

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет захисту рослин біотехнології та екології

ПОГОДЖЕНО
Декан факультету захисту рослин,
біотехнологій та екології

_____ **Юлія КОЛОМІЄЦЬ**
(підпис)

«__» _____ 2026 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри фізіології, біохімії
рослин та біоенергетики

_____ **Світлана ПРИЛУЦЬКА**
(підпис)

«__» _____ 2026 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Фізіологічні аспекти формування урожайності вівса звичайного за дії антистресантів»

Спеціальність **«162 Біотехнологія та біоінженерія»**

Освітньо – професійна програма **«Біотехнології та біоінженерії»**

Гарант освітньої програми
кандидат біологічних наук, доцент

_____ **Олена КВАСКО**
(підпис)

**Керівник бакалаврської
кваліфікаційної роботи**

кандидат сільськогосподарських наук,
доцент

_____ **Наталія НЕСТЕРОВА**
(підпис)

Виконав

_____ **Богдан БУЛАХОВ**
(підпис)

КИЇВ - 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет захисту рослин біотехнології та екології

Затверджую
Завідувач кафедри
фізіології, біохімії рослин та біоенергетики
доктор біологічних наук, професор _____ Світлана ПРИЛУЦЬКА
“ _____ ” _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА ВИКОНАННЯ БАКАЛАВРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ
РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ
Булахову Богдану Вадимовичу

Спеціальність «162 Біотехнологія та біоінженерія»

Освітньо – професійна програма «Біотехнологія та біоінженерія»

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи

«Фізіологічні аспекти формування урожайності вівса звичайного за дії
антистресантів»

Затверджена наказом від «30» жовтня 2025 року №2596 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру «22» травня 2026 р.

Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи: Овес звичайний (*Avena sativa* L.) сорту (Скарб України), Модельований дефіцит вологи (посуха) та нафтове забруднення ґрунту, вегетаційні та мультиспектральні індекси (на основі даних БПЛА), модифіковане рівняння Моно для моделювання росту рослин.

Перелік питань, що підлягають дослідженню: Експериментальні матеріали лабораторних та польових дослідів, результати мультиспектральної зйомки посівів з використанням БПЛА, наукові публікації з Web of Science.

Дата видачі завдання «30» жовтня 2025 р.

Керівник
бакалаврської
кваліфікаційної
роботи

(підпис)

Наталія НЕСТЕРОВА

Завдання взяв до
виконання

(підпис)

Богдан БУЛАХОВ

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Фізіологічні аспекти, формування, урожайності, вівса звичайного, за дії антистресантів»:

Мета дослідження: встановити вплив сучасних антистресових препаратів на фізіологічні показники та процеси формування продуктивності вівса звичайного (*Avena sativa* L.) в умови змінного клімату.

Об'єкт дослідження: фізіологічні та морфологічні показники вівса звичайного (*Avena sativa* L.) за дії антистресантів (амінокислотних комплексів, гуматів та хелатних мікродобрив).

Предмет дослідження: антистресанти, аквапорини, ефект stay-green, фотосинтетична активність, дистанційний моніторинг (БПЛА), урожайність вівса звичайного.

Методи дослідження: фізіологічні (аналіз водного гомеостазу та функціонування аквапоринів, оцінка тривалості фотосинтезу), цифрові (дистанційне зондування за допомогою БПЛА, розрахунок вегетаційних індексів), біохімічні (визначення вмісту хлорофілу та активності ферментів антиоксидантного захисту) та статистичні (кореляційний аналіз, візуальних даних).

Цифрові та ГІС-технології (дистанційне зондування посівів за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА), спектральний аналіз відбивної здатності, розрахунок та картографування вегетаційних індексів NDVI, MTCI);

Біохімічні (визначення вмісту основних фотосинтетичних пігментів – хлорофілів *a*, *b* та каротиноїдів, спектрометричний аналіз активності ключових ферментів антиоксидантного захисту);

Статичний (кореляційний аналіз отриманих числових масивів, математичне моделювання кінетики росту, статистична обробка візуальних даних дистанційного зондування).

ABSTRACT

Bachelor's Thesis Explanatory Note «Physiological Aspects of Yield Formation in Common Oat Under the Action of Antistress Agents»

Research Objective: to determine the effect of modern antistress preparation on the physiological parameters and yield formation processes of common oat (*Avena sativa L.*) under changing climate conditions.

Object of Research: physiological and morphological parameters of common oat (*Avena sativa L.*) under the action of antistress agents (amino acid complexes, humates, and chelated micronutrient fertilizers).

Subject of Research: antistress agents, aquaporins, stay-green effect, photosynthetic activity, remote monitoring (UAV), and common oat yield.

Research Methods: physiological (analysis of water homeostasis and aquaporin functioning, evaluation of photosynthesis duration), digital (remote sensing via UAV, calculation of vegetation indices), biochemical (determination of chlorophyll content and antioxidant defense enzyme activity), and statistical (correlation analysis of visual data).

Digital and GIS technologies (remote sensing of crops using unmanned aerial vehicles (UAVs), spectral analysis of reflectance, calculation and, mapping of vegetation indices NDVI, MTCI);

Biochemical (determination of main photosynthetic pigments content including chlorophylls *a*, *b* and carotenoids, spectrophotometric analysis of the activity of key antioxidant defense enzymes);

Statistical (correlation analysis of the obtained datasets, mathematical modeling of growth kinetics, and statistical processing of remote sensing visual data).

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	9
1.1 Господарське значення та біоморфологічні особливості вівса звичайного (<i>Avena sativa</i> L.)	9
1.2. Фізіолого-біохімічні реакції зернових культур на дію несприятливих абіотичних чинників.	11
1.3. Характеристика та досвід застосування сучасних антистресантів і регуляторів росту у рослинництві	20
1.4. Механізми регуляції водного балансу та стан фотосинтетичного апарату рослин за дії біостимуляторів	22
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДІСЛІДЖЕНЬ.....	29
2.1. Об'єкт дослідження та його характеристика	29
2.2. Характеристика антистресових препаратів та схеми їх застосування	30
2.3. Методи фізіологічних досліджень та дистанційного моніторингу (БПЛА).....	32
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	34
3.1. Оцінка фізіологічного стану посівів вівса звичайного за вегетаційними індексами	34
3.2. Формування показників індивідуальної продуктивності вівса за дії антистресантів	35
3.3. Кореляційний зв'язок між фізіологічними параметрами та врожайністю культури	36
ВИСНОВКИ.....	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	45
ДОДАТКИ	50

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

CV – Сорти

PL – Чисті лінії

LR – Народні раси

Aveneae – Овес

Triticeae – Пшениця, ячмінь

BUSCO – Оцінка повноти зібраного транскриптому

FPKM – Розподіл рівнів експресії генів

PIP(Plasma membrane Intrinsic Proteins) – Плазматичні мембранні внутрішні білки

TIP – Тонопластні внутрішні білки

SIP – Малі основні внутрішні білки

NIP – Вузлові 26-подібні внутрішні білки

SPAD – Вмісту хлорофілу

TAG – Триацилгліцерот

LAI – Індекс листової поверхні

NDRE - (Normalized Difference Red Edge Index),

CIG - (Chlorophyll Index Green)

MCARI - (Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index)

QTL – Аналіз та геномну селекцію

SG – stay-green

EVT – Екологічне випробування сортів

ABA – Абсцизової кислоти

MDA – Малондіальдегід

Tr – Швидкість транспірації

Gs – Продихову провідність

ВСТУП

Актуальність досліджень: Кліматичні зміни призводять до зростання інтенсивності посухи та високотемпературних стресів, що суттєво впливає на врожайність сільськогосподарських культур, таких як овес звичайний, який є важливою зернофуражною та дієтичною культурою. Пошук ефективних методів підвищення стійкості рослин до абіотичних стресорів є пріоритетним завданням для забезпечення продовольчої безпеки. Використання сучасних антистресових препаратів та біостимуляторів є перспективним напрямом, який дозволяє поліпшити фізіологічний стан рослин та мінімізувати втрати врожаю.

Потенціал застосування антистресантів за умови інтеграції у сфері рослинництва:

1. Створення та застосування комплексних препаратів для посилення адаптивного потенціалу рослин;
2. Загальне скорочення втрат продуктивності завдяки впровадженню стимуляторів росту на основі амінокислот та гуматів;
3. Посилення стійкості вівса звичайного до дії абіотичних стресів та підвищення якості зерна за допомогою корекції фізіологічних процесів.

Метою дослідження було дослідження впливу антистресових препаратів на фізіологічні характеристики та формування врожайності вівса звичайного (*Avena sativa* L.).

Об'єктом дослідження були фізіологічні показники та елементи продуктивності вівса звичайного (*Avena sativa* L.) за дії антистресантів в умовах глобальних змін клімату.

Предметом дослідження були механізми адаптації вівса звичайного (*Avena sativa* L.), стан фотосинтетичного апарату та показники врожайності за дії біостимуляторів.

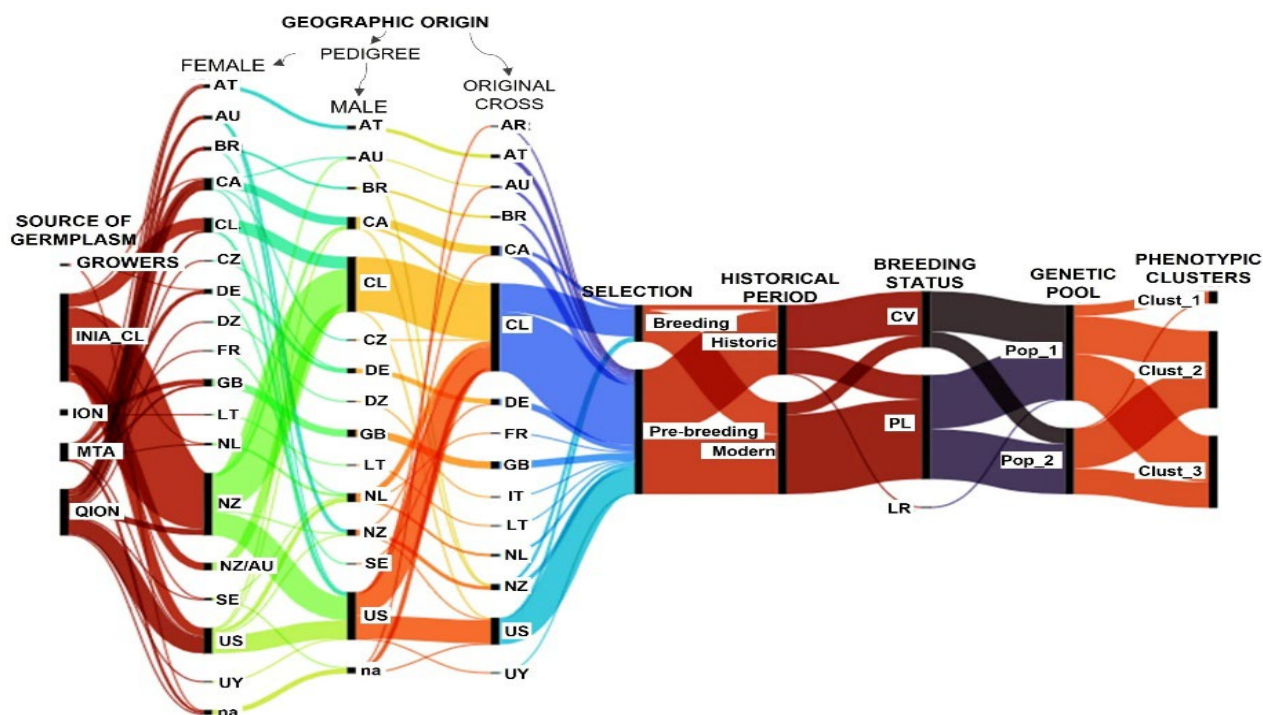
Методи дослідження: фізіологічні, спектрофотометричні, цифрові (дистанційний моніторинг стану посівів за допомогою БПЛА) та методи статистичної обробки отриманих даних.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Господарське значення та ботанічна характеристика вівса посівного

Овес (*Avena sativa* L.) займає вагоме місце у світовому та вітчизняному зерновиробництві як універсальна культура, що має високу продовольчу, кормову, технічну цінність. Сучасний етап розвитку ринку вівса в Україні характеризується значним впливом енергетичної кризи з (2021-2023 рр.), яка через підвищення цін на природний газ та мінеральні добрива суттєво збільшила собівартість продукції. Ці чинники створюють додаткові ризики для конкурентоспроможності українських виробників, створення стратегічних рішень для оптимізації витрат та збереження експортного потенціалу. Економетричне моделювання дозволяє прогнозувати розвиток ринку вівса до 2030 року, що є критичним для забезпечення продовольчої безпеки та економічної стабільності аграрного сектору України [2].

