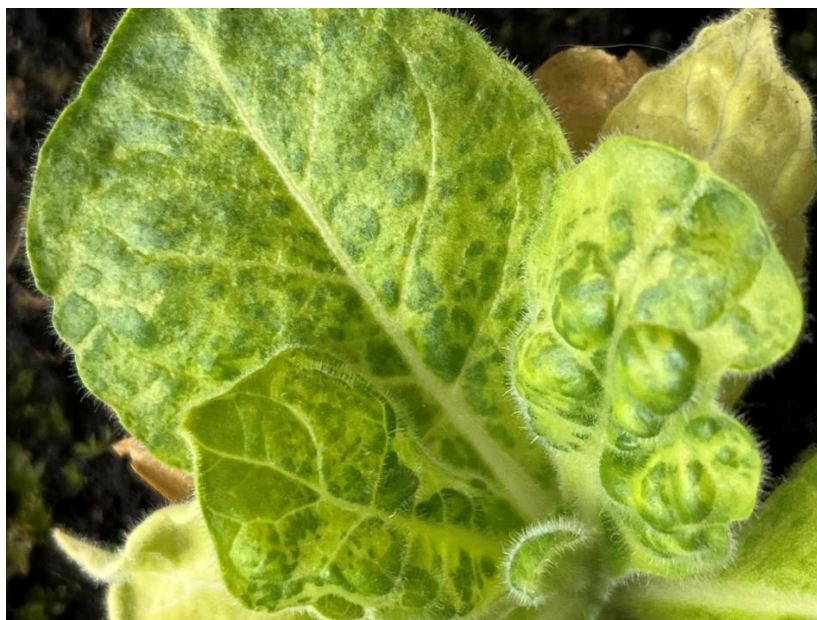


Рис. 3.8 – Прояв симптомів вірусу тютюнової мозаїки на рослинах тютюну.

Крім того, наявність вірусної інфекції саме TMV була підтверджена результатами ІФА (рис. 3.9).

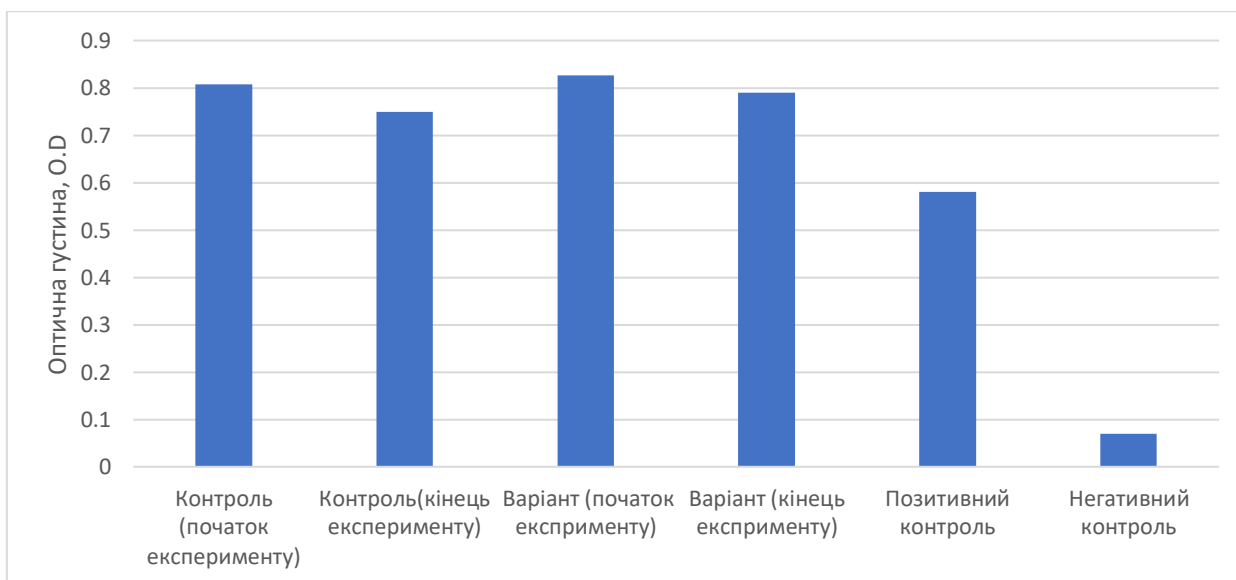


Рис.3.9. Вміст антигенів TMV у контрольних рослинах тютюну та у варіанті з обробкою препарату на початок та на кінець експерименту.

