Уманський національний університет
Факультет фізико-математичної та природничої освіти
Кафедра хімії та біології

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
освітній ступінь бакалавр

на тему: **РІСТ ТА РЕПРОДУКТИВНИЙ РОЗВИТОК КОНОПЕЛЬ ЗА ОРГАНІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОЩУВАННЯ**

Виконала: студенкта IV курсу, 47 групи
спеціальності: 091 Біологія та біохімія
Освітня програма: Біологія
Шумейко Вероніка Володимирівна
Керівник: канд. біол. наук, доц. Красноштан І. В.
Рецензент: канд. с.-г. наук, доц. Заморський О. О.

Умань – 2026

ЗМІСТ

ВСТУП 4
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ
ТА БІОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ РОЗВИТКУ
КОНОПЕЛЬ ПОСІВНИХ (*CANNABIS SATIVA* L.) 7
1.1. Ботанічна характеристика, морфологія
та етапи онтогенезу виду 7
1.2. Фізіолого-екологічне обґрунтування життєдіяльності
рослин в умовах органічного землеробства 10
1.3. Роль симбіотичних взаємодій та ґрунтової мікрофлори у забезпеченні
ростових процесів культури 12
1.4. Репродуктивний потенціал конопель та чинники,
що детермінують його реалізацію 13
РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТ, МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДОЛОГІЯ
СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ 16
2.1. Характеристика об'єктів дослідження
та природно-кліматичні умови району спостережень 16
2.2. Методика проведення досліджень та опис
масиву експериментальних даних 18
2.3. Алгоритм системної інтерпретації результатів
та методи статистичної обробки біологічних показників 20
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ВПЛИВУ ОРГАНІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА
НА РІСТ ТА МОРФОГЕНЕЗ КОНОПЕЛЬ ПОСІВНИХ 21
3.1. Динаміка лінійного росту та формування вегетативної сфери
залежно від генотипу (сорту) 21
3.2. Адаптивні зміни біометричних параметрів стебла
в умовах органічного живлення 27
3.3. Аналіз реалізації репродуктивного потенціалу
та біосинтезу вторинних метаболітів 34

РОЗДІЛ 4. ЕКОЛОГО-БІОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ
СТАНУ ЕДАФОТОПУ В ОРГАНІЧНИХ АГРОЦЕНОЗАХ
КОНОПЕЛЬ ПОСІВНИХ 43
4.1. Динаміка чисельності та якісного складу
мікробіоценозу ризосфери 43
4.2. Аналіз популяційної щільності біоіндикаторів
ґрунтової мезофауни 45
4.3. Системний аналіз взаємозв’язків
між біотичними компонентами та поживним режимом ґрунту 46
ВИСНОВКИ 50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 52

ВСТУП

Коноплі посівні (*Cannabis sativa* L.) належать до тих унікальних культур, які людство здавна використовує в багатьох сферах свого життя. Ця рослина, що відзначається потужною морфологією та високою біологічною пластичністю, має величезне значення як продовольча, технічна, лікарська, а також культова сільськогосподарська культура. Тривалий час вирощування конопель в Україні та світі було суттєво обмежене через вміст канабіноїдів, що призвело до їх майже повного зникнення з виробничих площ. Додатковим фактором занепаду галузі став стрімкий розвиток виробництва синтетичних полімерних волокон.

Проте сьогодні наука та виробництво знову звертають увагу на *Cannabis sativa*. Це пов’язано з унікальним складом конопляної олії, яка є вкрай цінною для харчової та лакофарбової промисловості, а також із винятковими властивостями конопляного волокна. З нього виготовляють широкий спектр екологічної продукції: від міцних канатів і брезенту до ексклюзивного одягу, взуття та матеріалів спеціального призначення. Дедалі активніше обговорюється використання продуктів коноплярства в медицині для терапії тяжких захворювань. Рослина має значний біологічний потенціал для будівельної, паперової та ізоляційної галузей, а також для фіторемедіації забруднених ґрунтів, виробництва біопалива та розвитку новітніх біотехнологій.

В умовах органічного землеробства коноплі відіграють особливу роль. Їхня невибагливість до умов середовища, висока здатність конкурувати з іншими компонентами біоценозів (зокрема, бур’янами), стійкість до шкідників та хвороб роблять цю культуру ідеальним фітомеліорантом та компонентом для конструювання сівозмін у господарствах, що займаються екологічно безпечним виробництвом.

Актуальність проблеми. Сучасна біологічна наука потребує чіткого розуміння того, як саме рослини адаптуються до екологічно чистих умов

вирощування та як реалізують свій генетичний і репродуктивний потенціал. Коноплі посівні є чудовим модельним об’єктом для таких досліджень завдяки своїй здатності швидко фізіологічно реагувати на зміни навколишнього середовища. В органічному землеробстві, де повністю виключається використання хімічних добрив та пестицидів, ріст, інтенсивність фотосинтезу і репродуктивний розвиток конопель безпосередньо залежать від взаємодії кореневої системи з ґрунтом та його складним мікробіоценозом. Незважаючи на великий інтерес до цієї культури, фізіологічні механізми, які визначають її онтогенез, морфологічні зміни та формування насіння за органічного вирощування в умовах нестійкого зволоження Лісостепу України, вивчені ще недостатньо. Це викликає об’єктивну потребу детально проаналізувати наявні експериментальні дані. Такий аналіз важливий як для фундаментальної ботаніки і фізіології рослин, так і для практичного застосування в екології угруповань.

Мета дослідження: проаналізувати та науково обґрунтувати фізіологічні, морфометричні та репродуктивні особливості розвитку *Cannabis sativa* L. під впливом чинників органічної системи вирощування, спираючись на системну інтерпретацію експериментальних даних.

Завдання дослідження:

1. Здійснити огляд сучасної наукової літератури щодо фізіологічних та еколого-біологічних особливостей розвитку конопель посівних.
2. Дослідити зміну параметрів едафотопу (ґрунтового середовища) та визначити, як коренева система рослин взаємодіє з ґрунтовою мікрофлорою, зокрема за використання мікробіологічних деструкторів.
3. Оцінити інтенсивність ростових процесів та морфологічну пластичність сучасних сортів конопель за умов органічного культивування.
4. Виявити фізіологічні закономірності та кореляційні зв’язки між наростанням вегетативної маси, формуванням насіння (реалізація репродуктивного потенціалу) та накопиченням олії в умовах органічного середовища.

Об’єкт дослідження: процеси росту, морфогенезу та репродуктивного розвитку рослин виду *Cannabis sativa* L. за умов функціонування систем органічного землеробства.

Предмет дослідження: фізіологічні реакції, адаптивні зміни морфологічної будови та закономірності формування репродуктивних органів у різних сортів *Cannabis sativa* L. залежно від ґрунтово-мікробіологічних умов екологічно безпечного середовища.

Методи дослідження. Відповідно до поставлених завдань, робота ґрунтується на детальному аналізі експериментальних даних, отриманих у межах фахових наукових досліджень, та їхній системній інтерпретації. Використано комплекс загальнонаукових методів (аналіз, синтез, висування наукових гіпотез, біологічне моделювання) та спеціальних підходів. Для оцінки динаміки ростових процесів та формування репродуктивних структур застосовано аналітичні підходи до біометричних і статистичних параметрів (зокрема, кореляційний аналіз для встановлення зв’язків між мікробіологічною активністю ґрунту, розвитком коріння та синтезом вторинних метаболітів). Фізіолого-екологічний метод використано для вивчення симбіотичних взаємодій рослин із ґрунтовими мікроорганізмами.

Практичне значення одержаних результатів. Аналітичне обґрунтування механізмів адаптації та репродуктивного розвитку конопель створює надійну базу для оптимізації біологічних моделей їх вирощування. Розуміння того, як конкретні сорти (Глоба, Лара, Сула) реагують на екологічні чинники під час свого розвитку, дає змогу краще управляти їхнім репродуктивним потенціалом. Виявлені закономірності взаємодії між ростом кореневої системи та активністю ґрунтового мікробіоценозу мають вагоме значення для розвитку прикладної ботаніки, фізіології рослин та екології.

Публікації автора за темою дослідження:

Структура роботи:

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА БІОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ РОЗВИТКУ КОНОПЕЛЬ ПОСІВНИХ (*CANNABIS SATIVA* L.)

1.1. Ботанічна характеристика, морфологія та етапи онтогенезу виду

Коноплі посівні (*Cannabis sativa* L.) характеризуються високим рівнем морфологічної пластичності та адаптивності до мінливих умов навколишнього середовища. Однією з ключових біологічних особливостей виду, що детермінує його високу життєздатність, є потужна стрижнева коренева система. Формування такої архітектоніки розпочинається з інтенсивного поділу клітин апікальної меристеми зародкового корінця, що забезпечує швидке проникнення в нижні ґрунтові горизонти. За фізіологічною активністю, інтенсивністю дихання кореневих волосків та загальною глибиною проникнення вона значно перевершує кореневу систему багатьох інших культур, зокрема кукурудзи [1]. В онтогенезі коріння конопель здатне проникати в ґрунтовий профіль на глибину 45–90 см [2]. Така глибока і розгалужена архітектоніка підземної частини не лише механічно розпушує субстрат, покращуючи фізичні властивості, структурованість та аерацію ґрунту [3, 4], але й відіграє критичну роль у процесах фіторемедіації. Рослини мають яскраво виражену здатність абсорбувати з ґрунтового розчину важкі метали, серед яких свинець (Pb), нікель (Ni), кадмій (Cd) та мідь (Cu) [2], а також високотоксичні елементи – миш’як (As) і ртуть (Hg) [5; 6]. Фізіологічний механізм цієї стійкості полягає у складних процесах компартменталізації токсикантів на клітинному рівні: за участю специфічних білків-металотіонеїнів та фітохелатинів важкі метали зв’язуються в хелатні комплекси. Переважна більшість поглинених елементів не залишається в тканинах кореня, а транслокується по ксилемних судинах з транспіраційним потоком та безпечно депонується у вакуолях клітин листкового апарату [7]. Дослідження в зонах радіоактивного забруднення продемонстрували унікальну фізіологічну вибірковість іонних каналів культури: між накопиченням радіонуклідів (зокрема ізотопу Cs_{137}) і загальною біомасою

агроценозу існує стійка зворотна кореляція, що дозволяє отримувати відносно чисте волокно навіть на контамінованих територіях [8]. Крім того, епідермальні клітини кореневої системи активно продукують і виділяють у ризосферу специфічні алелопатичні ексудати. Ці органічні кислоти та фенольні сполуки здатні інгібувати проростання спор та пригнічувати розвиток міцелію патогенного гриба *Verticillium dahlia*, а також порушувати хемотаксис небезпечних кореневих нематод *Meloidogyne chitwoodi* і *Meloidogyne hapla* [9].

Проходження етапів онтогенезу *C. sativa* тісно пов’язане з температурним та фотоперіодичним режимами, які регулюють активність фітохромної системи рослини. Оптимальною для активного росту, підтримання тургору та високої інтенсивності фотосинтезу (зокрема оптимуму роботи ферменту Рубіско) є середньодобова температура повітря 16–27 °C. Процес проростання насіння ініціюється за температури 8–10 °C і триває впродовж 8–10 днів. У цей період відбувається гідратація тканин насіння та активація гідролітичних ферментів, що мобілізують запасні речовини ендосперму. На початкових етапах вегетації рослини проявляють значну стійкість до стресових температур, що зумовлено швидким синтезом стресових білків та зміною в’язкості клітинних мембран: молоді екземпляри у фазі 8–10 листків здатні витримувати короткочасне зниження температури до мінус 5 °C. Висока пластичність ростових процесів яскраво підтверджується тим, що біометричні показники (висота стебла та розмір асиміляційної поверхні), яких рослини досягають у польових умовах за 90 днів, можуть бути сформовані лише за 40 днів в умовах контрольованого середовища за стабільної температури 19 °C шляхом точного регулювання суми активних градусо-днів [10]. Натомість температурний стрес, коли максимальна добова температура перевищує 30 °C під час чутливої фази наливу насіння, стає жорстким лімітуючим чинником. Він спричиняє денатурацію білкових комплексів тилакоїдних мембран, посилює фотодихання та гальмує вторинний метаболізм, що суттєво обмежує накопичення в насінні жирних

кислот та олії [11].

Ритми росту та морфогенезу також жорстко детермінуються вологозабезпеченням, оскільки вода виступає як донор електронів у світловій фазі фотосинтезу та забезпечує транспорт асимілятів по флоемі. Найбільша фізіологічна потреба у воді спостерігається протягом перших шести тижнів активного росту, коли відбувається інтенсивне розтягнення клітин і наростання вегетативної маси. Загалом для повноцінного розвитку культури сума опадів (зокрема в критичний період водоспоживання червень-липень) повинна становити 630–750 мм на рік. Сильна посуха діє як фізіологічний стресор, що викликає синтез абсцизової кислоти, закриття продихів та припинення лінійного росту. Це значно прискорює генеративний розвиток та дозрівання насіння (реакція уникнення стресу), але негативно позначається на біометричних параметрах рослин і врожайності [12]. Формування габітусу суттєво залежить від внутрішньовидової конкуренції за світловий ресурс (синдром уникнення затінення). За високої густоти стояння (180–270 рослин на 1 $м^2$) зміна спектрального складу світла (зниження співвідношення червоного до дальнього червоного світла) фіксується фітохромами. Цей сигнал індукує посилений синтез ауксинів, що провокує етіоляцію – надмірне розширення міжвузль із одночасним гальмуванням росту стебла в діаметрі та зниженням розвитку механічних тканин. За таких умов жорсткої боротьби за життєвий простір елімінується (гине внаслідок конкурентного витіснення) до 50–60 % рослин [12]. Водночас оптимізація азотного живлення (в межах 60–200 кг/га) здатна стимулювати мітотичну активність камбію, збільшуючи висоту та діаметр стебла [13].