Овес є стратегічно важливою культурою завдяки своїм високим харчовим властивостям, а саме зниженню рівня холестерину, а також значному експортному потенціалу. Але наявна проблема яка стосується стабільного виробництва в умовах глобальних кліматичних змін, це низьке генетичне різноманіття, яке спостерігається у багатьох регіонах вирощування. Дослідження колекції зародкової плазми дозволяє виявити фенотипові та генетичні особливості, які створюють нові, адаптивніші сорти (мал. 1.0) [19].



Малюнок 1.0. Взаємозв'язки генотипів вівса (*Avena sativa* L.) відповідно до їх географічного походження та схем угруповання [19].

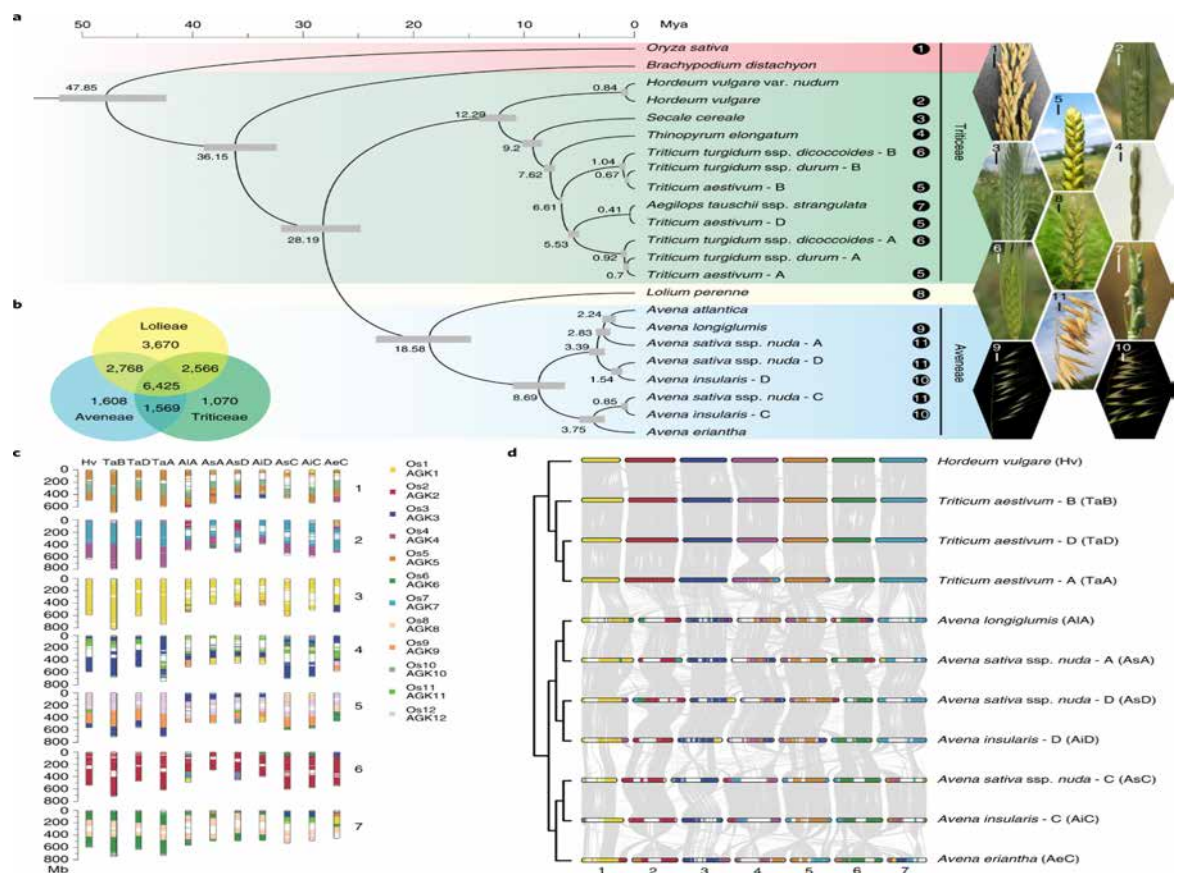
Для аналізу взаємозв'язків між генотипами вівса була використана алювіальна діаграма, яка відображає їх походження, географічну приналежність та структуру угруповань. На діаграмі показано як об'єднуються дані щодо матеріалів з міжнародних розплідників а саме QION, ION), також ліній, отриманих за угодами про передачу матеріалів (MTA). І генотипи, які були вивчені, було класифіковано за селекційним статусом: сорти (CV), чисті лінії (PL), народні раси (LR).

Діаграма характеризує охоплення 15 країн, включаючи провідних виробників, таких як Чилі, США та Канада, а також європейські та азійські колекції. Також можна виділити чилійський матеріал, який було сформовано шляхом селекції з використанням різноманітних інтродуктивних ліній [19].

1.2. Фізіолого-біохімічні реакції зернових культур на дію несприятливих абіотичних чинників

Якщо розглядати сучасні уявлення про реакцію вівса на абіотичні чинники, то вони базуються на розумінні його складної генетичної природи. Беручи до уваги результати повногеномного секвенування, овес посівний (*Avena sativa* L.) характеризується унікальною аллогексаплоїдною структурою, яка була сформована в процесі еволюції та адаптації до мінливих умов довкілля.

Також варто зазначити, що високу екологічну пластичність культури зумовлює наявність трьох специфічних підгеномів. Завдяки цьому рослина спроможна ефективно перемикає метаболічні шляхи при виникненні термічного або водного стресу, що сильно впливає на темпи проходження фенологічних фаз та загальну продуктивність агроценозу [25].

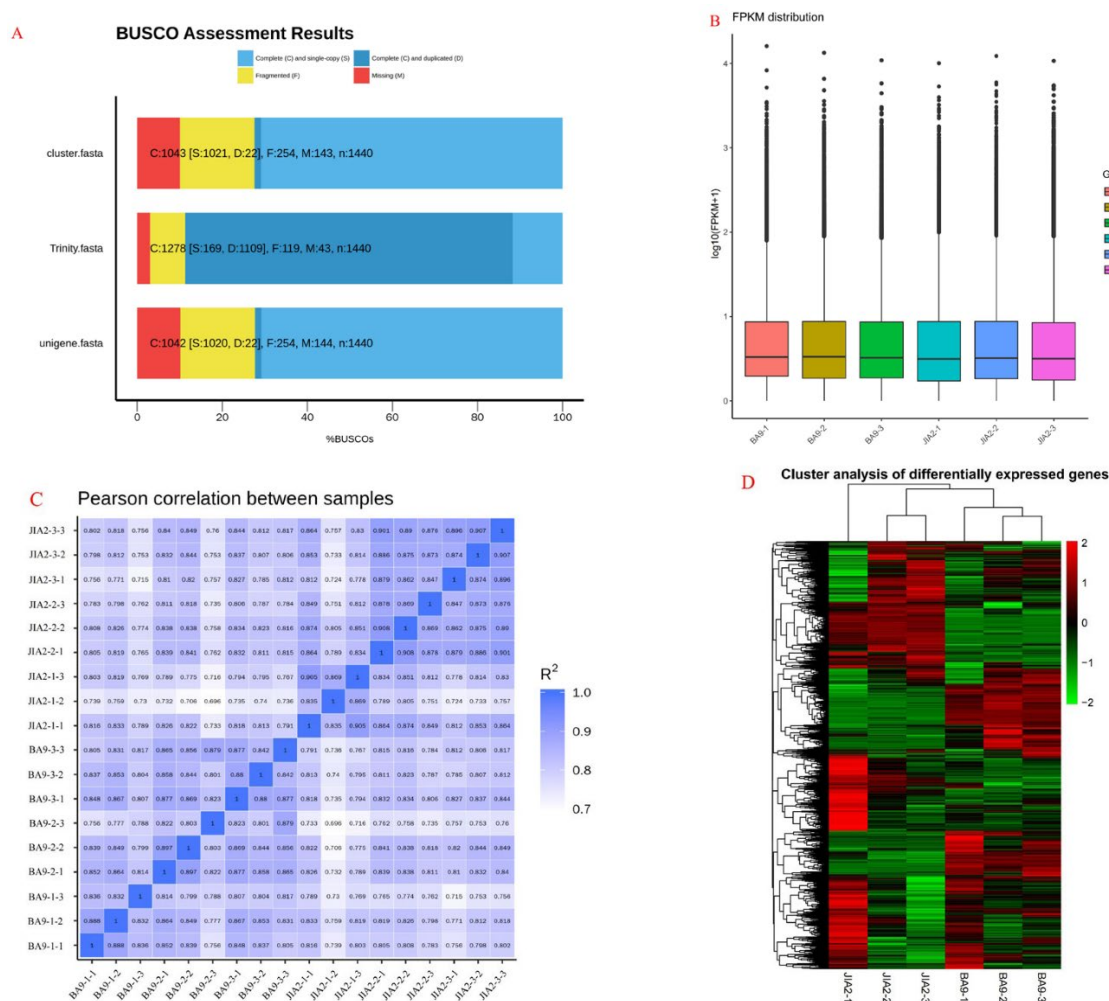


Малюнок 1.1. Еволюційне походження та порівняльна характеристика геномів злакових культур за даними Nature Genetics [25].

Порівняльний аналіз геномів, зображений на малюнку 1.1. демонструє близьку спорідненість вівса з іншими представниками родини злакових, але також варто зазначити, що виявляє унікальні хромосомні перебудови, що відповідають за його специфічну стійкість до несприятливих факторів. Філогеномний аналіз показує, що різниця між трибами *Aveneae* (овес) та *Triticeae* (пшениця, ячмінь) відбулася приблизно 28,2 млн. років тому. Доведено, що овес має 1608 специфічних генних родин, пов'язаних із реакцією на фітогормони та активністю факторів транскрипції, є великою унікальністю в його еволюційного шляху [25].

Для вивчення адаптації вівса до посухи мають проводитися сучасні мультиоміксні дослідження. Згідно з даними за 2025 рік, молекулярні механізми відповіді *Avena sativa* L. на дефіцит вологи включають складні метаболічні шляхи, що спрямовані на стабілізацію клітинних структур та синтез специфічних захисних білків.

При використанні інтегрованого аналізу геномних та метаболомних даних, дозволило ідентифікувати ключові локуси, які відповідають за посухостійкість культури. Саме це підтверджує, що реакція рослини на абіотичний стрес не є лінійною, а являє собою багаторівневу систему захисту. Вона активується на ранніх етапах розвитку для мінімізації негативного впливу зовнішнього середовища [6].



Малюнок 1.2. На малюнку зображено графічні дані, які ілюструють результати оцінки якості аналізу та закономірність диференційної експресії геному у різних за стійкістю сортів вівса залежно від рівня забезпеченості вологою [6].

Сучасні методи інтегрованого аналізу дозволяють візуалізувати складність реакції геному вівса на дефіцит води [6]. На малюнку 1.2 демонструють зміну активності різних груп генів у відповідь на стрес. При високій корекції між біологічними повторами є виявлення молекулярних маркерів посухостійкості, які дозволяють відкривати нові можливості для застосування захисних препаратів.

Результатами мультиоміксного аналізу відповіді вівса на посуху наведено на малюнку 1.2. [6].

A – оцінка повноти зібраного транскриптому (BUSCO).

B – розподіл рівнів експресії генів (FPKM).