У контрольному варіанті симптоми вірусного ураження зберігалися протягом усього періоду спостереження. На листках рослин спостерігалось характерне мозаїчне забарвлення, яке поступово поширювалося на нові листки (рис. 3.10).



Рис. 3.10. Прояв симптомів вірусу тютюнової мозаїки на рослинах тютюну на початку експерименту.

У рослин, оброблених препаратом, у деяких випадках спостерігалось менш виражене проявлення симптомів вірусної інфекції. Частина нових листків формувалася без характерних мозаїчних плям або з менш інтенсивним проявом симптомів. Також у рослин експериментального варіанту відзначався кращий загальний фізіологічний стан порівняно з контрольними рослинами. Це може свідчити про те, що препарат здатний стимулювати захисні механізми рослин та підвищувати їх здатність протистояти вірусній інфекції.

Хітозан, який входить до складу препарату, відомий як еліситор імунної відповіді рослин. Його дія може призводити до активації різних захисних реакцій, включаючи синтез захисних білків та антиоксидантних ферментів. Антиоксидантні речовини може блокувати дію вільних радикалів (активних

форм кисню), які руйнують рослину під час стресу. У результаті цього рослини можуть частково зменшувати прояв симптомів захворювання (рис. 3.11).



Рис. 3.11. Стан рослин тютюну у варіанті обробки препаратом Fungimet Alga у кінці експерименту.

3.5. Результати дослідження фотосинтетичної активності рослин

Для оцінки фізіологічного стану рослин у дослідженні використовувався метод індукції флуоресценції хлорофілу. Вимірювання проводилися за допомогою приладу «Флоратест», який дозволяє реєструвати індукційні криві флуоресценції та визначати ефективність фотосинтетичного апарату рослин. Після цього проводилася реєстрація індукційної кривої флуоресценції, яка відображає зміну інтенсивності флуоресценції після освітлення листка.

Аналіз кривих індукції флуоресценції хлорофілу (ІФХ) дозволив оцінити функціональний стан фотосинтетичного апарату рослин тютюну за умов вірусної інфекції та з'ясувати характер впливу досліджуваного препарату на основі хітозану (рис.3.12).

Для обох варіантів (контроль та дослід) характерна класична двофазна крива з початковим стрімким підйомом інтенсивності флуоресценції, виходом на плато (максимум) та подальшим повільним спадом (тушінням) флуоресценції. Це свідчить про збереження загальної структурно-функціональної організації фотосистем у процесі розвитку інфекції.