Важливим етапом онтогенезу є перехід від вегетативного росту до генеративної фази, що супроводжується глибокою перебудовою апікальної меристеми. Біологія цвітіння конопель зазнала суттєвих трансформацій завдяки селекційному тиску та генетичній модифікації статевої експресії: від типової дводомності до формування стійких однодомних популяцій. Сучасні популяції характеризуються тим, що 85–98 % рослин припадає на однодомну

фемінізовану матірку, причому до 75 % екземплярів мають більшу кількість маточкових (жіночих) квіток порівняно з тичинковими (чоловічими) [14].

1.2. Фізіолого-екологічне обґрунтування життєдіяльності рослин в умовах органічного землеробства

Функціонування рослинного організму в системі органічного землеробства (Organic Farming), що концептуально базується на суворих екологічних вимогах Міжнародної федерації органічного сільськогосподарського руху (IFOAM), вимагає глибокої фізіологічної адаптації кореневої системи до умов повної відсутності екзогенних водорозчинних мінеральних добрив та синтетичних пестицидів [15]. За таких умов життєдіяльність *C. sativa* регулюється виключно природним біологічним потенціалом ґрунту, його ферментативною активністю та біологізованими методами підвищення родючості [16].

Азотний метаболізм відіграє ключову роль у формуванні структурних білків та хлорофілу, проте в органічному середовищі азот стає доступним лише після тривалої мікробіологічної мінералізації та нітрифікації органічних решток. Тому існують дискусії щодо оптимуму його забезпечення в різні фази вегетації [17]. За оптимізації азотного статусу (в еквіваленті 60–200 кг/га чистої діючої речовини) фізіологічно стимулюється біосинтез амінокислот, посилюється лінійний ріст та накопичення біомаси [18]. В органічних агроценозах трофічні потреби рослин компенсуються внесенням тваринної органіки. Зафіксовано, що максимального біологічного врожаю вегетативної маси та насіння вдається досягти за внесення 20 т коров’ячого гною (сумісно зі 100 кг/га азоту). При цьому зміна пропорцій органіки істотно впливає на фізіологічний розподіл асимілятів (донорно-акцепторні відносини між органами): застосування підвищеної норми у 30 т/га гною та 100 кг/га азоту надмірно стимулює наростання листкового апарату, гальмуючи перехід до репродуктивної фази, що знижує індекс урожаю насіння. Фізіологічний парадокс полягає в тому, що найвищий вміст олії в насінні синтезується за

дещо обмеженого живлення – за внесення азоту 50 кг/га без додаткового застосування фосфору [19].

Динаміка засвоєння фосфору (P_2O_5), який є необхідним для синтезу АТФ та нуклеїнових кислот, має чітко виражену онтогенетичну специфіку [20; 21]. Протягом усієї вегетативної стадії та фази цвітіння елемент поглинається коренями повільно і кумулюється переважно в листках. Однак наприкінці фази цвітіння, коли запускаються механізми старіння вегетативних органів, відбувається масовий реутилізаційний відтік фосфору по флоемі до генеративних органів (насіння, що розвивається), унаслідок чого понад 70 % цього елементу концентрується в ньому [22].

Високу фізіологічну ефективність в екологічних моделях демонструють альтернативні, біологічно активні джерела живлення. Застосування дигестату (рідкого залишку метанового бродіння, який позбавлений патогенів та містить розчинні форми поживних речовин) у дозі 4,4 т/га здатне забезпечити формування біомаси на рівні 8,68 т/га [23]. Ефективним субстратом також виявилися відходи розведення тутового шовкопряда (*Bombyx mori* L.), що містять хітин та стимулюють імунні реакції рослини, оптимізуючи ростові процеси за норми внесення 15 т/га [24]. Покращення трофічного режиму ґрунту сприяє пролонгації активності хлоропластів та подовженню періоду інтенсивного фотосинтезу, що дозволяє збільшити масу насіння з 1,57 до 2,27 т/га, а соломи – з 5,22 до 7,58 т/га [25]. Екологічна значущість таких підходів підсилюється тим, що для промислового хімічного синтезу 1 тонни азотних добрив (у процесі Габера-Боша) витрачається 4 тонни нафти або аналогічна кількість газу [26]. Об’єктивними біологічними критеріями оцінки ефективності органічних моделей виступають індикатори життєвості ґрунту: інтенсивність розкладання целюлози ґрунтовими бактеріями, рівень емісії дихального CO_2, відсутність фітотоксичності та стабілізація вмісту гумусу [27].

1.3. Роль симбіотичних взаємодій та ґрунтової мікрофлори у забезпеченні ростових процесів культури

В екологічно безпечних агроценозах успішність проходження онтогенезу коноплями значною мірою залежить від взаємодії епідермісу кореня з бактеріальним та грибним комплексами ризосфери. Найважливішою фізіологічною адаптацією є здатність *C. sativa* вступати в мутуалістичні ендосимбіотичні відносини з арбускулярною мікоризою. Гіфи мікоризних грибів проникають у корову паренхіму кореня, формуючи арбускули, де відбувається активний обмін речовинами: рослина постачає грибу вуглеводи (продукти фотосинтезу), а гриб значно розширює площу живлення рослини, покращуючи абсорбцію важкодоступних форм фосфору, мікроелементів і води. Це фізіологічно підвищує посухостійкість та конкурентоспроможність рослин щодо бур’янів [28]. Відповідно до цих біоценотичних особливостей, коноплі є цінним попередником для озимої пшениці [29] та сої [30], і навіть можуть тривалий час вирощуватися в монокультурі без ознак ґрунтовтоми [31], хоча розміщення після соняшнику може призводити до виснаження ґрунтового пулу поживних речовин і погіршувати якість продукції [32].

Біохімічна комунікація рослини з навколишнім біотичним середовищем забезпечується кореневими ексудатами, які містять алелопатичні сполуки [33], та активним синтезом широкого спектра вторинних метаболітів у надземній частині: стероїдів, флавоноїдів, лігнанів, алкалоїдів. Проте домінуючу фітонцидну роль відіграють терпени та канабіноїди [34]. Завдяки цим виділенням рослини проявляють природні інсектицидні (відлякування комах) [35], акарицидні (захист від кліщів) [36] та нематоцидні [37] властивості. Алелопатичні виділення конопель істотно пригнічують розвиток багатьох шкідливих ґрунтових організмів [38]. Незважаючи на цю потужну біохімічну броню, культура залишається вразливою до високоспеціалізованих видів нематод. Зокрема, *Caenorhabditis elegans*, *Meloidogyne incognita*, *Meliodogyne hapla*, *Meloidogyne javanica* та стеблова нематода (*Ditylenchus dipsaci*) здатні долати захисні бар’єри рослини, утворюючи гали (патологічні розростання

тканин) на коренях. Ураження цими патогенами блокує провідні судини, що викликає глибоке порушення водного обміну, що зовнішньо проявляється як затримка росту, вкорочення міжвузль та локальне в’янення [39]. Оскільки дослідження механізмів імунітету до цих нематод все ще фрагментарні, вирішальну роль у зниженні патогенного навантаження відіграє дотримання науково обґрунтованої сівозміни [40].

Коноплі органічно інтегруються у трофічні ланцюги ґрунтової мезофауни, виступаючи джерелом детриту. Доведено, що агроценози конопель не порушують життєвий цикл та не мають негативного впливу на популяції дощових черв’яків, зокрема *Lumbricus terrestris*, які виступають ключовими біоіндикаторами екологічного здоров’я ґрунту [38]. Залишки біомаси конопель, збагачені целюлозою та лігніном, ефективно переробляються цими детритофагами у копроліти. Це прискорює гуміфікацію органіки та сприяє біологічному зв’язуванню важких металів у ґрунтовому профілі, хоча статистично достовірна пряма кореляція між кількістю черв’яків і фінальною врожайністю культури відсутня [41]. Надзвичайно чутливими індикаторами мікробіологічного благополуччя таких ґрунтів також виступають представники мікрофауни – коловертки (Rotifera), які завдяки проникним покривам тіла гостро реагують на найменші коливання pH, температури та наявність токсикантів у ґрунтовому розчині [42].

1.4. Репродуктивний потенціал конопель та чинники, що детермінують його реалізацію

Реалізація репродуктивного потенціалу *C. sativa* (формування квіток і насіння) тісно корелює з фенологічними ритмами та реакцією рослини на довжину світлового дня. Фізіологічні дослідження виявляють чіткий антагонізм між інтенсивністю вегетативного росту та генеративним розвитком: сорти, що пізно реагують на скорочення світлового дня і пізно переходять у фазу цвітіння, встигають продукувати значну масу здерев’янілих стебел (що становить велику цінність для біоенергетики), але

характеризуються вкрай низькою інтенсивністю формування насіння [43; 44]. Відмічається також, що збільшення загальної маси луб’яного волокна має строгу зворотну кореляцію з його якісними гістологічними характеристиками: зі збільшенням урожайності соломи зростає частка вторинної деревини, що знижує еластичність і вміст чистої целюлози [45]. Генотип відіграє домінуючу роль у формуванні архітектоніки клітинних стінок: генетично зумовлене варіювання вмісту клітковини є надзвичайно широким і становить 25–47 % [46].

Унікальною фізіолого-біохімічною рисою роду *Cannabis* є здатність епідермальних залозистих трихом синтезувати специфічні вторинні метаболіти – канабіноїди (КБД, ТГК та ін.), які в природі виконують роль захисту від ультрафіолетового випромінювання та травоїдних тварин [47]. Багаторічні досягнення генетиків та селекційні програми [48] спрямовані на штучне блокування ферментативних шляхів синтезу психотропних сполук, що призвело до встановлення суворих норм: рівень тетрагідроканабінолу (ТГК) у тканинах не повинен перевищувати 0,08 % [49]. Важливим фітохімічним фактом є те, що безпосередньо в ендоспермі та зародку насіння конопель канабіноїди повністю відсутні [50]. Натомість інтенсивність їх синтезу у вегетативних органах (листках, приквітках) є дуже мінливою і модулюється впливом екзогенних факторів довкілля: інтенсивністю сонячної радіації, водним та температурним стресом. Паралельно розвивається вузькоспеціалізована селекція сортів із підвищеною експресією генів, що відповідають за синтез непсихотропного канабідіолу (КБД) для використання у фармакологічних та терапевтичних цілях [51; 52]. Проте зберігається ризик накопичення залишкового Δ9-ТГК на оболонках насіння під час обмолоту, що становить ризик для харчових продуктів (олії, борошна) і потребує суворого токсикологічного контролю [53].

Генеративна продуктивність рослин (маса сформованого насіння) є безцінним джерелом енергетичних та структурних метаболітів [54]. Процес накопичення ліпідів у насінні суворо детермінується генетичними

особливостями сорту: технологічний вихід олії може коливатися в межах 79–84 % [55]. Біохімічний профіль конопляної олії відзначається унікальним співвідношенням поліненасичених жирних кислот, насамперед ессенціальних лінолевої (C18:2, ω-6) і α-ліноленової (C18:3, ω-3), які не синтезуються в організмі людини, але критично необхідні для побудови клітинних мембран. Неомилювана фракція олії багата на фітостероли та токофероли, які проявляють потужну антимікробну дію та фізіологічну здатність знижувати рівень ліпопротеїдів низької щільності (холестерину) у крові [56]. Прикметно, що на відміну від загальної маси врожаю насіння, яка сильно залежить від погоди, ферментативний механізм синтезу жирних кислот (робота специфічних десатураз) проявляє високу біохімічну стабільність, тому жирнокислотний склад олії майже не залежить від коливань агроекологічних умов [57].

З точки зору фізіології живлення (трофології) та біохімії, насіння конопель є потужним резервуаром структурних протеїнів. Усього 2-3 столові ложки насіння містять близько 11 г легкозасвоюваного білка, представленого переважно глобуліном едестином та альбуміном [58]. Загалом ендосперм та сім’ядолі зародка акумулюють 20–25 % білків надзвичайно високої біологічної цінності, які за повнотою профілю життєво необхідних амінокислот (включаючи метіонін, лізин і цистеїн) наближені до еталонного тваринного білка курячого яйця [59]. Крім того, клітини насіння містять велику кількість енергетичних та пластичних матеріалів: 25–35 % ліпідів, 20–30 % вуглеводів, а також оболонки забезпечують 10–15 % нерозчинних харчових волокон (клітковини) і життєво важливих зольних макро- та мікроелементів, які беруть участь у ключових метаболічних процесах: фосфору (P), калію (K), сірки (S), натрію (Na), магнію (Mg), кальцію (Ca), заліза (Fe) та цинку (Zn) [60].

РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТ, МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДОЛОГІЯ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

2.1. Характеристика об'єктів дослідження та природно-кліматичні умови району спостережень

Ця кваліфікаційна робота носить аналітично-дослідницький характер і базується на системній інтерпретації репрезентативного масиву експериментальних даних, отриманих на базі екологічно безпечних агроценозів (органічних моделей) Лівобережно-Дніпровської лісостепової фізико-географічної провінції [61].