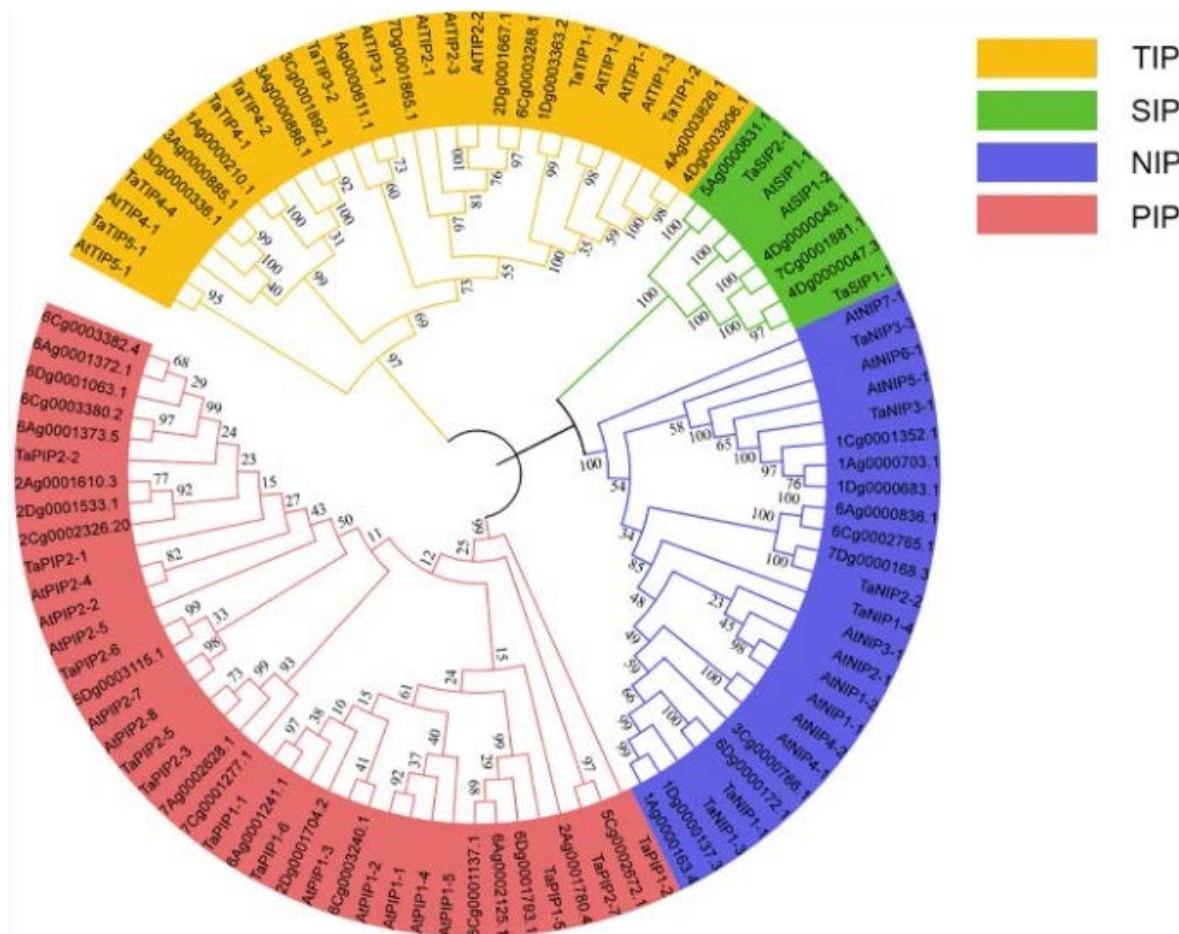
C – кореляційна матриця Пірсона між дослідними зразками.

D – теплокарта кластерного аналізу генів з різним рівнем експресії.

Отже, аналіз фізіологічних реакцій вівса, а саме на дефіцит вологи, характеризується глибокою перебудовою метаболізму, що спрямована на збереження життєздатності рослини. Так, у дослідженні Xie et al. [32], головними змінами є зниження продихової провідності та інтенсивності фотосинтезу, що керує здатністю генотипу підтримувати водний баланс.

Деталізація даних щодо молекулярного рівня, свідчить, що цей процес регулюється родиною генів аквапоринів. Зовсім новий повногеномний аналіз *Avena sativa* L. [34], виявив специфічну групу білків – транспортерів. Наприклад, в період гострого осмотичного стресу білки – транспортери активуються, забезпечують перерозподіл вологи між тканинами. Для підтримки природних механізмів та нівелювання негативних наслідків оксидативного стресу, варто застосовувати екзогенні антистресанти [18].

Аналіз філогенетичних зв'язків аквапоринів *Avena sativa* L. дозволило встановити високу консервативність білків групи PIP (Plasma membrane Intrinsic Proteins або Плазматичні мембранні внутрішні білки). Вони відіграють вирішальну роль у швидкому гідравлічному регулюванні. Також доведено, що за умов осмотичного стресу рівень транскрипції окремих генів цієї родини зростає у 3,5-5 разів, що в свою чергу забезпечує стабільність водного потенціалу листків [34]. Функціонування цих молекулярних каналів дуже тісно корелює з інтенсивністю транспірації та ефективністю використання вологи, і є фізіологічним підґрунтям для формування врожаю в посушливих умовах [32, 34].



Малюнок 1.3. Філогенетичне дерево родини білків-аквапоринів вівса *Avena sativa* L.

На малюнку 1.3 зображено розподіл ідентифікованих генів на основні підродини: TIP (Тонопластні внутрішні білки), SIP (малі основні внутрішні білки), NIP (вузлові 26-подібні внутрішні білки), PIP (плазматичні мембранні внутрішні білки). Також відмічено кольорове маркування, воно позначає функціональну диференціацію каналів, що забезпечують вибіркового транспорту води та розчинених речовин у клітинах [34].

Також, слід зазначити, що окрім клітинного транспорту вологи, важливою ознакою для вівса є здатність до тривалого збереження інтенсивно зеленого кольору листків під назвою *stay-green trait*. За його допомогою рослина продовжує процес фотосинтезу навіть за умови дефіциту вологи, що позитивно впливає на врожайність та якість сировини кормової маси [8].

Сучасні технології стимуляції росту вівса базуються на розумінні молекулярної будови культури. Так, встановлено, що вівсу притаманна розгалужена система аквапоринів а саме 45 специфічних генів, які регулюють пропускну здатність клітинних мембран до води [34]. Тобто, найперспективнішим класом антистресантів на сьогодні є препарати на основі вільних амінокислот.

Огляди 2026 року [27] свідчать, що позакореневе внесення метаболітів, як пролін та гліцин-бетаїн, виступає ключовою стратегією пом'якшення абіотичного стресу. Ці сполуки не лише стабілізують роботу вищеописаних аквапоринів, запобігаючи деградації ферментативних систем під час тривалої посухи, а й підтримують осмотичний тиск у клітині [34, 21]. Виходячи з цього можна сказати, що такий комплексний вплив, дозволяє рослині підтримувати інтенсивність обміну речовин навіть при несприятливих температурних умов.

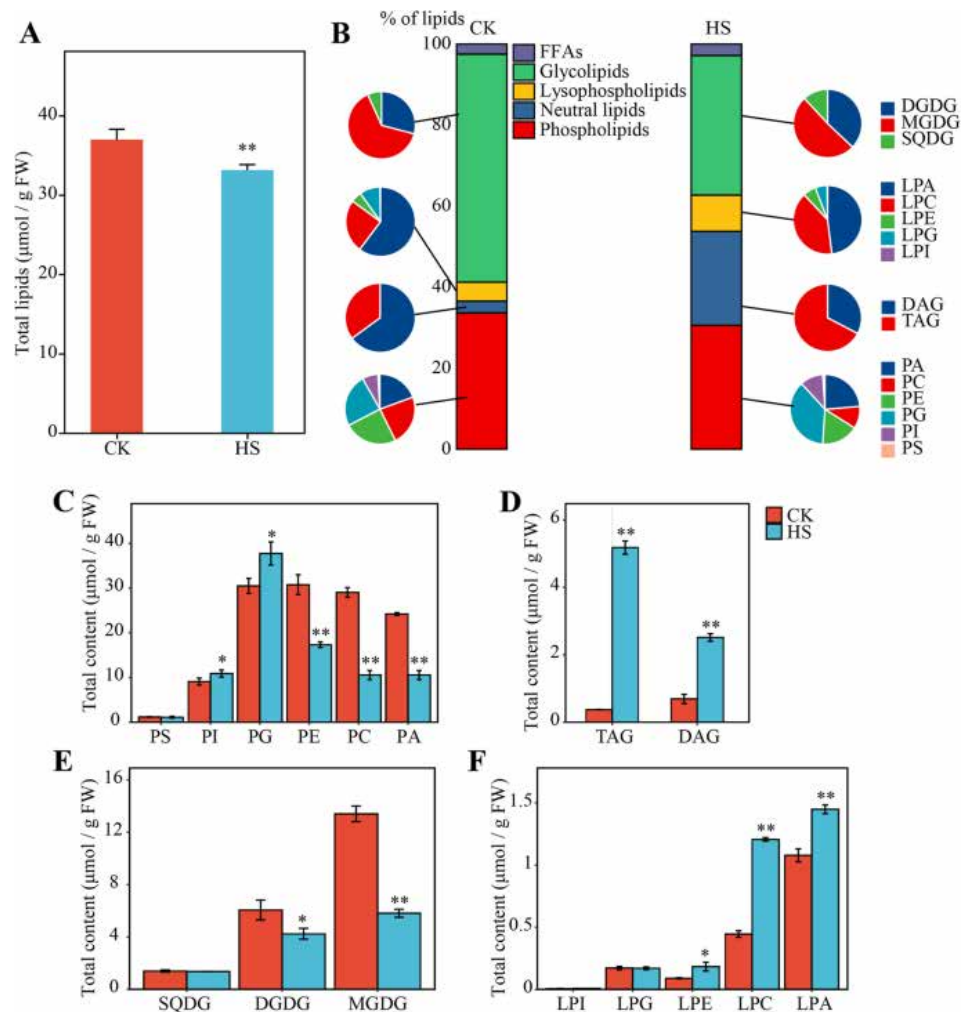
Польові дослідження реакцій вівса (*Avena sativa* L.) до умов водного стресу, що були проведені в Іраку, підтвердили, що обмеження доступної вологи є головним чинником для формування врожайності. Експерименти, у яких рівень водного дефіциту був від 50% – 70%, показали, що при зменшенні доступної води на 50% дозволяє зберегти кращі показники росту наприклад: висоту рослини, вміст хлорофілу до (48,58 SPAD) та відносний вміст води. Однак, сильніший водний стрес (70%) призводить до критичного зниження продуктивності, а саме кількості волотей з m^2 , кількості насінин у волоті та маси 1000 насінин, що в кінцевому результаті зменшує врожайність зерна. Тобто, у цьому дослідженні, сорт Шефа'а є найпосухостійкішим, що є дуже перспективним для вирощування в сухих та напівпосушливих умовах [5].

При дослідженні впливу п'яти різних температурних режимів на розвиток колосків у вівса під час стадії наливу зерна показано, що температура суттєво впливає на процеси росту та формування продуктивності. За показниками фізіологічного аналізу визначено, що підвищення температури призводить до зниження загального вмісту хлорофілу та сухої маси пагона, але водночас, викликає активізацію MDA, розчинних цукрів та антиоксидантних ферментів.

Протеомний аналіз виявив високу експресію генів, які пов'язані зі стресом при високій температурі, що вказує на наявність оптимальних температурних умов для забезпечення максимальної маси зерна та потенціалу врожайності [14].

Дослідження, які були проведені на засолених лужних землях провінції Цзянсу в Китаї, показали, що вирощування вівса може діяти як самостійний біологічний механізм та підвищує секвестрацію вуглецю екосистемою сільськогосподарських угідь. У експерименті з використанням сортів (Цезар V1) та Менлун (V2) виявлено, що внесення органічних добрив та біовугілля сильно підвищує вміст органічного вуглецю в ґрунті – на 22,03%. Можна стверджувати, що комбінована обробка сечовиною та біовугіллям призводить до найбільшого поглинання сільськогосподарського вуглецю [15].

Так, висока температура є серйозним стресовим чинником для вівса, що обмежує його продуктивність. Методами транскриптоміки, метаболоміки та ліпідоміки показано, що адаптація рослин до високотемпературного стресу проходить через значне збільшення частки нейтральних ліпідів, а саме триацилгліцеролів. Підсумовуючи, можна сказати, що накопичення триацилгліцеротів (TAG) відбувається внаслідок масштабного перетворення мембранних ліпідів, а не через синтез нових жирних кислот [28].