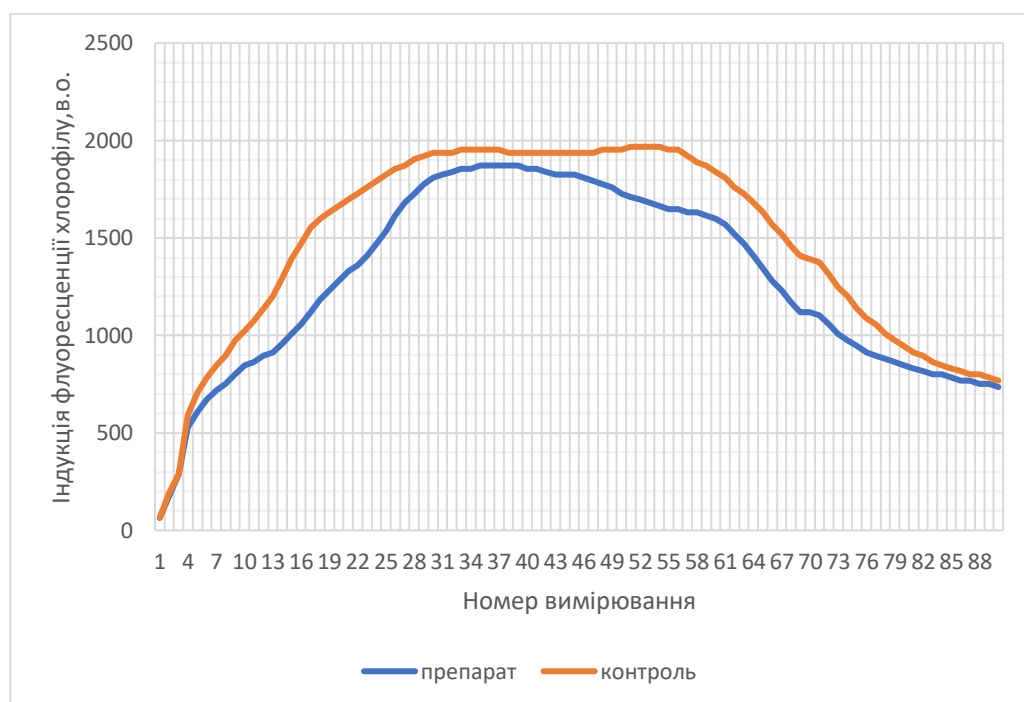


Рис.3.12. Індукція флуоресценції хлорофілу рослин тютюну інфікованих TMV і оброблених препаратом.

Зниження рівня флуоресценції хлорофілу в рослин, оброблених препаратом на основі хітозану, порівняно з необробленим інфікованим контролем, є позитивним проявом і може свідчити про такі процеси:

1. Оптимізація використання світлової енергії. Вірусна інфекція (TMV) зазвичай дезорганізує роботу фотосинтетичного апарату, блокуючи транспорт електронів та знижуючи ефективність фотосистеми II (ФС II). Це призводить до того, що поглинута світлова енергія не витрачається на фотохімічні реакції, а скидається у вигляді надлишкової флуоресценції.

2. Захисна дія хітозану. Нижчий рівень флуоресценції у варіанті з препаратом вказує на те, що хітозан, імовірно, активує механізми адаптації рослини до стресу. Це стимулює ефективніший фотохімічний транспорт електронів або підсилює процеси нефотохімічного тушіння (NPQ), захищаючи тилакоїдні мембрани від фотодеструкції, яку спричиняє вірус.

3. Антисенсибілізуючий ефект. Обробка препаратом сприяє утриманню фотосинтетичної системи у більш збалансованому стані, зменшуючи деструктивний вплив вірусу на хлоропласти.

Хітозан в основі препарату, ймовірно, запускає каскад системних захисних реакцій рослини, що призводить до уповільнення швидкості реплікації та системного транспорту ВТМ по тканинах листка, завдяки чому хлоропласти зазнають меншої деструкції. Також ймовірна активація антиоксидантного захисту, який нівелює дію активних форм кисню (АФК), що масово утворюються в клітинах під час вірусної інфекції й атакують мембрани тилакоїдів. Підтримка структурної цілісності комплексів ФС II забезпечує ефективне перетворення поглинутих квантів світла у хімічну енергію (АТФ та НАДФН) замість їх розсіювання у вигляді надлишкового тепла чи флуоресценції.

3.6. Узагальнення та обговорення отриманих результатів

Аналіз результатів проведених досліджень дозволяє зробити висновок, що застосування препарату на основі хітозану може впливати на різні процеси розвитку рослин. На етапі проростання насіння було встановлено, що обробка насіння препаратом може сприяти формуванню більш розвиненої кореневої системи та стимулювати розвиток проростків. У вегетаційний період рослини, які піддавалися обробці препаратом, у багатьох випадках характеризувалися більш інтенсивним ростом та кращим загальним фізіологічним станом. У дослідях із вірусною інфекцією було встановлено, що застосування препарату може зменшувати прояв симптомів вірусного ураження та покращувати стан рослин.

Результати дослідження фотосинтетичної активності також свідчать про можливий позитивний вплив препарату на функціонування фотосинтетичного апарату рослин. Отримані результати узгоджуються з даними літератури, у яких зазначається, що хітозан може виступати у ролі еліситора імунної відповіді рослин та стимулювати різні захисні механізми [2, 11, 12, 21].