Формування вегетативної та генеративної сфер рослин відбувалося у специфічному едафічному середовищі. Переважна більшість ґрунтів досліджуваного регіону (близько 93 %) представлена типовими чорноземами, серед яких типові та звичайні малогумусні різновиди становлять 59,5 %. Загальна кількість гумусу в цих ґрунтах варіює в межах 3,3–4,2 % [62]. За даними О. М. Маринич та П. Т. Шищенка [63], на півдні області локалізовані солонцюваті ґрунти. Загалом, ґрунти із середнім і підвищеним вмістом органічної речовини (гумусу) становлять 49,2 % і 37,5 % відповідно. Високий і дуже високий вміст гумусу фіксується лише на 10,5 % і 0,7 % площ. З біохімічної точки зору, едафотоп характеризується відчутним дефіцитом важливих для ферментативних процесів мікроелементів: міді (Cu), марганцю (Mn) та цинку (Zn). Серйозним екологічним ризиком для ризосфери є ерозійні процеси, які поширюються на 749 тис. га. Загальна розораність лісостепових ландшафтів (яких понад 90 %) перевищує 80 %, що вимагає впровадження біологізованих методів відтворення родючості.

Кліматичні чинники виступали ключовими абіотичними факторами, що детермінували ритми онтогенезу конопель. Регіон характеризується помірно континентальним кліматом із нестійким зволоженням. Середня багаторічна температура становить 8,2 °C, проте абсолютні значення коливаються у вкрай широких межах: від мінус 36 °C до плюс 39 °C. Середня висота снігового

покриву становить 20–60 см, а глибина промерзання ґрунтового профілю досягає 64–112 см. Кількість опадів становить 253,8–777,4 мм за рік.

Аналіз масиву метеорологічних даних за період проведення первинних польових експериментів дозволив оцінити вплив температурних та водних стресорів на фізіологію рослин. У 2019 році у квітні фіксувалися критичні для сходів приморозки до мінус 6,9 °С (при максимальній температурі 20 °С та середньомісячній 11,6 °С, на поверхні ґрунту – 13,3 °С). Травень відзначився різким потеплінням: середня температура становила 18,5 °С (на 2,6 °С вище норми), а на поверхні ґрунту максимальна температура сягнула 49 °С. У червні спостерігався тепловий стрес – середня температура сягнула 24,5 °С (на 5 градусів вище норми), повітря прогрівалося до 35,6 °С, а ґрунт – до 56,5 °С. Липень і серпень також були спекотними: у липні (середня 22,3 °С, повітря 3,1–34,0 °С, ґрунт 4,5–55,6 °С), у серпні повітря прогрівалося до 34,0 °С, а поверхня ґрунту – до 55,0 °С (на 2,2 °С тепліше за багаторічні показники). Режим зволоження був нерівномірним: квітневий дефіцит (на 15,4 мм менше норми у 44 мм) змінився надлишком у травні (130,7 мм за норми 50 мм). У червні та липні випало 62,7 мм та 56,3 мм (за норми 57,0 та 72,0 мм), а в серпні зафіксовано жорстку посуху – лише 14,3 мм опадів (на 44 мм менше норми).

Навесні 2020 року рослини знову зазнавали стресу від квітневих приморозків до мінус 6,0 °С (максимум повітря 24 °С, ґрунту – 37,5 °С). Травень був прохолоднішим (14,8 °С), з приморозками на ґрунті до мінус 1 °С навіть 23 травня. Літній період супроводжувався екстремальною спекою: у червні (23,8 °С, повітря 6,1–34,5 °С, ґрунт до 57,5 °С), липні (максимум повітря 38 °С, ґрунту – 60,5 °С) та серпні (23,0 °С за норми 19,8 °С, ґрунт до 57,0 °С). Посуха літа 2020 року стала потужним лімітуючим фактором: після надлишкового травня (81,2 мм) у червні випало на 30 мм менше норми, у липні – 31,4 мм (дефіцит 40 мм), а в серпні – критичні 2,4 мм за норми 58,0 мм.

У 2021 році температурний режим також демонстрував флуктуації: у квітні повітря прогрівалося до 9,1 °С (ґрунт до 38 °С), з приморозками до мінус 3,0 °С. Травень відповідав нормі (16,7 °С, ґрунт до 48 °С). Червень і липень

були теплішими за норму на 2,2 °С та 4,9 °С (максимум ґрунту 58,5 °С), серпень супроводжувався температурою повітря 35 °С (ґрунту 55,5 °С), хоча вночі фіксувалося зниження до 11,5–12,6 °С. Опади розподілялися нерівномірно: дефіцит у квітні (-27 мм) та липні (-34 мм) контрастував із надлишком у травні (64,3 мм) та червні (101 мм).

2.2. Методика проведення досліджень та опис масиву експериментальних даних

Планування первинних експериментів, дані яких інтерпретовано в роботі, відбувалося згідно з методиками Б. О. Доспєхова [62] та В. Ф. Мойсейченка і В. О. Єщенка [64].

Біологічним об’єктом дослідження слугували генотипи конопель посівних (сорти відчизняної селекції Глоба, Лара, Сула [65; 66] та стандарти Гляна і Золотоніські 15), які характеризуються високою екологічною пластичністю. Фізіологічна норма реакції насіння передбачає здатність до проростання в діапазоні температур від 1 до 45 °С. Проростки здатні толерувати зниження температури до мінус 3–5 °С протягом 12–15 днів. Найбільш інтенсивний ріст у період цвітіння (критична фаза) спостерігається за температури 17–23 °С. Рослини відзначаються високим рівнем водоспоживання: транспіраційний коефіцієнт становить 497–1180. На формування одиниці сухої речовини коноплі витрачають у 3,3 раза більше води, ніж просо і сорго, у 2,4 раза більше, ніж овес, у 2,43 раза – ніж жито, і в 1,8 раза більше за пшеницю та ячмінь (оптимальна вологість ґрунту 70–80 %).

Морфометричні та біохімічні характеристики сортів:

- **Сорт Глоба:** тривалість вегетації до технічної стиглості 105 діб, до біологічної – 137 діб. Висота – 286,0 см. Урожайність насіння 0,5 т/га, стебел – 9,88 т/га (волокна 3,18 т/га). Вміст олії 32,6 %, волокна – 31,1 %. Вміст ТГК блоковано на рівні 0,0025 %. Стабільність ознаки однодомності – 0 % рослин плосконі. Стійкість проти фузаріозу – 7,5 бала, конопляної блішки – 8,5 бала, стеблового метелика – 7,5 бала.

- **Сорт Лара:** технічна стиглість 118 діб, біологічна – 142 доби. Висота – 298,4 см. Урожайність насіння 0,56 т/га, стебел – 11,43 т/га (волокна 3,78 т/га). Вміст олії 33,7 %, волокна – 33,1 %. ТГК – 0,0005 %. Стійкість: фузаріоз – 8,3, блішка – 8, метелик – 7,8 бала.
- **Сорт Сула:** технічна стиглість 108 діб, біологічна – 128 діб. Висота – 253,2 см. Урожайність насіння 0,65 т/га, стебел – 9,48 т/га (волокна 3,67 т/га). Вміст олії 31,35 %, волокна – 33,3 %. ТГК – 0,0028 %. Стійкість: фузаріоз – 8,6, блішка – 7,9, метелик – 7,8 бала.
- **Сорт Гляна** (стандарт): вегетація 115–120 діб. Волокно 30–32 %, урожай соломи 7,5–8,0 т/га, насіння 1,0–1,2 т/га. Розривне навантаження волокна 30–38 даН, лінійна щільність 30–35 текс, номер 7,0–7,5.
- **Сорт Золотоніські 15** (стандарт): урожай соломи 88,1–125,0 ц/га, волокна 25,2–32,3 ц/га, насіння 8,5–10,1 ц/га. Волокно 28,6–29,2 %. Вегетація 130–136 діб. Вміст ТГК до 0,05 % (частіше 0 %, за норми 0,08 %).

Масив експериментальних даних формувався на основі трьох польових дослідів. *Дослід 1* (фенологія та продуктивність) закладено на вилуженому чорноземі (pH 6,6; $N_{гідр}$ 102,6 мг/кг, P_2O_5 140,3 мг/кг, K_2O 87,7 мг/кг, гумус 4,16 %, глибина 53–100 см) з нормою висіву 1,2 та 4,0 млн шт./га. *Дослід 2* (наростання біомаси) використовував норму 1,2 млн шт./га (маса 1000 насінин 19,2 г, схожість 94 %). *Дослід 3* (вплив на ґрунтову біоту) проведено за 8 варіантами систем живлення на ділянках із pH 6,0, гумусом 3,1 % (шар 66–92 см), вмістом Nгідр 107,8 мг/кг, P_2O_5 119,6 мг/кг, K_2O 119,4 мг/кг. У дослідах застосовували біологічний деструктор «БіоСтимІкс-Нива» (норма 1,0 л/га), що містить штами целюлозолітичних, лігнолітичних, азотфіксуючих мікроорганізмів з антибактеріальним ефектом.

В екологічній моделі вирощування (на площах від 50 га у 2015 р. до 602 га у 2022 р.) підтримання аерації ризосфери та елімінація бур’янів здійснювалися шляхом системного механічного впливу (оранка на 20–22 см, лущення та культивація на 5–6 см). Для порівняння параметрів

використовували конвенційну модель із застосуванням мінеральних добрив у дозі $N_{30}P_{30}K_{30}$ та N_{20}.

2.3. Алгоритм системної інтерпретації результатів та методи статистичної обробки біологічних показників

Аналіз чисельності ґрунтової мезофауни (дощових черв'яків *Lumbricina*) проводили методом ручного відбирання (метод Гілярова) із монолітів розміром 50×50×30 см. Вилучення ногохвісток (*Collembola*) здійснювали методом гептанової флотації згідно з ДСТУ ISO 23611-2:2007. Додатково застосовували метод Кобба з намочуванням та фільтрацією субстрату через каскад сит із діаметром отворів 1000, 400, 200 та 100 мкм.

Мікробіологічний профіль ризосфери досліджували класичними методами: амоніфіксуючі мікроорганізми вирощували на м'ясо-пептонному агарі (МПА), спороутворювальні бактерії – на МПА після температурної інактивації за 75 °C, стрептоміцети – на крохмаль-аміачному агарі, азотфіксуючі бактерії – на середовищах Ешбі та Виноградського [67]. Біомасу мікроорганізмів визначали регідратаційним методом [68], інтенсивність дихання (дифузію CO_2) – за методом В. Штатнова [69], вміст гумусу та органічного азоту – за методом Тюріна [70].

Кількісні та якісні показники врожаю визначали за методиками чинних державних стандартів [71–73]. Фітохімічний аналіз вмісту канабіноїдів виконували методом екстракції (екстрагенти: етанол та петролейний ефір фракції 40–65 °C).

Статистична верифікація біологічних показників та встановлення закономірностей здійснювалися методами дисперсійного і кореляційного аналізу з використанням спеціалізованих програмних пакетів Microsoft Excel та STATISTICA 10.0 [74; 75].

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ВПЛИВУ ОРГАНІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА НА РІСТ ТА МОРФОГЕНЕЗ КОНОПЕЛЬ ПОСІВНИХ

3.1. Динаміка лінійного росту та формування вегетативної сфери залежно від генотипу (сорту)

Фізіологічні механізми формування вегетативної біомаси (зокрема луб’яних волокон) та генеративних органів конопель традиційно досліджувалися переважно в контексті текстильного використання [76]. Проте сучасні генотипи, включаючи сорти селекції ТОВ «Інститут органічного землеробства», відзначаються подвійним напрямом метаболічної активності: вони здатні одночасно до інтенсивного вегетативного росту та повноцінної реалізації насіннєвої продуктивності.

Аналіз експериментальних даних доводить, що вирощування *Cannabis sativa* L. в умовах органічної моделі (без застосування синтетичних добрив) не призводить до фізіологічної депресії чи істотного зменшення біомаси та насіння [77]. Така адаптивність зумовлена специфікою селекційного процесу: коноплі менше піддавалися жорсткому штучному відбору на залежність від екзогенного живлення, завдяки чому зберегли високий природний («дикий») біологічний потенціал. Ця унікальна стійкість забезпечує ефективне функціонування апікальних та латеральних меристем навіть за умов тимчасового дефіциту поживних елементів у ґрунтовому розчині.

В архітектоніці рослинного організму лінійний ріст стебла (висота) є ключовим морфометричним параметром. Обробка масиву біометричних даних методом багатофакторного дисперсійного аналізу виявила, що динаміка лінійного росту жорстко детермінується генетичними (сорт) та абіотичними (умови років) чинниками (рис. 3.1).