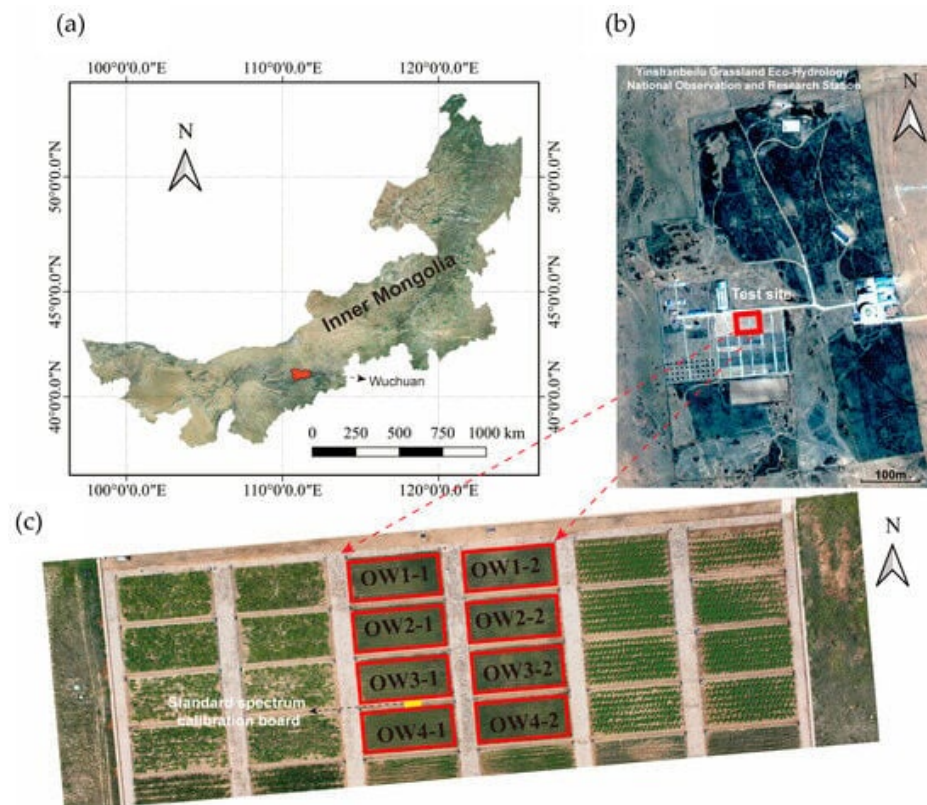
Малюнок 1.4. Комплексний аналіз ліпідомних змін, індукованих нагріванням, у проростках вівса [28].

Наприклад: А – загальний вміст ліпідів у контрольних (СК) та проростках, що зазнали теплового стресу (НС). В – відносна чисельність основних класів ліпідів та молекулярний видовий склад у кожному класі. С-В – молекулярний видовий склад специфічних класів ліпідів. Наприклад: С – фосфоліпіди, D – нейтальні ліпіди, E – гліколіпіди, F – лізофосфоліпіди. [28].

Овес є важливою культурою для забезпечення поживними речовинами зерна та кормів, саме тому через це біозбагачення вівса розглядають як спосіб мінімізації дефіциту мікроелементів у людей та худоби. У дослідженні, було проаналізовано роль незамінних мікроелементів у харчуванні, а також розглянуто різні стратегії біозбагачення, які включають: агрономічні, селекційні, трансгенні та геномні підходи. Також обговорювалися молекулярні механізми, які були покладені в основу поглинання, відкладання та мобілізації

мікроелементів у зерні, а також були наведені пункти які потребують уваги, а саме проблеми, обмеження та успіхи у впровадженні методів біозбагачення [23]. Дослідження, проведене у напівпосушливому регіоні Китаю, показало, що дефіцит вологи дуже сильно впливає на фенотипові характеристики *Avena sativa* L., зменшуючи висоту рослин, індекс листової поверхні (LAI), вміст хлорофілу (SPAD).

Для моніторингу стану посівів сьогодні використовують безпілотні літальні апарати (БПЛА) з мультиспектральними камерами, які фіксують відбиття світла у видимому та інфрачервоному діапазоні. Проведений аналіз показав, що індекси рослинності NDRE (Normalized Difference Red Edge Index), CIG (Chlorophyll Index Green) та MCARI (Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index) найкраще корелюють з урожайністю вівса, дозволяючи оцінити рівень впливу стресових факторів [10].



Малюнок 1.5. Розташування дослідницької ділянки на Національній станції спостереження та досліджень екогідрології пасовищ Іньшаньбейлу.

Станція розташована в перехідній зоні від гір Іньшань до Монгольського плато (мал. 1.5) і характеризує регіон як напівпосушливий, з помірно-континентальним мусонним кліматом, де середньорічна кількість опадів становить 306 мм, а сільськогосподарське зрошення повністю залежить від ґрунтових вод. За умовами вирощування зона характеризується середньорічною температурою 3,8 °C та переважанням бурих та сірих лісових ґрунтів з об'ємною щільністю 1,5-1,7 г/см³ [10].

Овес набуває популярності як харчова та кормова культура завдяки високому вмісту β – глюкану, харчових волокон та значному генетичному різноманіттю, що робить його цінним ресурсом для селекції. Для підвищення врожайності та якості зерна за умов впливу абіотичних стресів застосовують методи прискореної селекції, що включає розробку карт зчеплення на основі молекулярних маркерів QTL – аналіз та геномну селекцію. Ці підходи дозволяють розробляти сорти подвійного призначення, які здатні ефективно функціонувати як у зернових, так і в кормових системах виробництва [22].

1.3. Характеристика та досвід застосування сучасних антистресантів і регуляторів росту у рослинництві

Аналіз світових публікацій з 1993 по 2025 роки свідчить про те, що використання екзогенних регуляторів росту є одним з найактуальніших та ефективних напрямків для підвищення врожайності вівса. Так, світові вчені фокусують увагу на застосуванні біостимуляторів, саме щоб зберегти структурні елементи врожаю, такі як кількість зерен у волоті та їхньої наповненості [12].

Виходячи з практичного досвіду, можна сказати, що застосування антистресових препаратів дає змогу реалізувати генетичний потенціал вівса, який закодований у його складній білковій системі [34]. Можна зробити висновок, що поєднання знань щодо геномної структури культури, та використання нових амінокислотних комплексів, формує сучасний фундамент для підвищення продуктивності вівса у нестабільних кліматичних умовах [21].

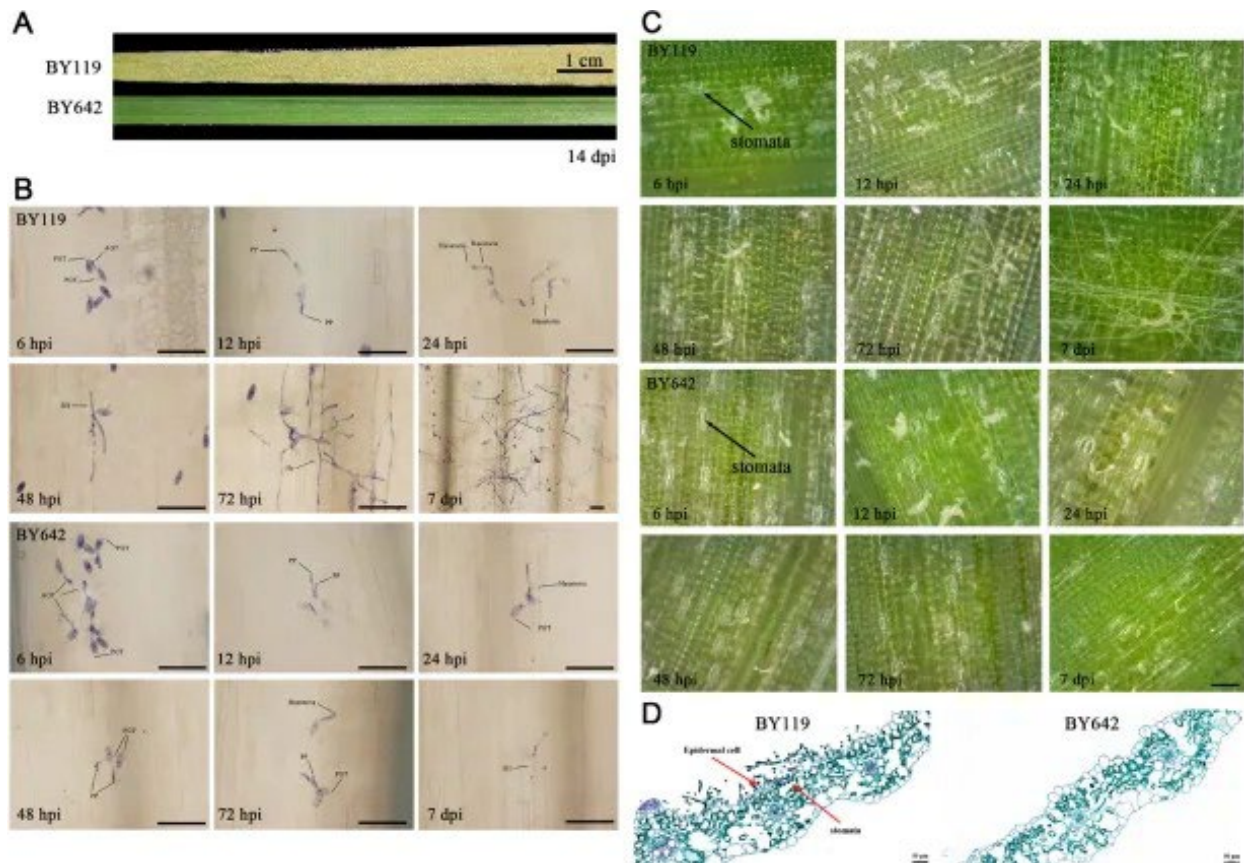
Для підвищення стійкості вівса до абіотичних стресів ключовим є використання генетичного різноманіття за вмістом мікроелементів. Проведені дослідження сортових ліній вівса дозволили ідентифікувати генотип з високим вмістом заліза, цинку, марганцю та міді, які є дуже перспективними для селекції. За допомогою статистичного аналізу було підтверджено високу спадковість цих ознак, що дозволяє ефективно покращувати поживну цінність та продуктивність культури через використання найкращих ліній у селекційних програмах [24]. Було встановлено, що ефективність поглинання поживних речовин сильно залежить від генотипу різноманіття у здатності накопичувати мікроелементи. Для покращення поживних властивостей речовин застосовують метод біофортифікації, який включає як селекцію ефективних генотипів, так і агрономічні підходи, а саме, застосування мінеральних добрив, хелатів та наночастинок. За допомогою цих заходів можна не лише збагатити врожай мікроелементами, а й підвищити загальну продуктивність культури [7].

Доведено, що екзогенне застосування наночастинок цинку суттєво покращує процеси росту та інтенсивність фотосинтезу культур завдяки ефективній модуляції фізіологічних, біохімічних і молекулярних механізмів захисту [13].

Також особлива увага приділяється стратегії біофортифікації через використання хелатних сполук. За допомогою такого підходу, можна забезпечувати високу біодоступність металів, що не лише покращує стан посівів у критичні фази росту, а й підвищує харчову цінність кінцевої продукції [7]. Окрім збалансованого надходження есенціальних мікроелементів, це відіграє захисну роль, виступаючи антагоністом важких металів у ґрунті, тим самим запобігає гальмуванню розвитку кореневої системи вівса в умовах антропогенного навантаження [29].

1.4. Механізми регуляції водного балансу та стан фотосинтетичного апарату рослин за дії біостимуляторів

Дослідження показали, що стійкість генотипа вівса наприклад: (BY642), володіють високим адаптивним потенціалом завдяки активації молекулярних механізмів захисту на рівні клітинних структур [17].



Малюнок 1.6. Етапи інфікування та формування захисної відповіді у різних генотипів вівса (*Avena sativa L.*) за даними фізіологічного профілювання [17].

На малюнку 1.6 детальне дослідження захисних реакції показує, що стійкі форми вівса (BY642) здатні ефективно блокувати розвиток патогена вже через 24-48 годин, в той же час як у сприятливих генотипів (BY119) спостерігається масове руйнування тканин. Можна зробити висновок, що використання антистресантів дозволяє зберегти цілісність хлоропластів та інтенсивність асиміляційних процесів, навіть за дії тиску зовнішніх чинників. [17].

Окремим напрямком підвищення адаптивності є використання stay-green (SG) ефект. Стан пігментів у системі вівса є індикатором адаптивної здатності культури. Так, при використанні генотипів з (SG) ефектом дозволяє подовжити функціонування листків, стабілізувати роботу фотосинтетичного апарату та забезпечити формування виповненого зерна з високою масою 1000 насінин.

Одним із найвразливіших елементів фотосинтетичного апарату є фотосистема II (ФС II). За умов теплового шоку спостерігається явище фотоінгібування, коли енергія світла стає надлишковою і починається фоторуйнування реакційних центрів. Використання генотипів вівса з ознакою stay-green дозволяє ефективно боротися з цим явищем, оскільки така генетична особливість забезпечує затримку старіння листків та підтримку високого рівня метаболізму навіть при несприятливих умовах довкілля [8].

Відбір стійких сортів є найважливішим у виробництві вівса, адже це дозволяє зменшити використання хімічних засобів захисту рослин. Дослідження показали, що для досягнення високих і стабільних урожаїв при мінімальному хімічному навантаженні необхідно дуже чітко відповідати сорту системи управління. Екологічне випробування сортів (EVT) дозволяє ідентифікувати генотипи, що найсильніше адаптованих до місцевих ґрунтово-кліматичних умов та ефективні при обмеженому ресурсному забезпеченні [8].