ВИСНОВКИ ТА ПРОПЗИЦІЇ

1. Проаналізовано літературні дані щодо використання хітозану у біотехнології рослин. Встановлено його роль як елісатора імунної відповіді та індуктора захисних реакцій рослин.
2. Препарат не впливав суттєво на відсоток проростання насіння, проте стимулював розвиток проростків, формування кореневої системи та ризогенез. Довжина кореня у сої та кукурудзи перевищувала контроль у 1,5–2,5 рази, а у проростків спостерігалось інтенсивніше накопичення хлорофілу.
3. Передпосівна обробка суттєво підвищила лабораторну схожість насіння: для квасолі показник зріс на 34% (у 1,8 рази), для сої — на 30% (у 1,5 рази) порівняно з контролем. Оброблені рослини сходили на 5–7 днів раніше та випереджали контрольні варіанти у розвитку протягом вегетації.
4. Препарат без додавання срібла продемонстрував високу ефективність, забезпечивши схожість квасолі у ґрунті на рівні 89% проти 37% у контролі. Також підтверджено, що саме хітозан та екстракт водоростей є ключовими стимуляторами ризогенезу та накопичення фотосинтетичних пігментів.
5. Обробка інфікованих TMV рослин зменшувала прояв симптомів вірусної інфекції та покращувала фізіологічний стан рослин. Аналіз флуоресценції хлорофілу показав покращення функціонування фотосинтетичного апарату та ефективніше використання світлової енергії.

ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

На основі результатів проведених досліджень можна запропонувати такі практичні рекомендації щодо використання біопрепаратів на основі хітозану у рослинництві.

1. Біопрепарати на основі хітозану можуть застосовуватися для передпосівної обробки насіння, що дозволяє стимулювати проростання насіння та сприяти формуванню більш розвиненої кореневої системи проростків.
2. Замочування насіння у розчинах препаратів на основі хітозану протягом 24 годин може сприяти покращенню початкових етапів розвитку рослин.
3. Використання препаратів на основі хітозану у вегетаційний період шляхом обприскування листової поверхні може стимулювати ріст рослин та покращувати їх фізіологічний стан.
4. Регулярні обробки рослин препаратами на основі хітозану можуть сприяти підвищенню їх стійкості до різних стресових факторів.
5. Біопрепарати, що містять хітозан та екстракти морських водоростей, можуть використовуватися як компоненти систем екологічно безпечного захисту рослин.
6. Застосування таких препаратів може бути перспективним для підвищення стійкості рослин до вірусних інфекцій.
7. Подальші дослідження у цьому напрямку можуть бути спрямовані на оптимізацію концентрацій препаратів, визначення оптимальних строків обробки рослин та вивчення механізмів дії хітозану на молекулярному рівні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Badawy, M. E. I., & Rabea, E. I. (2011). A biopolymer chitosan and its derivatives as promising antimicrobial agents against plant pathogens and their applications in crop protection. *International Journal of Carbohydrate Chemistry*, 2011, 460381. <https://doi.org/10.1155/2011/460381>
2. Boller, T., & Felix, G. (2009). A renaissance of elicitors: Perception of microbe-associated molecular patterns and danger signals by pattern-recognition receptors. *Annual Review of Plant Biology*, 60, 379–406. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.57.032905.105346>
3. Brown, P., & Saa, S. (2015). Biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 6, 671. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00671>
4. Bulgari, R., Franzoni, G., & Ferrante, A. (2019). Biostimulants application in horticultural crops under abiotic stress conditions. *Agronomy*, 9(6), 306. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060306>
5. Calvo, P., Nelson, L., & Kloepper, J. W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, 383, 3–41. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>
6. Craigie, J. S. (2011). Seaweed extract stimuli in plant science and agriculture. *Journal of Applied Phycology*, 23, 371–393. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9560-4>
7. du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>
8. El Hadrami, A., Adam, L. R., El Hadrami, I., & Daayf, F. (2010). Chitosan in plant protection. *Marine Drugs*, 8(4), 968–987. <https://doi.org/10.3390/md8040968>