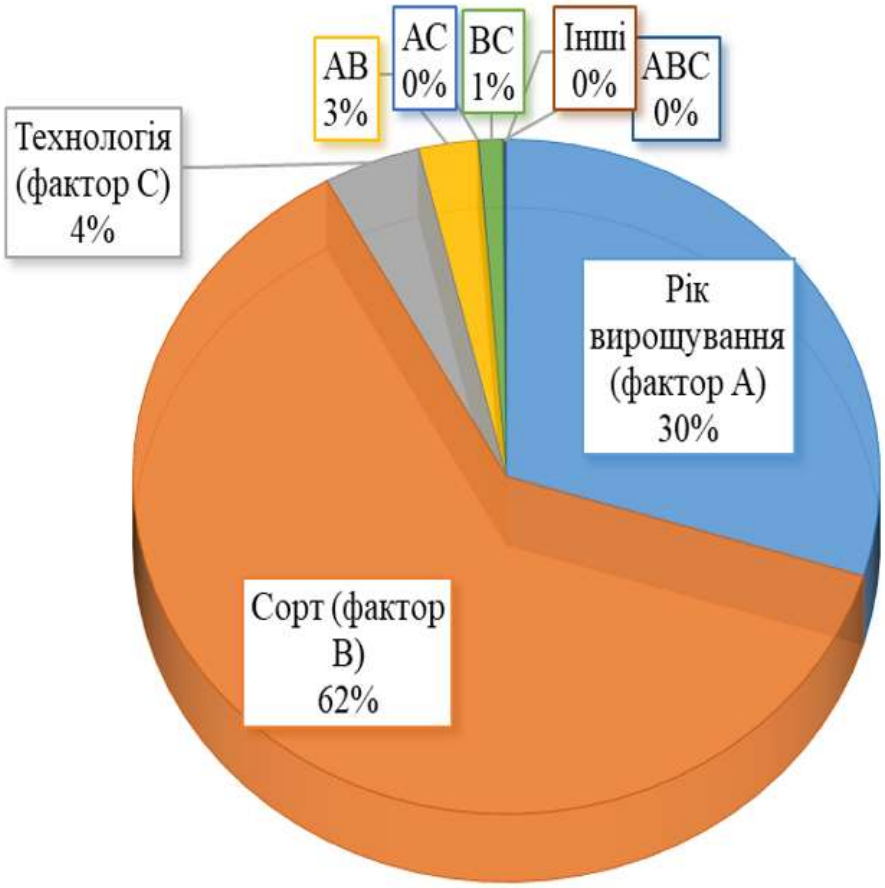


Рис. 3.1. Частка впливу екологічних та генетичних факторів на інтенсивність лінійного росту рослин в період біологічної стиглості

Як свідчать результати дисперсійного аналізу, найбільший вплив на морфогенез стебла мала генетична природа рослини (фактор В – 55,4 %) та кліматичні умови вегетаційного періоду (фактор А – 36,5 %). Сумарно потенційна врожайність та висота рослин більше ніж на 90 % обумовлюються нормою реакції конкретного сорту на погодні умови. Натомість зміна трофічного режиму (технологія вирощування, фактор С) визначала висоту рослин лише на рівні 3,5 % (близько 4 %). Таку ж незначну частку (3,1 % та 1,5 %) становили взаємодії цих екологічних факторів. Незважаючи на математично невеликі значення впливу трофічної моделі, вони є статистично достовірними. Це доводить, що в органічному агроценозі ключовим фізіологічним завданням є підбір комплементарного генотипу, здатного підтримувати стабільний мітоз клітин стебла без синтетичних стимуляторів

росту. Аналогічна закономірність розподілу впливу чинників (понад 90 % генетичної детермінації) спостерігалася і під час оцінки габітусу рослин на етапі збирання на зеленець.

Сортові властивості також виступають визначальним модулятором фенологічних ритмів – тривалості періоду від появи сходів до настання біологічної стиглості. Аналіз фенологічних фаз (табл. 3.1) демонструє, що впровадження органічної системи по-різному вплинуло на тривалість онтогенезу.

Таблиця 3.1

Фенологічні ритми та морфометричні параметри лінійного росту рослин *Cannabis sativa* L. за різних трофічних режимів

Сорт (фактор *B*)	Варіант* технології вирощування (фактор *C*)	Тривалість до біологічної стиглості, діб	Висота рослин в період біологічної стиглості, см	Висота рослин в період збирання на зеленець, см
Гляна	1	123	232,2	223,4
	2	123	232,5	223,3
	3	124	246,6	224,8
	4	125	246,5	227,1
Золотоніські 15	1	129	258,6	229,1
	2	131	262,0	229,0
	3	132	260,9	229,7
	4	132	261,4	229,7
Лара	1	135	277,0	275,3
	2	134	276,7	278,0
	3	135	279,1	281,8
	4	136	285,2	278,5
Глоба	1	132	278,8	272,6
	2	134	281,2	269,9
	3	134	285,5	270,1
	4	136	285,0	272,1
Сула	1	122	264,3	257,6
	2	123	263,8	255,0

	3	124	265,9	257,0
	4	124	269,7	257,2
	$НІР_{05}$ *A*	0,6	1,3	0,88
	$НІР_{05}$ *B*	0,8	1,7	1,33
	$НІР_{05}$ *C*	0,7	1,5	1,01
	$НІР_{05}$ *AB*	–	2,9	1,96
	$НІР_{05}$ *BC*	–	3,3	2,27

**1 – конвенційна (контроль); 2 – перехідна; 3 – органічна; 4 – органічна + деструктор БіоСтимікс-Нива (1 л/га).*

Перебудова метаболізму за органічного живлення дещо пролонгувала розвиток рослин: у сортів Гляна й Сула період до біологічної стиглості подовжився на дві доби, а у генотипів Золотоніські 15 і Глоба ця різниця склала три і чотири доби відповідно. Такий зсув фенологічних фаз пояснюється генетичними особливостями останніх: ці сорти загалом потребують на 8–10 днів довшого періоду вегетації. Водночас сорт Лара продемонстрував найвищу фенологічну стабільність, не змінивши тривалості дозрівання незалежно від технології живлення.

Біометричні вимірювання зафіксували фізіологічний парадокс: вилучення мінеральних добрив (органічна технологія) стимулювало лінійний ріст (етіоляцію) стебла у багатьох генотипів. Найбільш виражену реакцію продемонстрував сорт Сула, висота якого зросла на 15 см (порівняно з контролем), та сорт Гляна, у якого цей показник зріс майже на 14 см. Реакція (розтягнення міжвузль) у більшості інших сортів знаходилася в межах 6–8 см. Найнижчу морфологічну пластичність до зміни трофічного фону продемонстрував сорт Золотоніські 15 – різниця у висоті не перевищувала 3 см. Подібна тенденція зберігалася і в період технічної стиглості (збирання на зеленець), де відхилення для сортів Золотоніські 15, Глоба і Сула знаходилися в межах статистичної помилки досліду, що ще раз підтверджує домінантну роль генотипу.

Серед комплексних біометричних параметрів фундаментальну роль у

життєзабезпеченні рослини відіграє інтенсивність наростання кореневої маси. Саме коренева система виступає первинним рецептором едафічних змін.

Результати дисперсійного аналізу чітко засвідчили, що, на відміну від стебла, морфогенез кореневої системи залежав виключно від ґрунтово-трофічної технології, тоді як кліматичні флуктуації років на нього не впливали. Як відображено на гістограмі (рис. 3.2), в умовах конвенційної моделі (із застосуванням мінеральних добрив) маса коріння становила 1,18 т/га, тоді як за органічної технології цей показник різко зріс до 1,68 т/га.

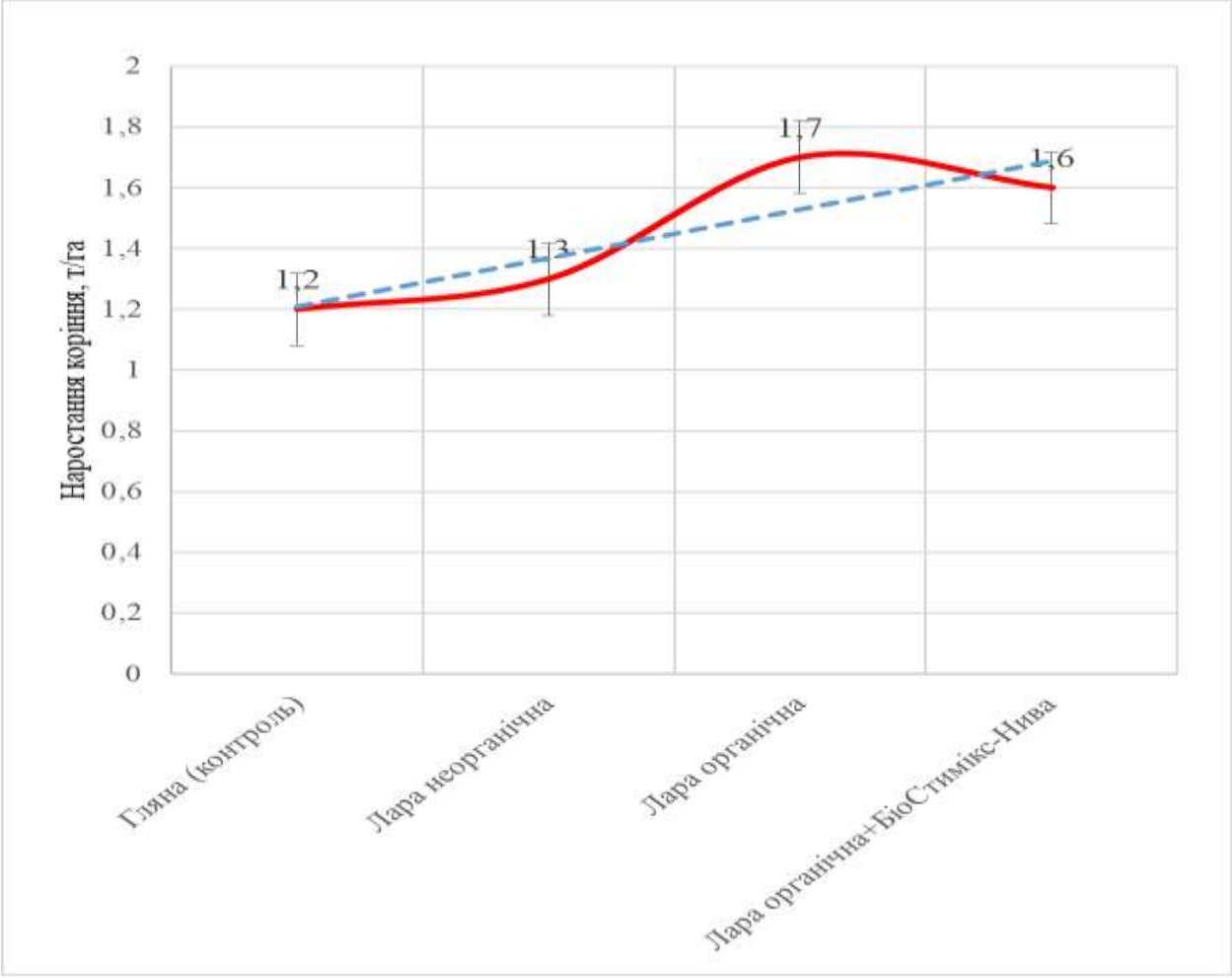


Рис. 3.2. Динаміка наростання маси кореневої системи залежно від екологічної моделі вирощування

Таке компенсаторне розростання кореневої маси є класичною фізіологічною адаптацією рослини до відсутності легкодоступних

мінеральних солей: організм змушений збільшувати площу абсорбції для пошуку елементів живлення. Застосування мікробіологічного деструктора (органічна + деструктор) формувало масу на рівні 1,52 т/га, а перехідна технологія – 1,31 т/га (зниження порівняно з чистою органічною технологією знаходилося на межі статистичної похибки досліду, $НІР_{05}$ = 0,14 т/га).

Розвиток кореневої системи тісно пов’язаний із біохімічним станом ґрунту. Кореляційний аналіз (рис. 3.3) доводить, що маса коріння знаходиться у прямій залежності від вмісту в ризосфері активної біомаси ґрунтової мікрофлори, лабільних гумусових речовин та органічного вуглецю (коефіцієнти кореляції становлять r = 0,43–0,57).

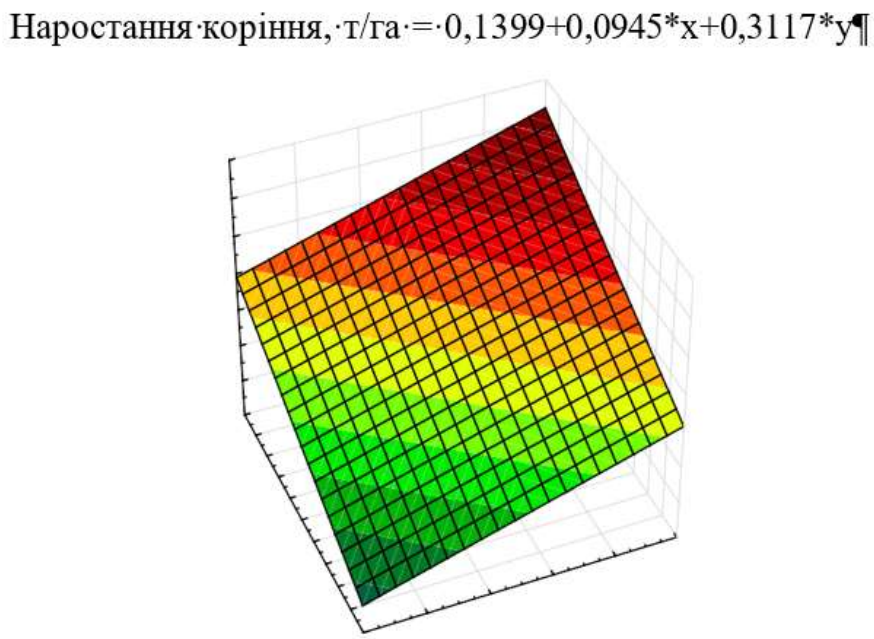


Рис. 3.3. Регресійні моделі залежності морфогенезу кореневої системи від мікробіологічної активності та біохімії ґрунту

У свою чергу, потужний розвиток коріння забезпечує активний синтез цитокінінів та транспорт води, що позитивно впливає на фінальну врожайність трести та насіння (r=0,49–0,55). Значення коефіцієнтів регресії підтверджують, що накопичення маси живих мікроорганізмів у ґрунті справляє значно

помітніший вплив на формування архітектоніки кореневої системи конопель, порівняно з суто хімічним вмістом лабільних гумусових речовин.