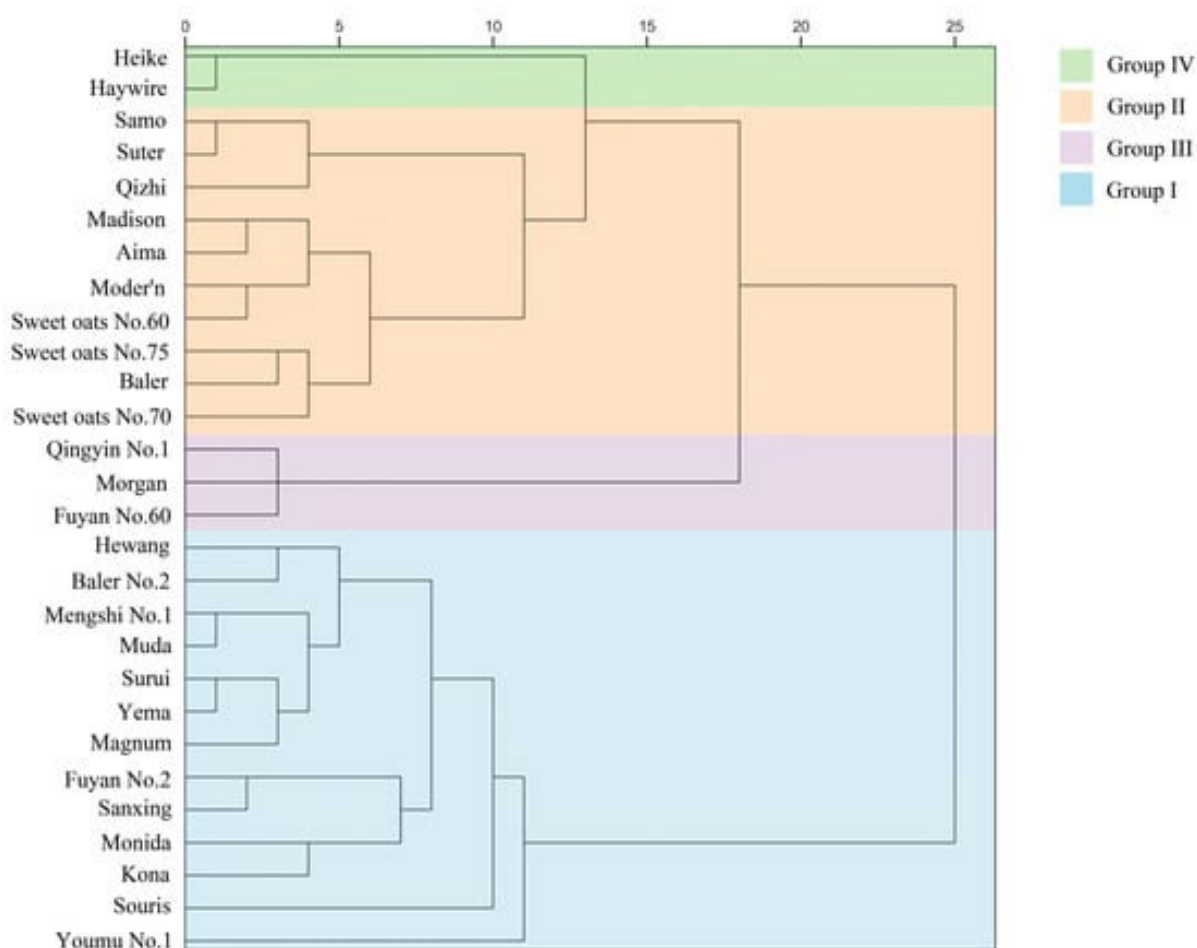
За допомогою гумінових речовин, зокрема фульвокислот, стимулюється аскорбат-глутатіоновий цикл, що підтверджує ефективність використання води і дає змогу продихам залишатися відкритими для газообміну в умовах дефіциту вологи, також забезпечує стабільність темної фази фотосинтезу. Тобто, завдяки низькій молекулярній масі та високій проникності, ці сполуки виступають дуже сильними природними біостимуляторами, що діють на рівні внутрішньоклітинного метаболізму [35].

Додатковою системою стійкості асиміляційного апарату вівса в критичні фази онтогенезу є екзогенна дія специфічних антиоксидантів, а саме аскорбінової кислоти (вітаміну C) та α -токоферолу (вітаміну E). Якщо говорити про рослинний організм, то ці сполуки функціонують не ізольовано, а проявляють

виражений синергізм, сформувавши тим самим багаторівневу систему захисту клітинних структур. Можна сказати, що завдяки підтримці цілісності тилакоїдів, антиоксидантний комплекс сприяє оптимізації донорно-акцепторних зв'язків, стимулюється активний відтік асимілятів від листових пластинок до репродуктивних органів. Такий прискорений транспорт цукрів не лише забезпечує підвищення кількісних показників урожайності, а також покращує характеристики майбутнього врожаю [9].

Функціонування фотосинтетичного апарату вівса та формування загальної продуктивності вівса знаходиться у нерозривному фізіологічному зв'язку з ефективністю поглинальної здатності кореневої системи. Якщо розглянути сучасні кліматичні виклики, а саме нестабільне зволоження, то стійкість культури закладається на глибокому молекулярному рівні, що підтверджується за допомогою сучасного комплексно транскриптомного аналізу 2026 р. Показано, що під дією водного дефіциту в тканинах вівса активуються специфічні генетичні каскади, а саме диференціальна експресія генів, відповідальних за метаболізм абсцизової кислоти (ABA) та передачу сигналів стресу. За допомогою цих молекулярних механізмів, забезпечується швидка перебудова метаболізму, тим самим спрямовуючи енергетичні ресурси на підтримку фізіологічного статусу проростків та синтез захисних флавоноїдів. Така генетична пластичність є визначальним чинником виживання рослин у критичних етапах раннього онтогенезу.

Важливим етапом у сучасних дослідженнях є типізація генофонду вівса за ознакою посухостійкості. При використанні методів ієрархічного кластерного аналізу можна розподілити сорти на окремі групи залежно від інтегрального показника стійкості [30].



Малюнок 1.7. Кластеризація сортів вівса за рівнем посухостійкості згідно зі значеннями D-value [30].

На малюнку 1.7 зображено результати кластерного аналізу, де за допомогою інтегрального показника D-value диференційовано сорти вівса за їхньою стійкістю. Якщо подивимося на горизонтальну вісь ми можемо бачити ступінь генетичної та фізіологічної розбіжності між групами. І це дозволить нам чітко виділити кластер найбільш стійких генотипів [30].

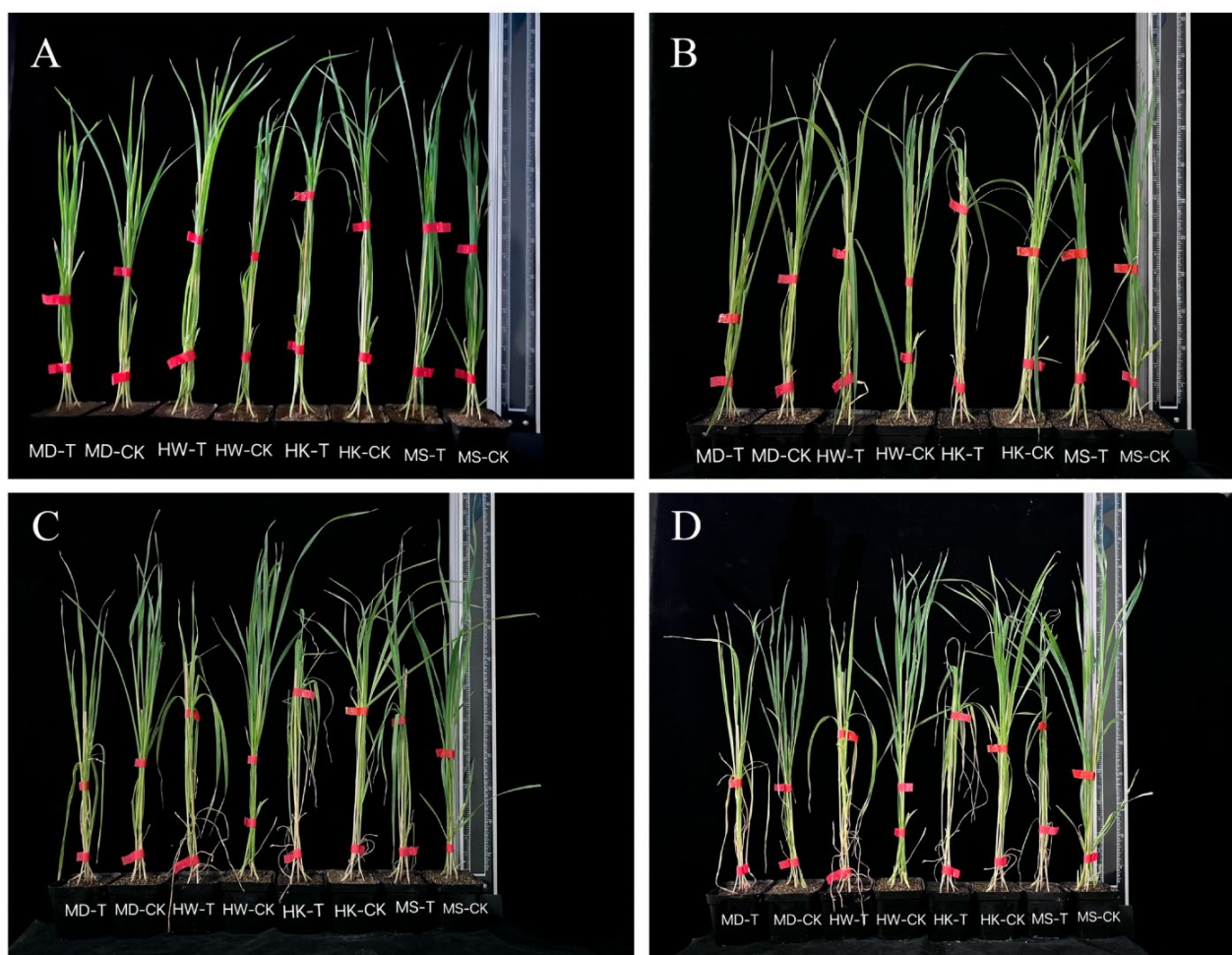
Також на малюнку ми можемо бачити 4-ри групи

Група 1 – група сортів, які мають найвищий показник D-value. Їхня особливість – демонструють мінімальне пошкодження мембран та найвищу активність антиоксидантних ферментів, а на 7-10 добу посухи, ці рослини зберігають тургор та зелений колір листків.

Група 2 – Сорти, які займають проміжне положення. Вони оптимально справляються з короткочасною посухою до 5 діб, але починають втрачати продуктивність при тривалому стресі.

Група 3 – Рослини у цій групі демонструють помітні ознаки стресу вже на ранніх етапах (3-5 доба).

Група 4 – Найвразливіші сорти, які мають найнижчі значення D-value. Вже на 7 добу без вологи, вони демонструють сильне в'янення, скручування та некроз тканини [30].



Малюнок 1.8. Динаміка фенотипових змін під дією посухи [30].

Також, варто відзначити різну дію тривалості високотемпературного стресу (3,5,7 та 10 діб) на фенотипічні зміни (A-D).

А (3 доби) – Початкова стадія. Рослини виглядають здоровими, тургор тканин повністю збережений.

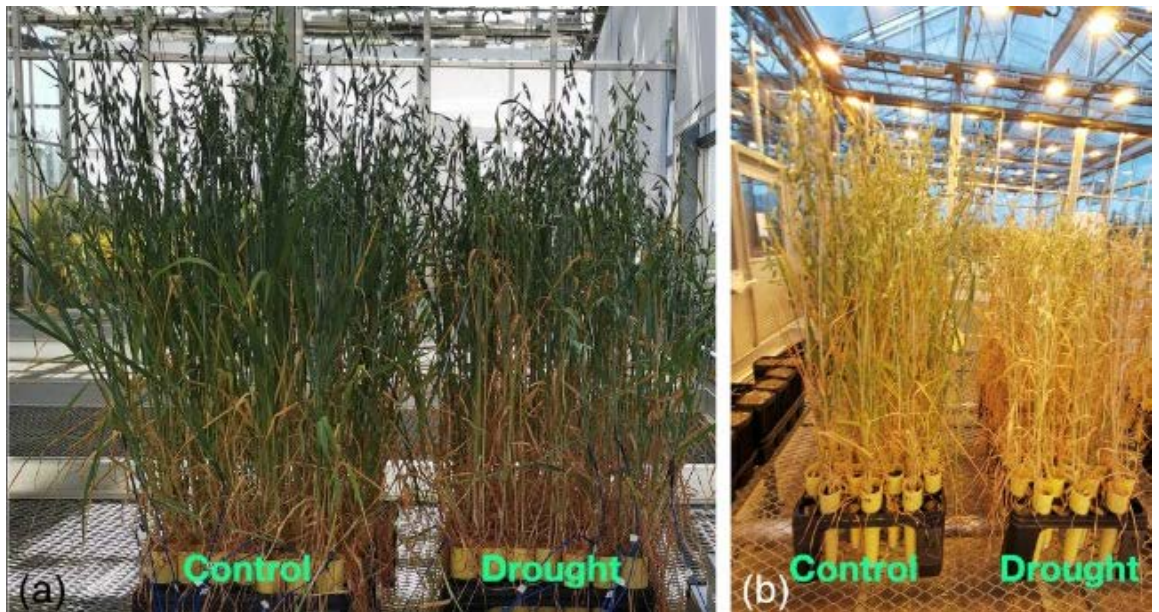
В (5 діб) – Можемо бачити появу перших ознак стресу у чутливих сортів. Також можливе незначне пригнічення росту порівняно з контролем.