9. Hadwiger, L. A. (2013). Multiple effects of chitosan on plant systems: Solid science or hype. *Plant Science*, 208, 42–49. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2013.03.007>
10. Hadwiger, L. A. (2015). Anatomy of a nonhost disease resistance response of pea to *Fusarium solani*. *Frontiers in Plant Science*, 6, 373. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00373>
11. Hull, R. (2014). *Plant Virology* (5th ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-64878-3>
12. Iriti, M., & Faoro, F. (2009). Chitosan as a MAMP, searching for a PRR. *Plant Signaling & Behavior*, 4(1), 66–68. <https://doi.org/10.4161/psb.4.1.7427>
13. Jones, J. D. G., & Dangl, J. L. (2006). The plant immune system. *Nature*, 444(7117), 323–329. <https://doi.org/10.1038/nature05286>
14. Khan, W., Rayirath, U. P., Subramanian, S., et al. (2009). Seaweed extracts as biostimulants of plant growth and development. *Journal of Plant Growth Regulation*, 28, 386–399. <https://doi.org/10.1007/s00344-009-9103-x>
15. Kong, M., Chen, X. G., Xing, K., & Park, H. J. (2010). Antimicrobial properties of chitosan and mode of action: A state of the art review. *International Journal of Food Microbiology*, 144(1), 51–63. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2010.09.012>
16. Li, B., Wang, X., Chen, R., Huangfu, W., & Xie, G. (2008). Antibacterial activity of chitosan solution against *Xanthomonas pathogenic bacteria*. *Carbohydrate Polymers*, 72(2), 287–292. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.08.014>
17. Lucas, W. J. (2006). Plant viral movement proteins: Agents for cell-to-cell trafficking of viral genomes. *Virology*, 344(1), 169–184. <https://doi.org/10.1016/j.virol.2005.09.026>

18. Malerba, M., & Cerana, R. (2016). Chitosan effects on plant systems. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(7), 996. <https://doi.org/10.3390/ijms17070996>
19. Mandahar, C. L. (2006). *Plant Viruses: Principles and Applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-0728-8>
20. Moffett, P. (2009). Mechanisms of recognition in dominant R gene mediated resistance. *Advances in Virus Research*, 75, 1–33. [https://doi.org/10.1016/S0065-3527\(09\)07501-0](https://doi.org/10.1016/S0065-3527(09)07501-0)
21. Nelson, R. S., & Citovsky, V. (2005). Plant viruses: Invaders of cells and pirates of cellular pathways. *Plant Physiology*, 138(4), 1809–1814. <https://doi.org/10.1104/pp.105.061614>
22. Pieterse, C. M. J., Van der Does, D., Zamioudis, C., et al. (2012). Hormonal modulation of plant immunity. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, 28, 489–521. <https://doi.org/10.1146/annurev-cellbio-092910-154055>
23. Pieterse, C. M. J., Zamioudis, C., Berendsen, R. L., et al. (2014). Induced systemic resistance by beneficial microbes. *Annual Review of Phytopathology*, 52, 347–375. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102340>
24. Rabea, E. I., Badawy, M. E. T., Stevens, C. V., et al. (2003). Chitosan as antimicrobial agent: Applications and mode of action. *Biomacromolecules*, 4(6), 1457–1465. <https://doi.org/10.1021/bm034130m>
25. Rinaudo, M. (2006). Chitin and chitosan: Properties and applications. *Progress in Polymer Science*, 31(7), 603–632. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.06.001>
26. Rouphael, Y., & Colla, G. (2020). Biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 11, 40. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00040>

27. Scholthof, K. B. G. (2004/2005 edition). Tobacco mosaic virus: A model system for plant biology. *Annual Review of Phytopathology*, 42, 13–34. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.42.040803.140223>
28. Scholthof, K. B. G., Adkins, S., Czosnek, H., et al. (2011). Top 10 plant viruses in molecular plant pathology. *Molecular Plant Pathology*, 12(9), 938–954. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2011.00752.x>
29. Sharma, H. S. S., Fleming, C., Selby, C., et al. (2014). Plant biostimulants: A review on the processing of macroalgae and use of extracts. *Journal of Applied Phycology*, 26, 465–490. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-0101-9>
30. Van Loon, L. C., Rep, M., & Pieterse, C. M. J. (2006). Significance of inducible defense-related proteins in infected plants. *Annual Review of Phytopathology*, 44, 135–162. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.44.070505.143425>
31. Walters, D., Ratsep, J., & Havis, N. D. (2013). Controlling crop diseases using induced resistance. *Frontiers in Plant Science*, 4, 407. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00407>
32. Yakhin, O. I., Lubyantsev, A. A., Yakhin, I. A., & Brown, P. H. (2017). Biostimulants in plant science. *Frontiers in Plant Science*, 7, 2049. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02049>
33. Zipfel, C. (2014). Plant pattern-recognition receptors. *Trends in Immunology*, 35(7), 345–351. <https://doi.org/10.1016/j.it.2014.05.004>
34. Zhao, X., She, X., Du, Y., et al. (2007). Induction of antiviral resistance and stimulatory effect by oligochitosan in tobacco. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 87(1), 78–84. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2006.06.005>