Отже, органічна модель ініціює складний каскад адаптацій: відмова від агрохімікатів сприяє швидкому відновленню мікробіологічної активності ґрунту, яка стимулює розростання кореневої системи, що, у підсумку, забезпечує високі темпи лінійного росту стебла без зниження продуктивності.

3.2. Адаптивні зміни біометричних параметрів стебла в умовах органічного живлення

Накопичення вегетативної маси стебла (яка в технологічному процесі оцінюється як врожайність трести та волокна) є прямим індикатором інтенсивності фотосинтетичних процесів та ефективності засвоєння асимілятів. Аналіз масиву експериментальних даних виявив значну варіабельність цього показника, яка детермінується генетичними особливостями сорту та умовами вегетаційного періоду.

Найвищу фізіологічну здатність до наростання біомаси луб’яних волокон продемонстрував генотип Лара: середній показник за роки спостережень становив 3,6 т/га (рис. 3.4). Найнижча інтенсивність формування волокна була зафіксована у сорту Гляна (1,74 т/га). Абіотичні фактори довкілля справляли потужний модифікуючий вплив: найсприятливішим для синтезу структурних вуглеводів виявився 2021 рік (середня маса волокна 3,05 т/га). Натомість жорсткий водний і температурний стрес 2020 року призвів до гальмування ростових процесів, унаслідок чого середня продуктивність волокна знизилася до 2,24 т/га.

У сприятливому 2019 році максимальна біосинтетична активність спостерігалася у сорту Лара (3,88 т/га), що у 2,6 раза перевищувало показники сорту Гляна. Депресивні погодні умови 2020 року спровокували стресову реакцію у всіх генотипів, проте норми реакції різнилися: сорти Гляна і Сула виявилися найбільш чутливими, знизивши масу волокна (порівняно з толерантнішим сортом Лара) на 1,42 і 1,04 т/га відповідно. Така мінливість

доводить екологічну доцільність полісортових посівів (зокрема сортів Глоба, Лара та Сула) для нівелювання абіотичних стресів.

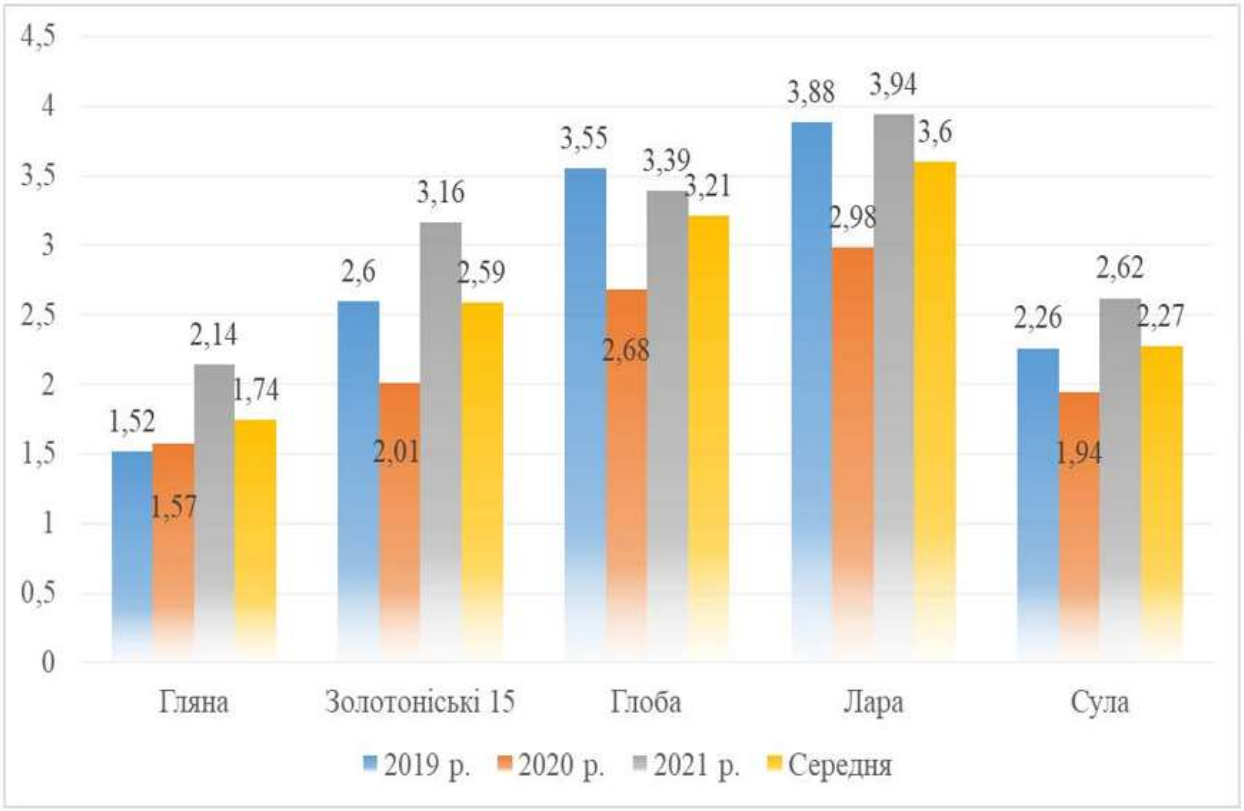


Рис. 3.4. Динаміка накопичення маси волокна залежно від генотипу та абіотичних умов

Перехід рослинного організму на органічний тип живлення (за рахунок ґрунтової мікробіоти, без легкозасвоюваних мінеральних солей) викликав специфічну фізіологічну реакцію (табл. 3.2). Загалом органічне середовище сприяло стимуляції камбіальної активності та збільшенню маси стебла (трести). У сортів Гляна і Глоба спостерігалося статистично неістотне, але позитивне зростання маси на 0,07–0,11 т/га порівняно з конвенційним контролем.

Таблиця 3.2

Накопичення маси стебла (трести) та волокна залежно від еколого-трофічної моделі вирощування

Сорт (фактор *B*)	Варіант вирощування (фактор *C*)	Урожайність трести, т/га	Урожайність волокна, т/га
Гляна	конвенційна (контроль)	4,09	1,74
	перехідна	4,16	1,74
	органічна	4,16	1,80
	органічна + БіоСтимікс-Нива (1 л/га)	4,20	1,81
Золотоніські 15	конвенційна (контроль)	4,73	2,62
	перехідна	4,47	2,62
	органічна	4,72	2,65
	органічна + БіоСтимікс-Нива (1 л/га)	4,87	2,67
Лара	конвенційна (контроль)	5,05	3,58
	перехідна	4,97	3,60
	органічна	5,00	3,64
	органічна + БіоСтимікс-Нива (1 л/га)	4,96	3,66
Глоба	конвенційна (контроль)	5,11	3,19
	перехідна	5,00	3,21
	органічна	5,13	3,24
	органічна + БіоСтимікс-Нива (1 л/га)	5,21	3,25
Сула	конвенційна (контроль)	5,19	2,73
	перехідна	5,28	2,72
	органічна	5,18	2,75
	органічна + БіоСтимікс-Нива (1 л/га)	5,33	2,77
	$НІР_{05}$ *A*	-	0,01
	$НІР_{05}$ *B*	0,06	0,01
	$НІР_{05}$ *C*	0,05	0,01
	$НІР_{05}$ *AB*	0,11	0,02
	$НІР_{05}$ *BC*	0,12	-

Генотипи Золотоніські 15 і Сула збільшили масу трести на 0,14 т/га. Водночас сорт Лара продемонстрував незначне зниження показників (у межах НІР), що свідчить про його вищу потребу у легкодоступних мінеральних елементах. Отже, відмова від мінеральних добрив не викликає неминучої фізіологічної депресії лінійного росту.

Оцінюючи середні значення, виявлено, що на конвенційному контролі маса трести становила 4,83 т/га, за перехідної моделі спостерігалося її невелике зниження до 4,78 т/га. Натомість стабільне органічне середовище забезпечило 4,84 т/га, а застосування мікробіологічного деструктора додатково стимулювало наростання маси до 4,91 т/га (зростання на 1,7 % у межах статистичної похибки). Біометричний аналіз виявив наявність середнього прямого кореляційного зв’язку (r = 0,56) між загальною масою стебла (трестою) та масою луб’яних волокон, що свідчить про пропорційний розподіл асимілятів між різними тканинами стебла під впливом умов середовища.

Дисперсійний аналіз (рис. 3.5) виявив фундаментальну фізіологічну закономірність: якщо загальна маса стебла (трести) має неістотну залежність від погодних умов року, майже повністю (на 96 %) контролюючись генетичною програмою сорту, то маса та якість луб’яного волокна (вторинної тканини) значно сильніше залежить від абіотичних факторів (частка впливу умов року становить 47 %, а сорту – 48 %). Вплив суто трофічної технології на масу стебла не перевищує 4 %.

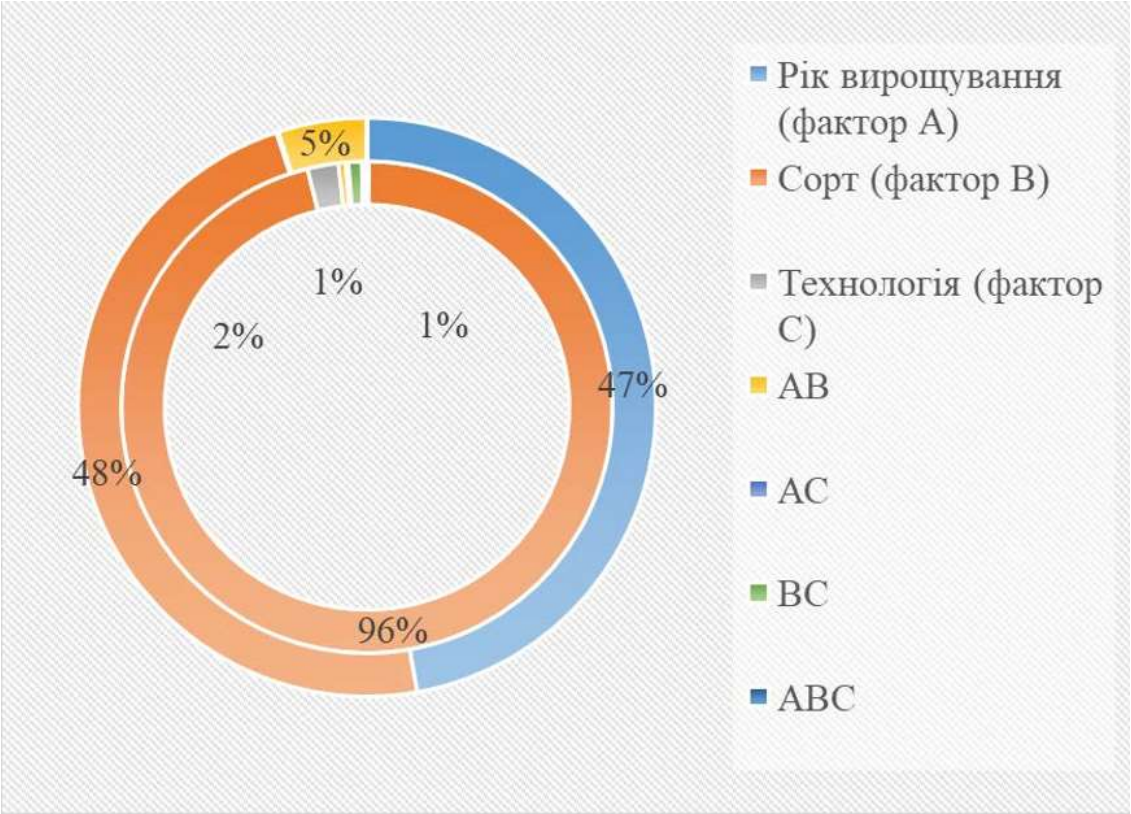


Рис. 3.5. Частка впливу екологічних та генетичних факторів на формування маси стебла і волокна

Аналіз динаміки трирічних даних (залежність від технології) підтверджує генотипічну специфічність реакцій. Як видно з рисунка 3.6, сорт Гляна стабільно поступався сорту Лара (на 1,1 т/га), який демонстрував стійкий метаболізм із середньою масою 4,08 т/га. Застосування виключно органічної технології супроводжувалося незначним, статистично несуттєвим зниженням маси стебла (на 0,04 т/га у 2019 р., 0,10 т/га у 2020 р. та 0,05 т/га у 2021 р.), що вимагає ретельнішого фізіологічного моніторингу посівів. Застосування деструктора також не дало різких стрибків росту, що вказує на складність і багатовекторність взаємодій у ґрунтовому розчині.