С (7 діб) – Ми можемо бачити чітко виражену реакцію. У вразливих генотипів починається скручування листя та пожовтіння нижніх ярусів.

Д (10 діб) – Це критичний стан. Чутливі сорти демонструють сильне в'янення (сорти Group 4) та усихання, тоді як сорти з Group 1 все ще утримують вертикальне положення та зелений колір. [30].

Коренева система вівса (*Avena sativa* L.) є першою, яка приймає на себе удар за дії ґрунтових стресорів, зокрема високої концентрації солей та лужної реакції розчину. Комплексні фізіологічні дослідження показують, що у коренях активуються специфічні механізми осмотичної адаптації, а рослини переходять до так званого метаболічного перемикання, що проявляється в інтенсивному синтезі та накопиченні низькомолекулярних органічних сполук, а саме осмолітів, таких як пролін, бетаїн та розчинні цукри.

Водночас, важливим механізмом захисту, є здатність коренів модифікувати ризосферу для полегшення поглинання поживних елементів. За допомогою досліджень біохімічного профілю корневих виділень продемонстровано, що за умов високого рН рослини вівса активно виділяють органічні кислоти, а саме лимонну та яблучну. Ці сполуки здатні нейтралізувати лужне середовище і розщеплювати іони металів, що це дозволяє підтримувати функціонування транспортних систем навіть за умов сильного сольового навантаження [11].



Малюнок 1.9. Малюнок зовнішнього вигляду рослин вівса звичайного на різних етапах дослідного водозабезпечення [31].

На малюнку 1.9. відображено вплив водного стресу на розвиток вівса (за результатами моніторингу росту рослин у динаміці). На 7-й добу після поливу (фото (A)), можемо візуально спостерігати різницю між контрольними рослинами та тими, що піддавали дії стресу. На 15-у добу (фото (B)), відображено, що саме у чутливих генотипів відмічено інтенсивне в'янення та пожовтіння нижніх листків, що свідчить про глибокі порушення у фізіологічних процесах [31].

Дослідження Wen G. et al. (2023) свідчать, що посухостійкі сорти здатні формувати більшу та глибшу кореневу систему навіть при обмеженому об'ємі ґрунту. За допомогою цього рослина може ефективніше використовувати воду з нижніх горизонтів ґрунтосуміші та підтримувати процес наливу зерна, що напяму переходить у вищі показники маси зерна з рослини [31].

Також важливим аспектом у формуванні стійкості вівса на ранніх етапах розвитку є вивчення захисних механізмів на рівні проростків, що дозволяє визначити критичні моменти в життєдіяльності рослини. Головними чинниками стійкості є здатність генотипів регулювати вміст осморегуляторів, таких як пролін і підтримувати відносно вищу швидкість транспірації (Tr) та продихову провідність (G_s) за умов дефіциту вологи [27].

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Об'єкт дослідження та його характеристика

Об'єктом дослідження було обрано рослини вівса звичайного (*Avena sativa* L.) сорту Скарб України. Сорт характеризується високою пластичністю, стійкістю до вилягання та здатністю формувати стабільний врожай в умовах нестабільного зволоження [4].

Для моделювання стресового впливу у роботі використано метод токсикації субстрату (грунту) нафтовим забрудненням у концентрації 5% від маси ґрунту. Підхід дозволяє оцінити критичні межі адаптації культури та ефективність застосування екзогенних регуляторів росту в екстремальних умовах навколишнього середовища.

Для імітації техногенного стресу використовували ґрунтовий субстрат, забруднений сировою нафтою (вміст 50г на 1кг ґрунту). Нафта суттєво погіршує водно-фізичні властивості ґрунту, створюючи гідрофобний шар, що блокує доступ води та кисню до коренів [1].



Малюнок 2.1. Зовнішній вигляд насіння вівса сорту Скарб України [4].

Для дослідження реакції вівса на нафтовий стрес (5%) використовували метод морфометричного аналізу, які були викладені у праці [1].

Дослідження включали вимірювання лінійних показників: висоти проростків та довжини їх кореневої системи. Вимірювання здійснювали за допомогою стандартного вимірювального інструмента (лінійки) з ціною поділки 1 мм. Це дозволило встановити вплив передпосівної обробки насіння гуматами, а саме (Humifield Forte та Fulvital Plus) у концентраціях 0,1-0,4 г/л на початковий ріст культури в умовах токсичного забруднення субстрату [1].

2.2. Характеристика антистресових препаратів та схеми їх застосування

У дослідженні було застосовано препарати, що стимулюють фізіологічні процеси та нівелюють негативний вплив токсикантів:

1. Гуміфілд Форте (Humifield Forte) – сучасний антистресант, що базується на солях гумінових кислот (18%). Через поєднання з амінокислотами та екстрактом морських водоростей, препарат активує ріст кореневої системи та підвищує загальний імунітет рослин [1].

2. Фульвітал Плюс (Fulvital Plus) – біостимулятор з високим вмістом фульвових кислот. Його дія спрямована на інтенсифікацію обмінних процесів та покращення транспорту мікроелементів у тканинах вівса [35].

3. Мегафол (Megafol) – спеціалізований біостимулятор, що містить 28% амінокислот рослинного походження, а також бетаїни та вітаміни. Препарат діє як (швидка допомога), активуючи метаболічні шляхи відновлення після абіотичного стресу [16].

Порівняльний аналіз складу препаратів представлений у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Склад та функціональні характеристики досліджуваних препаратів [16, 1]

Назва препарату	Діюча речовина	Концентрація, %	Допоміжні сполуки	Призначення
Гуміфілд Форте	Солі гумінових кислот	18,0	Амінокислоти	Зміцнення імунітету
Фульвітал Плюс	Вульфові кислоти	75,0	Хелати металів	Енергія росту
Мегафол	Рослинні амінокислоти	28,0	Бетаїни, вітаміни	Антистресова дія

Таблиця 2.2. Схема проведення експерименту та методика обробок
[16, 1]

Варіант	Умови ґрунту	Спосіб обробки препаратом	Дозування
Варіант 1	Чистий (Контроль)	Без обробки	-
Варіант 2	Нафта 5% (Стрес)	Без обробки	-
Варіант 3	Нафта 5%	Обробка насіння Гуміфілд Форте	0,2 г/л
Варіант 4	Нафта 5%	Обробка насіння Фульвітал Плюс	0,4 г/л
Варіант 5	Нафта 5%	Обприскування у фазу кущення (Мегафол)	2,0 л/га

Предпосівну обробку насіння проводили методом напівсухого протруєння з витратою робочого розчину 10 л/т. Позакореневе підживлення (Варіант 5)

здійснювали у фазу кущення за допомогою мікрокапельного розпилювача з нормою 300 л/га.

2.3. Методи фізіологічних та цифрових досліджень

2.3.1. Морфометричні показники та біохімічні показники

Оцінку енергії проростання та лабораторної схожості проводили згідно з державними стандартами (ДСТУ 4138-2002). Вимірювання лінійних параметрів (висота пагона, довжина кореня) здійснювали на ключових етапах раннього онтогенезу (5-та та 14-та доба).

Стан фотосинтетичного апарату оцінювали за вмістом хлорофілів a,b та каротиноїдів. Екстракцію пігментів проводили 96% етанолом з наступним вимірюванням на спектрофотометрі СФ-46 [1].

Для оперативного контролю фізіологічного стану посівів застосовано методику дистанційного зондування [3].

Методика дистанційного моніторингу за допомогою БПЛА. Дистанційний збір даних здійснювали за допомогою БПЛА, оснащеного мультиспектральною камерою. Процес обробки отриманої інформації передбачав використання спеціалізованого програмного забезпечення для моделювання динаміки стану зернових культур. За допомогою такого зондування, ми мали можливість автоматизувати ідентифікацію ділянок із пригніченою вегетацією та проводити оперативний аналіз розвитку рослин за допомогою цифрових карт [3].

Для моніторингу використано БПЛА DJI Mavic 3 Multispectral, обладнаний мультиспектральною камерою. Даний комплекс дозволяє отримувати дані у вузьких діапазонах спектру (червоному та ближньому інфрачервоному), що забезпечує точність моніторингу з просторовою роздільною здатністю до 5 см/піксель [3].



Малюнок 2.2. БПЛА DJI Mavic 3 Multispectral [20].

Аналіз вегетаційних індексів. Ключовим показником був індекс NDVI. Згідно з математичною моделлю, описаною Мачуляком М.В., цей індекс дозволяє ідентифікувати зони зниженої фотосинтетичної активності шляхом розрахунку співвідношення поглинутого та відбитого світла [3].

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Де *NIR* – інтенсивність відбиття в ближній інфрачервоній області, *RED* – у червоній зоні спектру. Зміни цього індексу корелюють із вмістом хлорофілу, на який впливають антистресові препарати [26, 3]. Так, ефективними індикаторами захисної дії препаратів є індекси NDVI та NGVBI. Їх використання базується на здатності рослинного покриву по-різному відбивати світло у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах залежно від життєздатності культури. Це дозволяє здійснювати неруйнівний моніторинг стану посівів та оцінювати ефективність застосованих антистресових заходів [26, 3].

Згідно зі утвореними спектральними кривими, усі здорові рослини мають ідентичний характер відбиття: низькі значення у видимому спектрі (350-700 нм) та різкий підйом у ближньому інфрачервоному діапазоні (понад 750 нм) [33]. Чим вища різниця між цими двома показниками, тим вище є індекс NDVI, що свідчить про оптимальніший стан рослини та вищий вміст хлорофілу [3, 26]. За умов пригнічення вегетації внаслідок стресу спостерігаємо зниження стрибка, що фіксується мультиспектральною камерою БПЛА [3].

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Вплив нафтового забруднення на початкові етапи онтогенезу вівса

На першому етапі дослідження було проаналізовано вплив нафтового забруднення ґрунту 5%, на енергію проростання та схожість насіння вівса (*Avena sativa* L.). За отриманими даними, ми з'ясували, що наявність вуглеводнів нафти створює токсичне середовище, яке перешкоджає доступу вологи та кисню до насіння [1].

За результатами порівняння контрольного варіанту та варіанту з нафтовим забрудненням наведені у таблиці 3.1.

**Таблиця 3.1. Вплив нафтового забруднення на показники схожості
вівса [1].**

Варіант досліду	Лабораторна схожість, %	Відхилення від контролю, %
Контроль (чистий ґрунт)	96,1±0,01	-
Ґрунт +5% нафти	72,4±0,02	-24

За аналізом таблиці, можна сказати, що забруднення ґрунту нафтою призвело до зниження схожості на 24% порівняно з контрольним варіантом. Це свідчить про обволікання насінин рослин нафтовою плівкою, яка гальмує метаболічні процеси проростання [1].

Нафта діє як комплексний стресор, проте на відміну від прямої дії вуглеводнів, виникає ефект фізіологічної посухи, тому що нафтова плівка підвищує гідрофобність ґрунту. У експерименті це підтвердилося зниженням схожості до 72,4%. Але введення до системи гумінових кислот дозволило

нівелювати цей вплив, оскільки гумати діють як природні ельгатори, які здані зв'язувати токсичні фракції нафти в органічно-мінеральні комплекси, зменшуючи їх біодоступність для кореневої системи вівса [1, 16].

Отже, такі результати підтверджують необхідність застосування антистресових препаратів саме на ранніх етапах вегетації [1, 16].

3.2. Вплив гуматів на морфометричні показники проростків вівса.

Наступним етапом дослідження стало вивчення морфометричних параметрів проростків вівса при застосуванні гумінових препаратів як антистресових агентів. Головними показниками ефективності обраних стимуляторів – Fulvital Plus та Humifield Forte – виступали довжина наземної частини (пагона) та довжина кореневої системи [1].