35. Maxwell, K., & Johnson, G. N. (2000/used in modern studies). Chlorophyll fluorescence—A practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 51(345), 659–668. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.345.659>
36. Baker, N. R. (2008). Chlorophyll fluorescence: A probe of photosynthesis in vivo. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 89–113. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092759>
37. Stirbet, A., & Govindjee. (2011). On the relation between the Kautsky effect and photosystem II. *Journal of Photochemistry and Photobiology B*, 104(1–2), 236–257. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2010.12.010>
38. Brestic, M., & Zivcak, M. (2013). PSII fluorescence techniques for measurement of drought and high temperature stress signal in crop plants. *Journal of Plant Physiology*, 170(16), 1391–1400. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.05.024>
39. Taran, O., Turzin, I., & Shulga, P. (2025). Differential effect of the biopreparation Fungimet Alga on seed germination and universal improvement of photosynthetic efficiency in plants. *Brussels Conference Proceedings*, 2025.
40. Турзін, І., & Таран, О. (2025). Вплив біопрепарату Fungimet Alga на проростання насіння рослин. *Матеріали студентської наукової конференції НУБіП України*.
41. Conrath, U. (2011). Molecular aspects of defence priming. *Trends in Plant Science*, 16(10), 524–531. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2011.06.004>
42. Pastor, V., Luna, E., Mauch-Mani, B., Ton, J., & Flors, V. (2013). Primed plants do not forget. *Environmental and Experimental Botany*, 94, 46–56. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.02.013>
43. Корнеев Д.Ю. Информационные возможности метода индукции флуоресценции хлорофилла. - К.: “Альтерпрес”, 2002. - 188 с.
44. EPPO. (2025). PM 7/125 (2) ELISA tests for viruses. EPPO Bulletin, 55(1), 66–72. <https://doi.org/10.1111/epp.13071>

45. Minh N., van Hoa N., Trung T. (2020). Handbook of Chitin and Chitosan. Vol. 1. Elsevier; Amsterdam, The Netherlands: Preparation, properties, and application of low-molecular-weight chitosan; pp. 453–471, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817970-3.00015-8>
46. Román-Doval R., Torres-Arellanes S.P., Tenorio-Barajas A.Y., Gómez-Sánchez A., Valencia-Lazcano A.A. (2023). Chitosan: properties and its application in agriculture in context of molecular weight. *Polymers (Basel)*.15(13):2867. doi: 10.3390/polym15132867
47. Santos Teixeira J.A., Ten Tusscher K.H. (2019) The Systems Biology of Lateral Root Formation: Connecting the Dots. *Mol Plant*. 3;12(6):784-803. doi: 10.1016/j.molp.2019.03.015.
48. Lopez-Moya F., Suarez-Fernandez M., Lopez-Llorca L.V. (2019) Molecular mechanisms of chitosan interactions with fungi and plants. *Int J Mol Sci* 20(2):332. <https://doi.org/10.3390/ijms20020332>
49. Матвєєва Н.А., Дуплій В.П., Ратушняк Я.І. Особливості дії наночастинок срібла на ріст і біоактивність рослин *Bidens pilosa* L. *Фізіологія рослин і генетика* 2025, том 57, № 4, 348-358, doi: <https://doi.org/10.15407/frg2025.04.348>
50. Cao Y, Yan R, Sun M, Guo J, Zhang S. (2025) Effects of exogenous chitosan concentrations on photosynthesis and functional physiological traits of hibiscus under salt stress. *BMC Plant Biol*. 25(1):419. doi: 10.1186/s12870-025-06424-x.