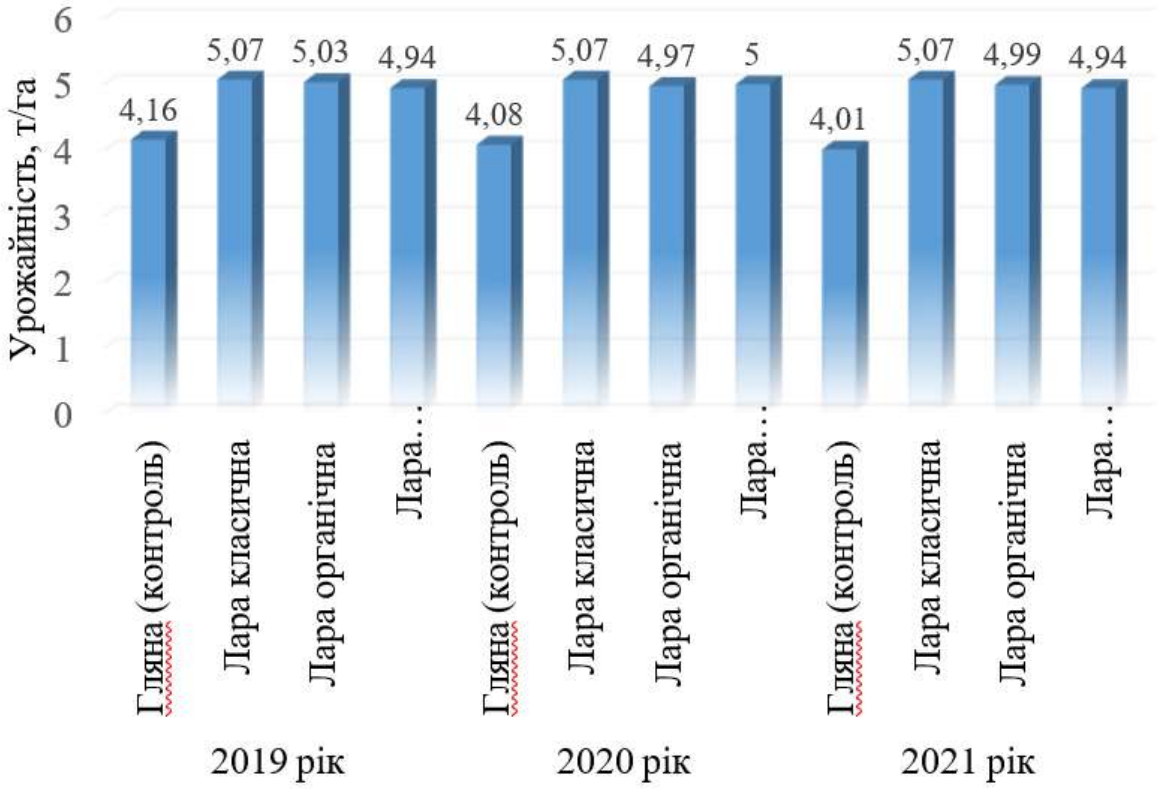


Рис. 3.6. Накопичення вегетативної маси залежно від генотипу та технології живлення

Ключовим аспектом фізіології рослин в органічному агроценозі є симбіотичний зв’язок надземної маси з ґрунтовою мікробіотою. Як демонструє рисунок 3.7, формування маси стебла (трести) жорстко корелює з екологічними параметрами ризосфери. Найпотужніший прямий зв’язок (r=0,90) зафіксовано між масою стебла та загальною біологічною масою ґрунтових мікроорганізмів. Оскільки органічне середовище інтенсифікує розвиток мікробіоти, саме рівень її активності виступає надійним біологічним маркером потенційної продуктивності рослини. До сильних кореляцій також належить зв’язок із вмістом лабільних гумусових речовин (r = 0,72–0,90), тоді як вплив органічного вуглецю (r = 0,53) та власної маси коріння (r = 0,50) характеризується як середній.

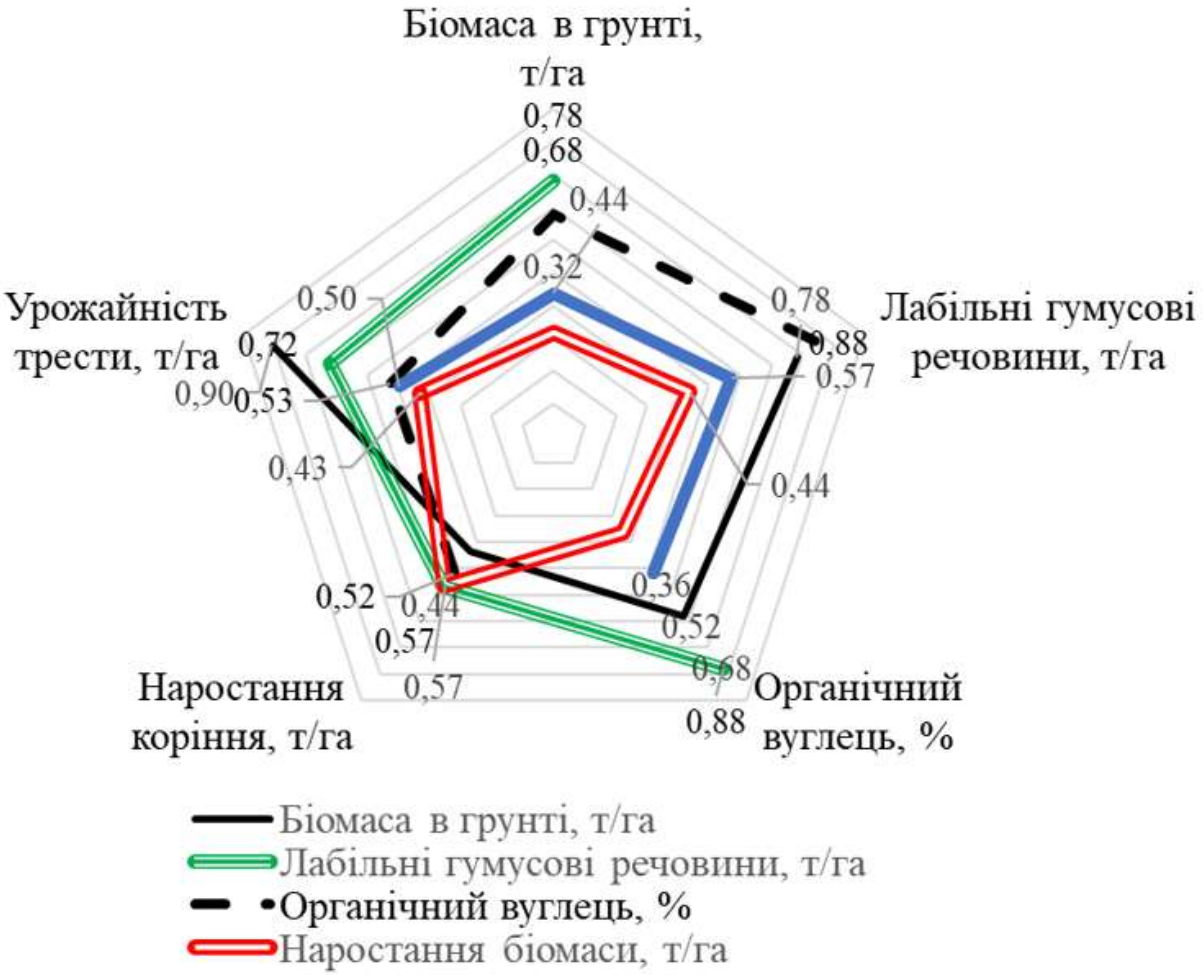


Рис. 3.7. Система кореляційних зв'язків між масою стебла, розвитком кореневої системи та мікробіологічною активністю ґрунту

Згідно з множинною регресійною моделлю (рис. 3.8), наявність органічного вуглецю відіграє лімітуючу роль у метаболізмі, проте коефіцієнт його регресії на порядок нижчий за коефіцієнт живої мікробіологічної маси. Це переконливо доводить, що саме жива складова ґрунту (мікроорганізми), а не просто наявність хімічних елементів, визначає інтенсивність наростання біомаси *Cannabis sativa* L. в умовах органічного землеробства.

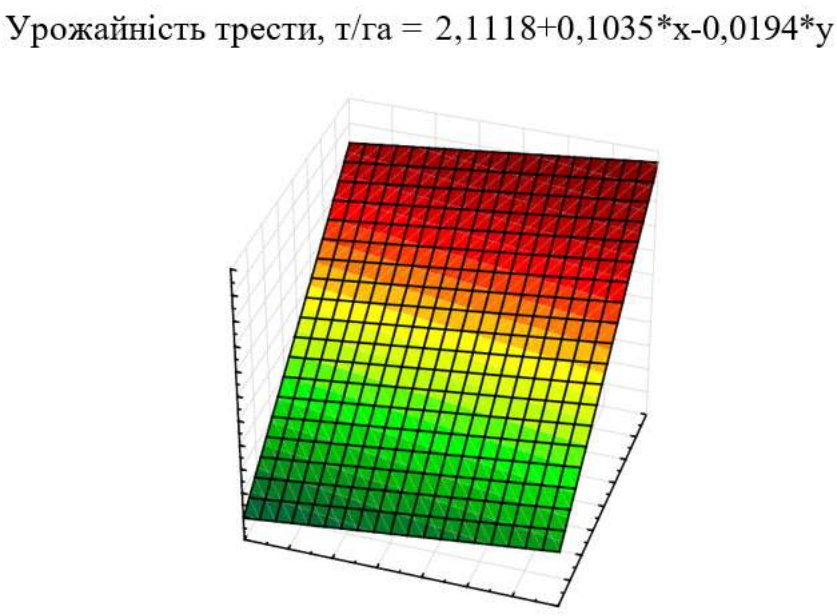


Рис. 3.8. Множинна регресійна модель залежності вегетативної маси від параметрів ґрунтового мікробіоценозу

3.3. Аналіз реалізації репродуктивного потенціалу та біосинтезу вторинних метаболітів (насіння та канабіноїди)

Формування насіння є завершальним і критично важливим етапом онтогенезу *Cannabis sativa* L., який детермінує біологічну успішність виду. Незважаючи на древню історію використання насіння, системні фізіологічні механізми реалізації репродуктивного потенціалу культури тривалий час залишалися поза фокусом фундаментальних досліджень. Сучасні наукові дані вказують на те, що головною перешкодою для розуміння цих процесів була складна плейотропна взаємодія між накопиченням вегетативної біомаси, інтенсивністю синтезу вторинних метаболітів (канабіноїдів) та загальною фертильністю рослин [78]. Зокрема, у попередніх дослідженнях фіксувалася чітка зворотна кореляція: штучне пригнічення синтезу тетрагідроканабінолу (ТГК) призводило до редукції генеративних органів (зменшення маси квітки) та зниження загальної фертильністю [79].

Проте глибокий аналіз експериментальних популяцій (було проаналізовано близько 3700 рослин, із яких шляхом фітохімічного скринінгу

видалено близько 930 екземплярів із відсутньою реакцією на канабіноїди) спростував обов'язковість цієї залежності для новітніх генотипів. Завдяки застосуванню методу тонкошарової хроматографії на етапі бутонізації вдалося ізолювати специфічні біотипи рослин. Результати фітохімічного скринінгу, що підтверджують повну або часткову відсутність синтезу певних метаболітів у відібраних рослин сорту Глоба, наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3.

Характеристика біосинтетичного профілю окремих рослин *Cannabis sativa* L. сорту Глоба за вмістом КБГ, КБД і ТГК)

№ сім'ї	Довжина стебла, м		Маса, г			Кількісний вміст, %		
	технічна	загальна	стебла	насіння з рослини	1000 насінин	КБГ	КБД	ТГК
1	0,9	2	54,22	5,79	21,9	0,07	1,19	0,03
1	0,8	2,1	87,4	16,69	20	0,11	2,22	0,08
1	0,4	2	75,4	14,55	18,2	0,07	2,66	0,12
Середнє	0,7	20,3	72,34	12,34	20	0,08	2,02	0,08
25	1,25	3,15	187,7	15,67	17,9	0,05	0,78	0,06
25	2,6	3,1	167,6	18,19	22,7	0	0,75	0,06
25	0,6	2,9	225,1	26,78	22,9	0,06	0,87	0,07
Середнє	1,48	3,05	193,5	20,2	21,2	0,04	0,8	0,06
36	1	2,75	92,26	13,32	18	1,81	0	0
36	0,9	3	131,6	9,2	17,9	1,72	0	0
36	1,1	3,05	123,1	19,85	17,1	1,69	0	0
36	1,45	3,15	133,4	9,45	21,6	1,42	0	0
36	1,4	2,3	52,69	14,07	16,9	1,36	0	0
36	1,6	2,55	58,77	4,26	15,8	1,54	0	0
36	1,45	2,7	79,19	15,29	16,3	1,52	0	0
36	1,5	2,65	72,49	14,8	15,8	1,05	0	0
Середнє	1,3	2,77	92,9	12,53	17,4	1,51	0	0
37	1,1	2,65	82,81	13,92	21,4	1,54	0	0

37	1,4	2,8	80,12	20,35	19,4	1,4	0	0
37	1,45	2,55	57,59	11,42	16,9	1,35	0	0
37	1,2	2,4	63,6	22,72	18,2	1	0	0
37	1,1	2,5	65,91	22,38	17,2	1,07	0	0
37	1	2,55	74,2	20,58	16,9	1,14	0	0
37	1	2,7	107,3	17,96	17,8	1,07	0	0
37	1,1	3	117,7	17,09	19,7	1,27	0	0
Середнє	1,17	2,64	81,1	18,3	18,4	1,23	0	0

Статистичний аналіз виявив, що маса сформованого насіння з однієї рослини не мала достовірних кореляційних зв’язків з інтенсивністю синтезу канабіноїдів. Коефіцієнти кореляції між масою насіння і вмістом канабігеролу (КБГ) та канабідіолу (КБД) характеризували вкрай слабкий, фізіологічно неістотний зворотний зв’язок (r = –0,04 і –0,21 відповідно).