На основі проведених замірів було встановлено, що препарати мають вплив на розвиток культури в нафтозабрудненому субстраті (таблиця 3.2.). Оскільки гумати здатні активізувати обмін речовин навіть за умов дефіциту поживних елементів, їх застосування є критично важливим для відновлення рослин на початкових етапах розвитку [16].

Таблиця 3.2 Динаміка морфометричних показників проростків вівса за умови нафтового забруднення субстрату та внесення біостимуляторів [1]

Варіант досліджу	Концентрація, г/л	Довжина пагона, см	Довжина кореня, см
Нафта (контроль)	0	5,4±0,02	4,2±0,03
Нафта + Fulvital Plus	0,4	6,1±0,03	4,1±0,02

Нафта + Humifield Forte	0,2	6,8±0,03	3,8±0,01
-------------------------------	-----	----------	----------

За аналізом результатів, можна зробити висновок, що застосування препарату Fulvital Plus у концентрації 0,4 г/л забезпечило стимулюючий ефект, збільшивши висоту пагонів порівняно з варіантом без обробки [1]. Водночас найвищий приріст вегетативної маси спостерігався при використанні Humifield Forte з концентрацією 0,2 г/л – довжина пагонів зросла до 6,8 см.

Але варто зауважити, що інтенсивний ріст надземної частини під дією Humifield Forte супроводжувався пригніченням кореневої системи, тобто зменшенням довжини до 3,8 см, що ймовірно вказує на перерозподіл енергетичних ресурсів рослини на формування фотосинтетичного апарату для подолання вуглеводного стресу [1, 26].

3.3. Результати моніторингу за допомогою БПЛА (NDVI)

Останнім етапом ефективності гуматів став дистанційний моніторинг посівів вівса з використанням БПЛА DJI Mavic 3 Multispectral [3]. Основним індикатором стану рослин було обрано нормалізований диференційний вегетаційний індекс (NDVI), за допомогою якого, ми можемо оцінити фотосинтетичну активність та вміст хлорофілу без прямого контакту з рослиною [26, 33].

На основі мультиплексних знімків було побудовано карти розподілу вегетаційних індексів. Середні значення NDVI для досліджуваних варіантів задані в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3. Значення індексу NDVI вівса залежно від варіанту обробки [26, 33].

Варіант досліджу	Середнє значення NDVI	Стан рослин
Контроль (чистий ґрунт)	0,78±0,01	Активна вегетація
Нафта (без обробки)	0,35±0,01	Сильний стрес/хлороз
Нафта + Fulvital Plus	0,52±0,02	Помірна регенерація
Нафта + Humifield Forte	0,61±0,02	Інтенсивне відновлення

За даними таблиці 3.3., можемо бачити, що нафтове забруднення призвело до критичного зниження NDVI до рівня 0,35, що візуально проявлялося у затримці росту та пожовтінні листків. Застосування гуматів сприяло відновленню оптичних властивостей листків, а найвищу ефективність показав препарат Humifield Forte, де індекс зріс до 0,61. Це корелює з морфометричними даними щодо збільшення біомаси пагонів.

Важливим аспектом є вплив препаратів на фотосинтетичний апарат, який був зафіксований нами через індекс NDVI. Підвищення значення індексу до 0,61 у варіанті з Humifield Forte вірогідно пояснюється стимуляцією синтезу хлорофілу а та b. Також, антистресові агенти активують антиоксидантну систему рослини, що запобігає перекисному окисненню ліпідів у мембранах хлоропластів [35], що дозволяє рослині підтримувати високий рівень фотосинтезу, навіть, якщо вміст нафти в субстраті не менше 5%.

Одним із ключових аспектів дії даного препарату є його здатність виступати природним хелатуючим агентом. Через високу біологічну активність фульвокислот, вони здатні утворювати рухливі комплекси з мікроелементами, що сильно полегшує їх транспорт через клітинні мембрани рослин [1]. Водночас, це підтверджується нашими спостереженнями, де застосування препарату сприяло

інтенсифікації початкових етапів органогенезу. Фульвокислоти мають низьку молекулярну масу, що дозволяє їм легко проникати всередину рослинного організму, активізуючи ферментативну діяльність та посилюючи синтез хлорофілів [1].

Впровадження препарату Фульвітал Форте безпосередньо корелювало зі зміною показників NDVI протягом усього вегетаційного періоду. На початкових етапах росту, коли рослини перебувають під дією стресових чинників (нестача вологи чи температурні коливання), фульвокислоти виконують роль адаптогенів, що дозволяє підтримувати тургор клітин та запобігати деградації пігментного апарату [1]. Тому, при використанні препарату на дослідних ділянках індекс NDVI залишився стабільно вищим порівняно з контрольними варіантами, що свідчить про оптимальнішу архітектуру посіву та вищий вміст хлорофілу в листках [26].

Для математичного опису цих процесів використовується система диференціальних рівнянь Моно. Модель Моно дозволяє апроксимувати процеси насиченого росту та редукції біомаси, що є особливо актуальним для прогнозування динаміки вегетаційних індексів [3]. Метод ідентифікації параметрів цієї моделі, заснований на градієнтному методі Левенберга – Марквардта, цей метод забезпечує високу точність наближення навіть при роботі з даними, які використовуються для дистанційного зондування території з антропогенними навантаженнями [3].

Овес часто висівають на ділянках із неоднорідним рельєфом, де використання саме БПЛА допомагає створити точні моделі висот для коригування висіву. Використання двокомпонентної моделі дозволяє врахувати не лише поточний стан рослин, а й накопичений потенціал сорту, що важливо для формування якісного зерна. Це особливо актуально, оскільки овес дозріває нерівномірно, і точне зондування аналіз поля мінімізує втрати врожаю [3].

Таблиця 3.4. Особливість моніторингу вівса за допомогою БПЛА та математичних моделей [3].

Параметри	Значення для вівса та роль у моделюванні
Чутливість до ущільнення	Овес має мичкувату кореневу систему, яка гостро реагує на щільність ґрунту. Використання моделі HeightResistance дозволяє виявити зони пригнічення росту через твердість ґрунту.
Критичний індекс NDVI	Для вівса в період кущення оптимальний NDVI становить 0.4 – 0.6. Нижчі показники сигналізують про потребу в превентивному підживленні.
Азотний стрес (MTCI)	Індекс MTCI для вівса є точнішим за NDVI на етапі виходу в трубку, оскільки дозволяє уникнути ефекту насичення при великій біомасі
Похибка прогнозу	При застосуванні системи диференціальних рівнянь Моно для вівса дозволяє досягти середньої відносної похибки прогнозування врожайності на 5%
Прогноз	Алгоритм аналізу дозволяє спрогнозувати стрес вівса за 7-14 днів до появи візуальних симптомів (пожовтіння листя).

Так, встановлено, що нелінійна модель висот сільськогосподарських культур дозволяє за усередненими морфометричними показниками досліджувати проблемні ділянки поля [3]. Це ідентифікує зони, де токсична дія нафти найвираженіша і коригувати норми внесення гуматів у режимі реального часу. Отже такий підхід створює передумови для стабільного отримання енергетичної біомаси [1, 3].

Реалізація комплексного підходу до фіторемедіації та прогнозування врожайності потребує створення спеціалізованого програмного забезпечення. Така система має включати підсистему збору даних з БПЛА та автоматичного зондування полів [3]. Є можливість інтеграції розроблених математичних моделей у середовище (ГІС), що забезпечує масштабованість та гнучкість при обробці великих об'ємах агрономічних даних [3].

Так, аналіз спектральних характеристик посівів показав, що відображення в інфрачервоному спектрі прямо залежить від структури мезофілу листка та загального стану водного режиму рослин [26]. Через активну дію Фульвіталу Форте, рослини формують потужнішу кореневу систему, що забезпечує стабільний доступ до ґрунтової вологи [1]. Це, у свою чергу, відображається на стабільності значень NDVI навіть у посушливі періоди, оскільки оптимально зволожена та здорова рослина тканина відбиває більше інфрачервоного світла [26].

Варто зауважити, що фульвокислоти стимулюють діяльність ґрунтової мікрофлори, що покращує живлення рослини на макрорівні [1]. У поєднанні з методами оцінки NDVI, це дає можливість прогнозувати врожайність ще на етапі цвітіння та наливу зерна [26]. Мультиспектральні камери, дозволяють виявити неоднорідність посіву, яку важко помітити при візуальному огляді, але чітко демонструється через значення вегетаційних індексів [26].

У ході експерименту було виявлено, що позакореневе обприскування фульвокислотою діє як сильний антистресовий агент, а фульвокислота здатна відновлювати майже 17% врожаю, втраченого через посуху. Особливу увагу приділяють тому, як фульвокислота стимулює фотосинтетичний апарат рослин

[35]. Вона підвищує рівень хлорофілу *a* та *b*, і це дозволяє вівсу ефективно поглинати світлову енергію. Фульвокислота активує ключовий фермент РУБІСКО, який відповідає за фіксацію вуглекислого газу. Дослідження показало, що обробка допомагає рослині підтримувати осмотичний баланс шляхом накопичення розчинних цукрів. Так, фульвокислота діє вибірково, надаючи більшу підтримку сортам, які генетично менш стійкі до дефіциту вологи. Для чутливого сорту Bayou 9 приріст біомаси після обробки був значно вищим, ніж для стійкого Yanke 2. Також, було зафіксовано покращення метаболізму азоту, що важливо для формування зерна. Отриманні дані визначають, що фізіологічне відновлення рослин під дією ФК відбувається на молекулярному та біохімічному рівнях одночасно [35].

Таблиця 3.5 Порівняльна таблиця впливу ФК на овес за сортами [35].

Параметр порівняння	Посухостійкий сорт (Yanke 2)	Чутливий сорт (Bayou 9)
Реакція на посуху без фульвокислоти	Менше зниження площі листя та сухої речовини	Значене гальмування росту та втрата врожаю
Ефективність відновлення врожаю за допомогою фульвокислоти	Відновлено 15,2% втраченого врожаю	Відновлено 16,9% втраченого врожаю
Вплив на суху речовину	Збільшення на 15,1% при обробці фульвокислоти	Збільшення на 19,2% при обробці фульвокислоти
Синтез хлорофілу	Відновлення втрат на рівні 12,8%	Відновлення втрат на рівні 14,9%
Активність антиоксидантних ферментів	Зростала на 28,1% під дією фульвокислоти	Зросла на 35% під дією фульвокислоти
Накопичення цукрів	Зростання на 18,2%	Зростання на 22,1%

Застосування фульвокислот сприяє відновленню синтезу хлорофілу, збільшуючи вміст його попередників, таких як протопорфіни IX та магній-протопорфіни IX. Також ця сполука посилює активність ферментів асиміляції вуглецю (РУБІСКО та SBPase), що стабілізує процес фотосинтезу навіть за наявності несприятливих умов [35].

Таблиця 3.6 Вплив фульвокислот на ферменти та вуглеводний обмін вівса [35].

Показник	Вплив фульвокислоти під час посухи	Значення для рослини
РУБІСКО та RCA	Значне підвищення активності	Покращення фіксації вуглекислого газу та ефективності фотосинтезу
SBPase та FBA	Збільшення активності	Стабілізація циклу Кальвіна та генерація вуглецю
SPS та SS	Підвищення активності	Посилення здатності до синтезу сахарози
Вміст хлорофілу	Відновлення рівнів <i>a</i> та <i>b</i>	Підтримання здатності листя поглинати світлову енергію
Глюкоза та фруктоза	Подальше зростання вмісту	Підтримка осмотичного потенціалу та стабільності клітин
Врожайність зерна	Збільшення на 15.2% - 16.9%	Компенсація втрат, спричинених дефіцитом води

Важливим є використання мультиспектрального моніторингу, за якого нам вдалося встановити, що рекультиваційний ефект гуматів має пролонговану дію. Якщо подивитися на перші етапи, то різниця була менш помітна, а на етапі активної вегетації (індекс NDVI) розрив між контролем з нафтою (0,35) та обробленими варіантами (0,52-0,61) став критично значущим. І це підкреслює, що гумінові препарати не лише допомагають проростанню насіння, а й формують систему стійкості культури до кінця періоду спостереження.

Отже, дистанційний аналіз дозволив виявити позитивний вплив антистресантів на 5-7 діб раніше, ніж з'явилися помітні візуальні зміни, що підтверджує доцільність використання БПЛА для моніторингу рекультивації нафтозабруднених територій. [3].

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано сучасний стан та негативний вплив вуглеводнів нафти на агросферу. Встановлено, що нафтове забруднення спричиняє сильну деградацію фізико-хімічних властивостей ґрунту, створюючи гідрофобний бар'єр. Це призводить до порушення водного та газового обміну у системі (ґрунт-рослина), що є критичним для злакових культур на ранніх етапах онтогенезу. Визначено, що використання гумінових речовин є перспективним екологічно безпечним методом рекультивації таких територій.