Натомість вторинний метаболізм тісно переплітався з іншими параметрами: вміст КБД мав зворотну кореляцію з лінійним ростом (технічною довжиною стебла, r = –0,43) і надзвичайно сильний прямий зв’язок із синтезом ТГК (r = 0,94). Сам ТГК проявляв середню пряму кореляцію з масою 1000 насінин (показником виповненості ендосперму). Паралельно, вміст КБГ знаходився у зворотній залежності від маси стебла (r = –0,40) та мав сильний фізіологічний антагонізм із синтезом КБД (r = –0,80) і ТГК (r = –0,88). Відсутність жорстких зворотних залежностей між канабіноїдами та насіннєвою продуктивністю підтверджує значну генетичну пластичність культури та відкриває перспективи конструювання спеціалізованих хемотипів [80].

Реалізація репродуктивного потенціалу на рівні агроценозу також жорстко детермінувалася генотипом. Динаміку формування маси насіння різними сортами відображено на рисунку 3.9.

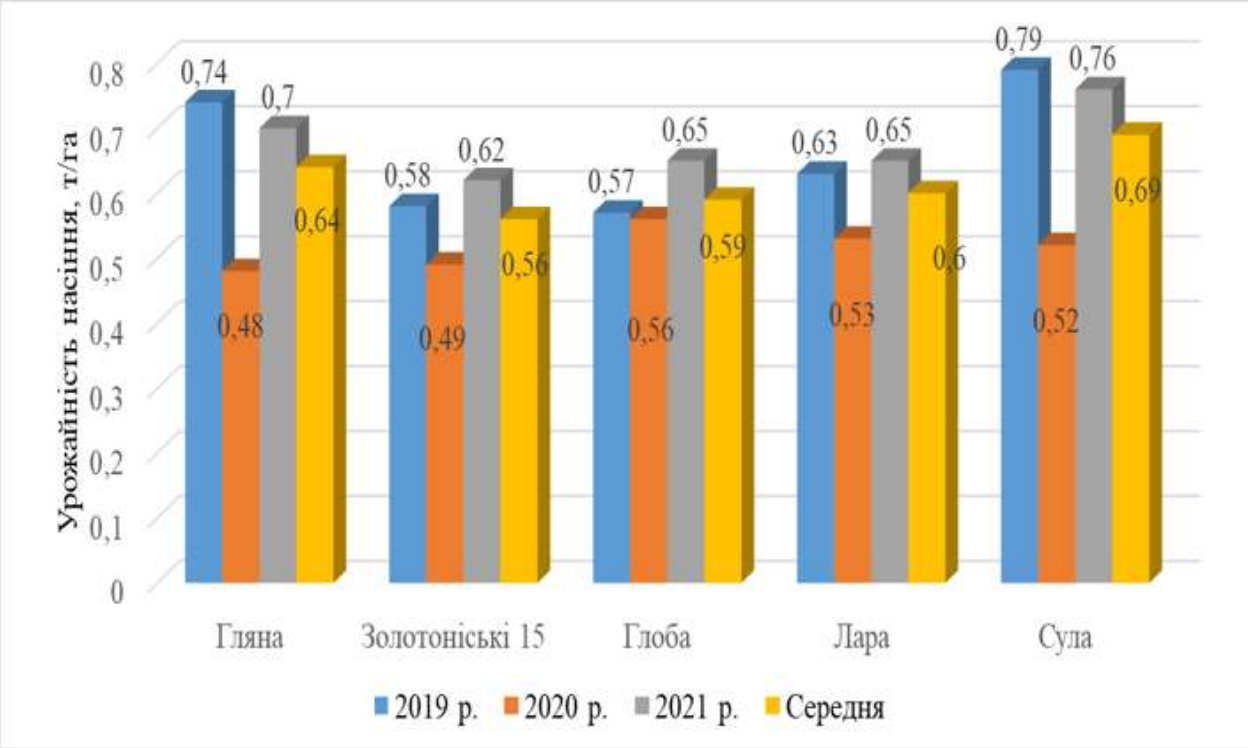


Рис. 3.9. Репродуктивна продуктивність різних генотипів конопель

Найвищий рівень генеративної продуктивності стабільно демонстрував сорт Сула. Абіотичні умови 2019 та 2021 років сприяли максимальній реалізації потенціалу, тоді як температурно-водний стрес 2020 року дещо знизив інтенсивність формування насіння. Сорт Гляна формував масу насіння на 0,4–0,6 т/га меншу, ніж Сула, але випереджав за цим показником генотипи Золотоніські 15, Лара та Глоба. Загалом у дослідах спостерігався вузький інтервал варіювання багаторічної середньої продуктивності – 0,56–0,58 т/га, що свідчить про високу гомеостатичність репродуктивної системи.

Розподіл часток впливу екологічних та генетичних факторів на інтенсивність формування насіння наведено на рисунку 3.10.

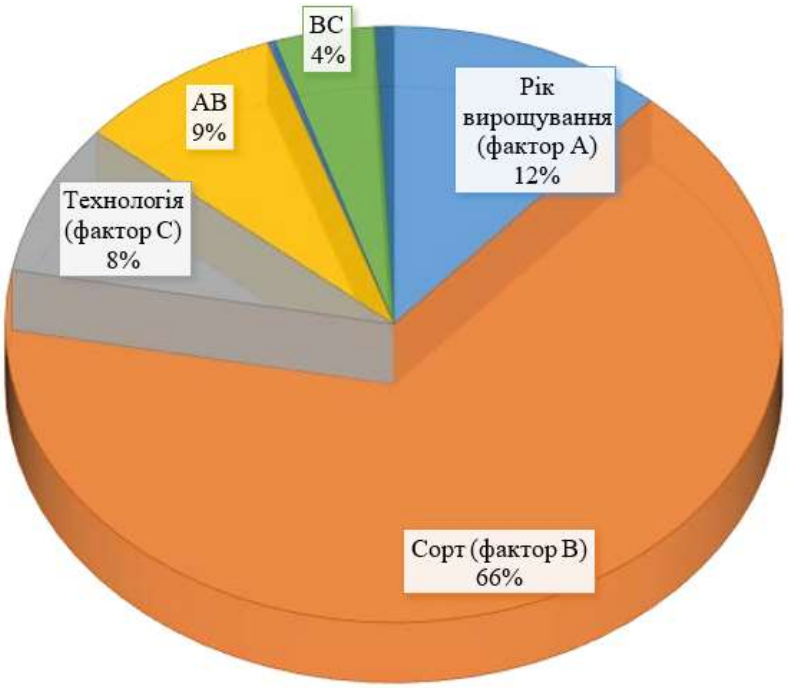


Рис. 3.10. Частка впливу факторів на реалізацію репродуктивного потенціалу рослин

Дисперсійний аналіз доводить, що вирішальну фізіологічну роль у формуванні насіння відіграють сортові властивості. Вплив еколого-трофічної моделі (технології вирощування) становив 8 %. Це достатньо вагомий показник, який вказує на високу чутливість репродуктивної сфери до органічного середовища та підтверджує перспективність біологізованих методів.

Детальну динаміку репродуктивного розвитку залежно від умов живлення та генотипу представлено у таблиці 3.4.

У 2019 році максимальну біологічну врожайність зафіксовано за перехідної моделі вирощування сорту Сула. За чистої органічної технології показники були дещо нижчими, але в межах статистичної похибки. Сорти Золотоніські 15 та Лара характеризувалися найнижчими показниками (не перевищували 0,54 і 0,56 т/га). Загальна варіація маси насіння у 2019 році становила 0,53–0,64 т/га, а в наступні роки – 0,52–0,62 т/га.

Таблиця 3.4.

Динаміка маси насіння залежно від сортових особливостей та еколого-трофічного режиму

Сорти (фактор *B*)	Технологія (фактор С)	Урожайність, т/га			
		2019	2020	2021	Середня
Гляна	Конвенційна (контроль)	0,62	0,55	0,54	0,57
	Перехідна	0,62	0,52	0,53	0,56
	Органічна	0,60	0,55	0,52	0,56
	Органічна + деструктор	0,62	0,60	0,56	0,59
Золотоніські 15	Конвенційна (контроль)	0,54	0,53	0,54	0,54
	Перехідна	0,54	0,55	0,53	0,54
	Органічна	0,54	0,54	0,53	0,54
	Органічна + деструктор	0,53	0,54	0,54	0,54
Лара	Конвенційна (контроль)	0,55	0,56	0,55	0,55
	Перехідна	0,56	0,55	0,55	0,55
	Органічна	0,54	0,54	0,54	0,54
	Органічна + деструктор	0,56	0,56	0,56	0,56
Глоба	Конвенційна (контроль)	0,55	0,55	0,56	0,55
	Перехідна	0,56	0,55	0,56	0,56
	Органічна	0,60	0,55	0,60	0,58
	Органічна + деструктор	0,63	0,60	0,60	0,61
Сула	Конвенційна (контроль)	0,60	0,60	0,60	0,60
	Перехідна	0,64	0,62	0,62	0,63
	Органічна	0,62	0,62	0,61	0,62
	Органічна + деструктор	0,61	0,61	0,61	0,61
$НІР_{05}$ (фактор *A*)					0,01
$НІР_{05}$ (фактор *B*)					0,01
$НІР_{05}$ (фактор *C*)					0,01
$НІР_{05}$ (*AB*)					0,02
$НІР_{05}$ (*BC*)					0,02

Загалом різниця між конвенційною (мінеральною) та органічною моделями живлення становила лише 0,01–0,02 т/га. Відсутність фізіологічної депресії в органічному середовищі пояснюється тим, що інтенсивний механічний обробіток ґрунту (боротьба з бур’янами) суттєво оптимізував газообмін (аерацію) кореневої системи. Найвищу адаптивність до органічного фону продемонстрував сорт Глоба (збільшення продуктивності на майже 10 %). Внесення мікробіологічного деструктора додатково стимулювало генеративний розвиток: у сорту Гляна маса насіння зросла на 3,5 %, а у сорту Глоба – на 9,8 %.

Глобальний кореляційний аналіз підтвердив високу генотипічну специфічність рослин. Єдиною системною зворотною кореляцією середньої сили виявилася залежність між масою насіння та тривалістю періоду до настання біологічної стиглості: чим довше рослина перебуває у вегетативній фазі, тим менше асимілятів вона спрямовує у репродуктивні органи. Цю закономірність відображено на графіку (рис. 3.11).

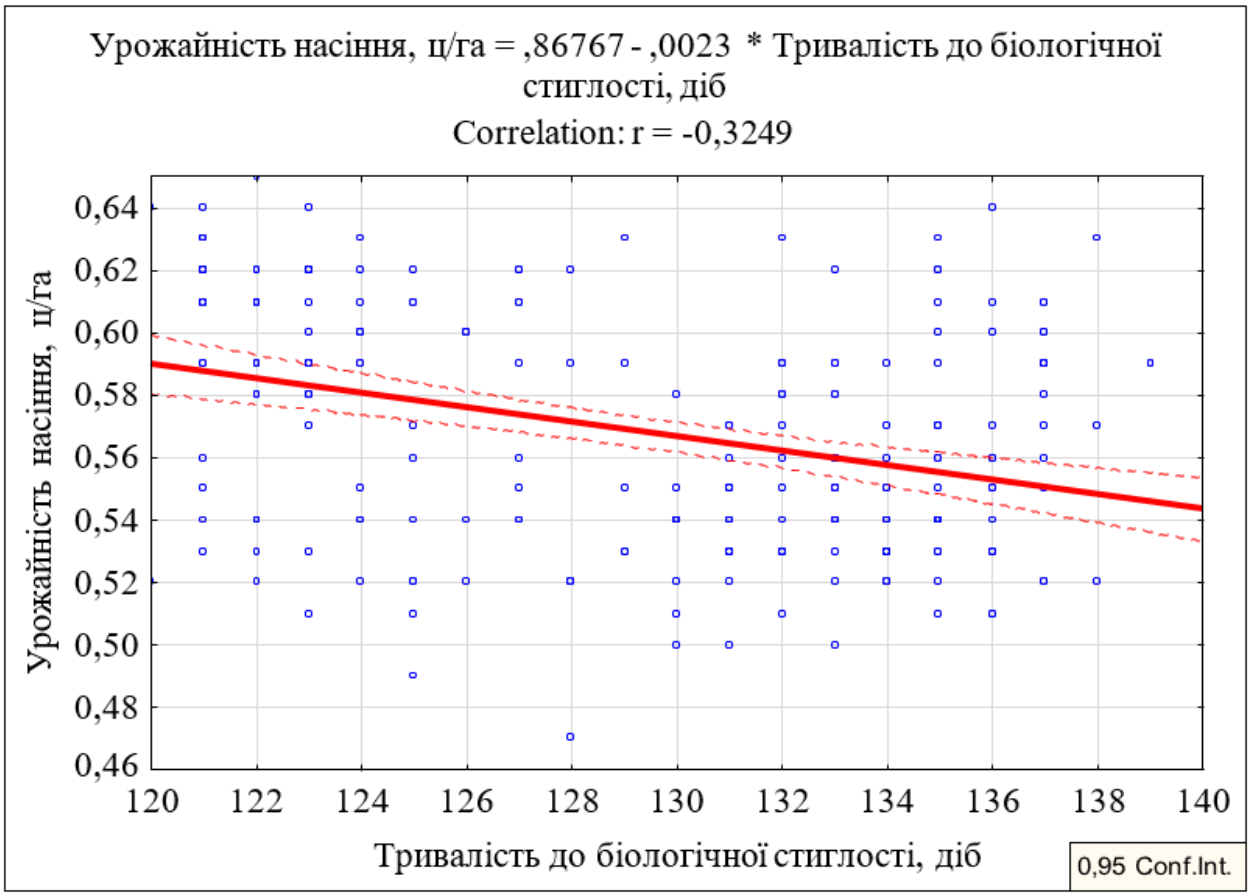


Рис. 3.11. Зворотна регресійна залежність між тривалістю онтогенезу та репродуктивним потенціалом