2. Експериментально підтверджено високу токсичну дію нафти на посівні якості насіння. При моделюванні забруднення на рівні 5% від маси ґрунту спостерігалось суттєве пригнічення життєздатності вівса. Лабораторна схожість насіння знизилася на 24% відносно показників контрольного варіанту (з 96,1% до 72,4%). Така депресія зумовлена обволіканням насіннєвої шкірки нафтовою плівкою, що гальмує надходження вологи до зародка та блокує метаболічні процеси, необхідні для старту проростання.

3. Було встановлено, що препарати Fulvital Plus та Humifield Forte мають виражену стимулюючу дію на ріст вегетативної маси вівса на фоні нафтового стресу. Зокрема, довжина пагона у варіанті з використанням Humifield Forte (0,2 г/л) склала 6,8 см, що на 26% перевищує показники забрудненого контролю без обробки (5,4 см). Препарат Fulvital Plus (0,4 г/л) також продемонстрував позитивний ефект, збільшивши висоту пагона до 6,1 см.

4. Виявлено специфічні особливості розвитку кореневої системи під впливом гуматів. Встановлено, що при інтенсивному рості надземної частини спостерігається певне пригнічення довжини кореня (зменшення до 3,8-4,1 см порівняно з 4,2 см у контролі з нафтою).

5. Використано методику дистанційної оцінки стану рослин за допомогою БПЛА та доведено переваги використання безпілотних технологій у моніторингу рекультивації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Використання гуматів для підвищення стійкості рослин до нафтового забруднення ґрунтів / І. Ю Борецька, О. І., Романюк Н. М. Джуран // Вісник Львівського університету. Серія біологічна. 2023. Вип. 89. С. 85-93. URL: <https://journals.dspu.in.ua/index.php/actacarpatica/article/view/522/481>
2. Прогнозування розвитку ринку вівса в Україні в контексті трансформаційних економічних процесів / А. Діброва, Т. Мірзоева, В. Байдала та ін. // Financial and Credit Activity Problems of Theory and Practice. 2024. Т. 6 № 59. С. 487-508. URL: <https://doi.org/10.55643/fcaptp.6.59.2024.4534>
3. Математичні та програмні засоби моніторингу урожайності зернових культур із використанням геоінформаційних технологій. / Мачуляк М. В. Тернопіль, 2026. URL: <https://api.dspace.wunu.edu.ua/api/core/bitstreams/da365308-5a99-4316-9b3e-39a45de816dc/content>
4. Овес голозерний сорт вівса «Скарб України» // Ясно Агро: веб-сайт. URL: <https://yason-agro.com/wheat/oat/scarb-of-ukraine>
5. Response of oat (*Avena sativa* L.) Growth and Production to water stress conditions / Z. S. AL-Dulaimi, M. J. Ali SABRAO Journal of Breeding and Genetics. 2024. Vol. 56, No. 3. P. 1219-1227. URL: <http://doi.org/10.54910/sabrao2024.56.3.28>
6. Utilizing Multi-Omics Analysis to Elucidate the Molecular Mechanisms of Oat Responses to Drought Stress / X. Chen, J. Liu, B. Zhao et al. // Plants. 2025. Vol. 14, No. 5. Art. 792. URL: <https://doi.org/10.3390/plants14050792>
7. Biofortification – A Frontier Novel Approach to Enrich Micronutrients in Field Crops to Encounter the Nutritional Security / S. S. Dhaliwal, V. Sharma, A. K. Shukla, et al. // Molecules. 2022. Vol. 27, No. 4. Art. 27041340. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules27041340>
8. Stay-green trait improves yield and quality of forage oats under contrasting eco-sowing systems / H. Duan, R. Wu, W. Wang et al. // Frontiers in Plant Science. 2026. Vol. 16. Art. 1709486. URL: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1709486>

9. Effects of Ascorbic Acid and/or α -Tocopherol on Agronomic and Physio-Biochemical Traits of Oat (*Avena sativa* L.) under Drought Condition. / H.S. El-Beltagi, M. N. Suliman, H. I. Mohamed, et al. // Agronomy. 2022. Vol. 12, No. 10. Art. 2296. URL: <https://doi.org/10.3390/agronomy12102296>
10. Relationships Between Oat Phenotypes and UAV Multispectral Imagery Under Different Water Deficit Conditions by Structural Equation Modelling / Y. Feng, G. Wang, J. Wang et al. // Agronomy. 2025. Vol. 15, No. 6. Art. 1389. URL: <https://doi.org/10.3390/agronomy15061389>
11. Metabolic and Physiological Changes in the Roots of Two Oat Cultivars in Response to Complex Saline-Alkali Stress / Y. Gao, Y. Jin, W. Guo et al. // Frontiers in Plant Science. 2022. Vol. 13. Art. 835414. URL: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.835414>
12. Trends and Directions in Oats Research under Drought and Salt Stresses: A Bibliometric Analysis (1993-2023) / H. Huang, X. Wang, J. Li et al. // Plants. 2024. Vol. 13, No. 14. Art. 1902. URL: <https://doi.org/10.3390/plants13141902>
13. Zinc nanoparticles for enhancing plant resilience to abiotic stress: A Bibliometric Analysis and Review / M. Jafir, A. Khan, A. Ahmad et al. // Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 2024. Vol. 24. P. 1704 - 1719. URL: <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01733-w>
14. Various temperature effects on spikelet growth in hulless oat during grain-filling stage / C. S. Ko, J. S. Lee, Y. W. Seo. // Korean Journal of Breeding Science. - 2022. Vol. 54, No. 4. P. 345-352. URL: <https://doi.org/10.23986/afsci.121256>
15. Effects of Fertilizers and Soil Amendments on Soil Physicochemical Properties and Carbon Sequestration of Oat (*Avena sativa* L.) Planted in Saline-Alkaline Land / J. Liu, Y. Zhu, H. Wu et al.. // Agronomy. 2025. Vol. 15, No. 7. Art. 1582. URL: <https://doi.org/10.3390/agronomy15071582>
16. Biostimulant Application, under Reduced Nutrient Supply, Enhances Quality and Sustainability of Ornamental Containerized Transplant / D. Loconsole, G. Cristiano, B. De Lucia. // Agronomy. 2023. Vol. 13, No. 3. Art. 765. URL: <https://doi.org/10.3390/agronomy13030765>

17. Physiological and molecular profiling reveals defense mechanisms of oat (*Avena sativa* L.) defense mechanisms against powdery mildew / A. Ma, T. Liu, W. Tian, et al. // *Frontiers in Plant Science*. 2025. Vol. 16. Art. 1580472. URL: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1580472>
18. Evaluation of Oat Varieties Under Different Levels of Fertilization and Crop Protection in Conventional and Organic Systems / K. Madajska, A. Tratwal, K. Roik et al. // *Agriculture*. 2025. Vol. 15, No. 24. Art. 2538. URL: <https://doi.org/10.3390/agriculture15242538>
19. Phenotypic and genetic characterization of an *Avena sativa* L. germplasm collection of diverse origin: Implications for food-oat breeding in Chile / M. Mathias-Ramwell, V. Pavez, M. Meneses et al. // *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 14. Art. 1298591. URL: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1298591>
20. Mavic 3 Multispectral: Specs and Features. - DJI Official Website: веб-сайт. - URL: <https://kvshop.com.ua/ru/kvadrokoptery/dji/dji-mavic-3m-enterprise-multispectral-eu-cp-en-00000444-01.html>
21. Review of Amino Acid Foliar Application as a Stress Mitigation Strategy: Unraveling the Protective Mechanisms Against Abiotic Stress / X. Ma, M. Kayoumu, Y. Yin et al. // *Journal of Sustainable Agriculture and Environment*. 2026. Vol. 5. URL: <https://doi.org/10.1002/sae2.70135>
22. Accelerated Breeding Approaches for Improved Productive and Quality in Dual-Purpose Oats / P. Priyadarshini, J. Tilgam, Indu et al. // *Accelerated Plant Breeding*, 2025. Vol.5.P.221-257.URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-032-04527-0_10
23. Biofortification of Oats (*Avena sativa*) / M. Rana, P. Priyadarshini, G. Guleria et al. - *Biofortification in Cereals: Progress and Prospects*, 2023. P. 285-309. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-19-4308-9_11
24. Genetic diversity amongst oat (*Avena sativa*) lines for micronutrients and agro-morphological traits / R. Ranjan, S. Chand, Indu et al. // *Indian Journal of Agriculture Sciences*. 2024. Vol. 94, No. 6. P. 665-672. URL: <https://www.researchgate.net/profile/Subhash-Chand->

[4/publication/381271608_Genetic_diversity_amongst_oat_Avena_sativa_lines_for_micronutrients_and_agro-morphological_traits/links/66645ee9a54c5f0b9456da0f/Genetic-diversity-amongst-oat-Avena-sativa-lines-for-micronutrients-and-agro-morphological-traits.pdf](https://doi.org/10.3390/publication/381271608_Genetic_diversity_amongst_oat_Avena_sativa_lines_for_micronutrients_and_agro-morphological_traits/links/66645ee9a54c5f0b9456da0f/Genetic-diversity-amongst-oat-Avena-sativa-lines-for-micronutrients-and-agro-morphological-traits.pdf)

25. Reference genome assemblies reveal the origin and evolution of allohexaploid oat / Y. Peng et al. // Nature Genetics. 2022. Vol. 54, No. 8. P. 1248-1258. URL: <https://doi.org/10.1038/s41588-022-01127-7>

26. Comparative Analysis of the NDVI and NGBVI as Indicators of the Protective Effective Effect of Beneficial Bacteria in Conditions of Biotic Stress / Solano-Alvarez N. et al. // Plants. 2022. Vol. 11, No. 7. Art. 932. URL: <https://doi.org/10.3390/plants11070932>

27. Physiological responses and drought resistance evaluation of forage oat (*Avena sativa* L.) seedling cultivar under drought stress / T. Song, J. Hang, X. Shi, et al // Plant Signaling & Behavior. 2025. Vol. 20, No. 1. Art. 2574391. URL: <https://doi.org/10.1080/15592324.2025.2574391>

28. Integrated transcriptomic, metabolomic and lipidomic analyses uncover the crucial roles of lipid metabolism pathways in oat (*Avena sativa*) responses to heat stress / Y. Sun, H. Jing, Z. Li et al. // BMC Genomics. 2025. Vol. 26. P. 780. URL: <https://link.springer.com/article/10.1186/s12864-025-11972-5>

29. Analysis of Heavy Metal Impacts on Cereal Crop Growth and Development in Contaminated Soils / I. C. Vasilachi, V. Stoleru, M. Gavrilescu // Agriculture. 2023. Vol. 13, No. 10. Art. 1983. URL: <https://doi.org/10.3390/agriculture13101983>

30. Deciphering Drought Response Mechanisms in Oat Through Comprehensive Transcriptomic and Physiological Analysis / B. Wang, H. Yin, X. Zhang et al. // International Journal of Molecular Sciences. 2026. Vol. 15, No. 3. Art. 453. - URL: <https://doi.org/10.3390/plants15030453>

31. Selection of oat (*Avena sativa* L.) drought-tolerant genotypes bases on multiple yield-associated traits / G. Wen, B. -L. Ma, Y. Shi et al. // Journal of the

Science of Food and Agriculture. 2023. Vol. 103. P. 4380-4391. URL: <https://doi.org/10.1002/jsfa.12504>

32. Important Physiological Changer Due to Drought Stress on Oat / H. Xie, M. Li, Y. Chen et al. // Frontiers in Ecology and Evolution. 2021. Vol. 9. Art. 644726. URL: <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.644726>

33. Intraspecific Differences in Spectral Reflectance Curves as Indicators of Reduced Vitality in High-Arctic Plants / Zagajewski B. et al. // Remote Sensing. 2017. Vol. 9. No. 12. Art. 1289. URL: <https://doi.org/10.3390/rs9121289>

34. Genome-wide analysis and expression of the aquaporin gene family in *Avena sativa* L. / X. Zhou, D. Yi, L. Ma et al. // Frontiers in Plant Science. 2024. Vol. 14. Art. 1305299. URL: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1305299>

35. Fulvic Acid Enhance Oat Growth and Grain Yield Under Drought Deficit by Regulating Ascorbate-Glutamine Cycle, Chlorophyll Synthesis, and Carbon-Assimilation Ability / S. Zhu, L. Mi, B. Zhao et al. // Agronomy. 2025. Vol. 15, No. 5. Art. 1153. URL: <https://doi.org/10.3390/agronomy15051153>