Системний аналіз експериментальних даних доводить, що *Cannabis sativa* L. володіє високим рівнем фізіологічної пластичності та адаптивності до умов органічного середовища. Формування вегетативної сфери, зокрема динаміка лінійного росту стебла та накопичення маси луб’яних волокон, не зазнає фізіологічної депресії за відсутності екзогенних мінеральних добрив. Ці біометричні параметри контролюються переважно генетичною програмою сорту (понад 90 % впливу) та погодними умовами, тоді як зміна трофічної моделі має лише модифікуючий, статистично незначний вплив. На відміну від надземної частини, архітектоніка кореневої системи проявляє високу чутливість до едафічних чинників: в органічному агроценозі спостерігається компенсаторне розростання кореневої маси задля збільшення площі абсорбції, що має потужний прямий кореляційний зв’язок (r = 0,90) із показниками живої

мікробіологічної маси ризосфери. Стосовно репродуктивного потенціалу та вторинного метаболізму встановлено, що реалізація генеративної продуктивності має чітку генотипічну специфічність. Окрім того, доведено відсутність суворого фізіологічного антагонізму між інтенсивністю біосинтезу канабіноїдів та масою сформованого насіння, що підтверджує можливість ефективного використання збалансованих генотипів (таких як Глоба, Лара, Сула) для подвійного напряму виробництва. Отже, органічна модель живлення запускає каскад симбіотичних та морфологічних адаптацій, які дозволяють рослині повноцінно реалізувати свій біологічний потенціал без залучення хімічних стимуляторів.

РОЗДІЛ 4. ЕКОЛОГО-БІОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ СТАНУ ЕДАФОТОПУ В ОРГАНІЧНИХ АГРОЦЕНОЗАХ КОНОПЕЛЬ ПОСІВНИХ

4.1. Динаміка чисельності та якісного складу мікробіоценозу ризосфери

Стан органічної матриці ґрунту є фундаментальним фактором, що визначає успішність функціонування будь-якого агробіогеоценозу. Значною мірою ця матриця формується та підтримується завдяки метаболічній активності живих організмів, які населяють ризосферу. Лабільна (рухома) складова ґрунту легко метаболізується мікробіотою і прямо впливає на трофічне забезпечення кореневої системи рослин, безпосередньо залежачи від пулу органічної маси [81]. Інтенсивні технології з використанням агрохімікатів призводять до значної втрати й розбалансованості органічного вуглецю, що має негативні наслідки як для фізіології рослин, так і для екології атмосфери. За умов органічного коноплярства ґрунт виступає не просто механічним субстратом, а складним живим мікробіоценозом, динаміка якого суворо детермінується кореневими ексудатами *Cannabis sativa* L.

Кількісний та якісний склад ґрунтової мікробіоти зазнавав достовірних змін під впливом еколого-трофічної моделі. Критично важливим компонентом цієї спільноти є азотфіксуючі бактерії, які в умовах відсутності екзогенних азотних добрив стають ключовим донором азоту для рослин.

Аналіз мікробіологічного профілю (табл. 4.1) засвідчив, що найменша чисельність азотфіксаторів фіксувалася в контрольному ґрунтовому середовищі (пасовище). Застосування органічної технології під коноплями забезпечило їхнє достовірне зростання на 0,8–1,0 млн/г (зростання на 19,0–23,8 % порівняно з пасовищем). Максимальна активність цієї групи зафіксована за сумісного використання органічної технології та мікробіологічного деструктора.

Таблиця 4.1.

Динаміка чисельності фізіологічних груп мікроорганізмів у ризосфері залежно від типу агроценозу (2019–2021 рр.)

Варіант	Азотфіксуючі, млн/г	Фосформобілізуючі, млн/г	Мікроміцети, тис./г	Стрептоміцети, тис./г	Спороутвор. бактерії, тис./г
Пасовище (контроль)	4,2	5,1	67,6	0,4	105,5
Пар чорний	5,0	5,0	65,4	0,5	104,5
Коноплі (перехідна технологія)	4,6	5,3	67,2	0,6	107,8
Кукурудза (перехідна технологія)	4,6	5,3	66,8	0,6	105,6
Коноплі (органічна технологія)	5,0	5,7	71,2	0,7	108,6
Кукурудза (органічна технологія)	5,0	5,5	68,3	0,6	108,7
Коноплі (органічна технологія + деструктор)	5,1	5,7	71,6	0,7	109,6
Коноплі (органічна технологія + післядія деструктору)	5,2	5,7	76,6	0,7	109,2
$НІР_{05}$ (фактор року *A*)	0,037	0,036	0,366	0,023	-
$НІР_{05}$ (фактор технології *B*)	0,061	0,058	0,596	0,038	0,67
$НІР_{05}$ (*AB*)	0,111	–	–	–	–

Популяція фосформобілізуючих бактерій реагувала як на технологію, так і на абіотичні умови року. Найменший їхній пул (5,0 млн/г) зафіксовано на варіанті чистого пару. Найвища активність фосформобілізаторів (збільшення на 11,8 % порівняно з контролем) спостерігалася в ризосфері конопель за органічної технології з використанням деструктора.

Грибний компонент мікробіоценозу (мікроміцети) жорстко залежить від

гідротермічного режиму ґрунту. Їхня максимальна концентрація (68,3–76,6 тис./г) фіксувалася саме в органічних агроценозах, особливо за післядії деструктора. Збільшення пулу мікроміцетів та стрептоміцетів (останніх побільшало на 75 % порівняно з пасовищем) є важливим індикатором: вони беруть активну участь у гуміфікації, хоча серед них можуть бути присутні й потенційні збудники кореневих інфекцій.

4.2. Аналіз популяційної щільності біоіндикаторів ґрунтової мезофауни

Надійними біологічними індикаторами екологічного здоров'я ґрунту та активності детритних трофічних ланцюгів виступають представники ґрунтової мезо- та мікрофауни: дощові черв'яки (*Lumbricina*), коловертки (*Rotifera*) та вільноживучі нематоди (*Nematoda*).

Моніторинг чисельності (табл. 4.2) показав, що визначальним чинником був саме склад біогеоценозу. Популяція *Lumbricus terrestris* на контрольному пасовищі становила 64–66 особин/м^2. Найбільша щільність детритофагів підтримувалася саме в органічних посівах конопель (64–68,3 особин/м^2). Натомість перехідні технології справляли депресивний вплив: чисельність черв'яків падала на 6–12 шт./м^2 порівняно з органічними ділянками.

Таблиця 4.2.

Вплив еколого-трофічної моделі агроценозу на чисельність біоіндикаторів ґрунту (шт./м^2)

Рік (фактор А)	Варіанти досліду (агроценоз, фактор В)	Дощові черви	Коловертки	Нематоди
2019	1.	64	91	113
	2.	63	91	112
	3.	56	89	120
	4.	58	91	126
	5.	63	93	130
	6.	61	94	130

	7.	67	96	132
	8.	69	95	133
2020	1.	66	90	112
	2.	60	91	114
	3.	60	90	119
	4.	60	91	125
	5.	66	95	131
	6.	61	93	129
	7.	66	95	131
	8.	68	96	132
2021	1.	65	91	112
	2.	61	92	113
	3.	58	91	121
	4.	59	92	122
	5.	63	95	135
	6.	60	95	132
	7.	70	96	133
	8.	68	94	135
$НІР_{05}$ (фактор А)		*4,2*	*3,5*	*4,1*

Щільність коловерток була більш стабільною, але максимальні значення (94,3–95,7 особин/м^2) також фіксувалися під органічними коноплями. Найбільш виражена диференціація спостерігалася у популяціях нематод: органічне середовище підтримувало їхню чисельність на рівні 132–133,3 особин/м^2, що на 12–14 шт./м^2 більше, ніж за перехідної технології. Це переконливо доводить, що кореневі ексудати *C. sativa* в органічному середовищі не проявляють тотальної токсичності щодо ґрунтової фауни, а навпаки, інтегруються у складні трофічні мережі.

4.3. Системний аналіз взаємозв’язків між біотичними компонентами та поживним режимом ґрунту

Системний аналіз виявив, що всі компоненти ґрунтового біоценозу перебувають у складній мережі виключно прямих (синергічних) кореляційних зв’язків. Архітектуру цих зв’язків відображено на рисунку 4.1.

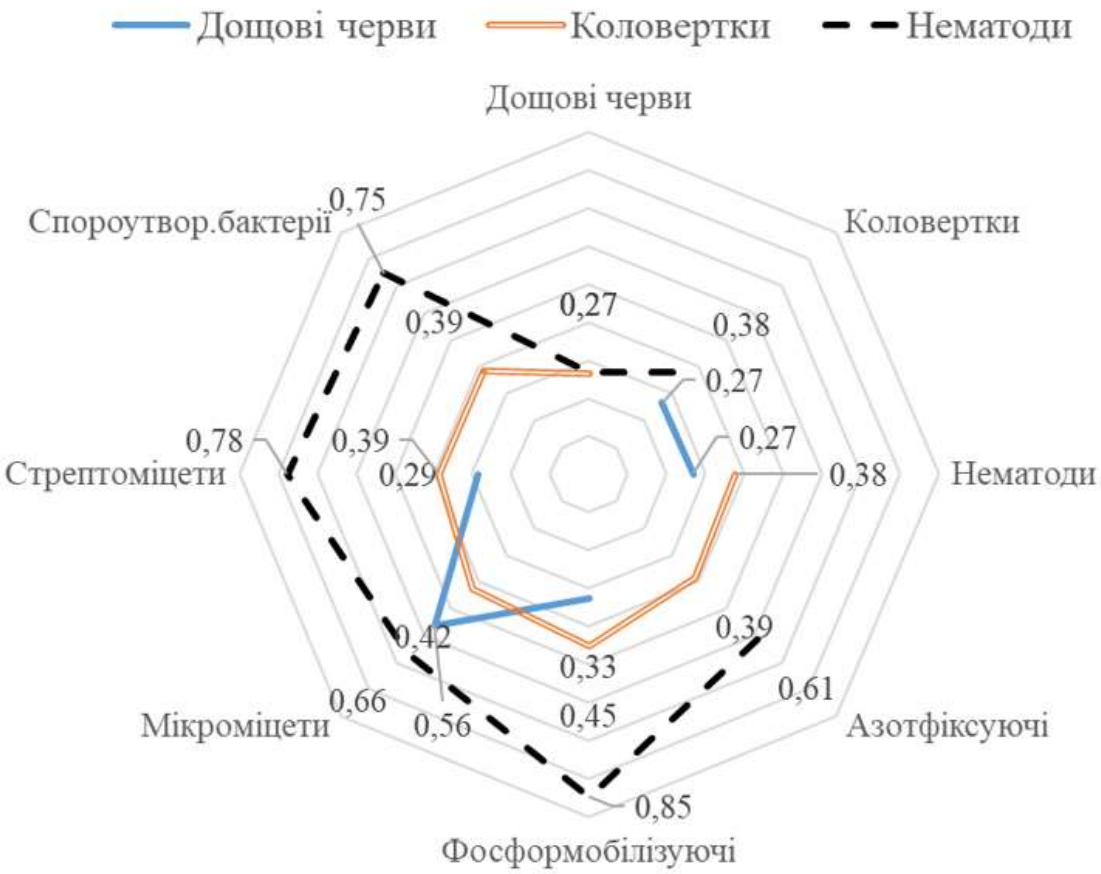


Рис. 4.1. Кореляційні плеяди взаємозв'язків між компонентами біоти ґрунту

Чисельність дощових черв'яків мала найтіснішу кореляцію з пулом мікроміцетів (r = 0,56). Середовище нематод потужно корелювало з кількістю спороутворюючих бактерій (r = 0,75), стрептоміцетів (r = 0,78) та фосформобілізуючих мікроорганізмів (r = 0,85). Самі компоненти мікробіологічної спільноти також глибоко інтегровані між собою.

Як видно з матриці (табл. 4.3), стрептоміцети виконують роль інтегратора мікробіоценозу: вони мають сильні зв'язки з азотфіксуючими та фосформобілізуючими бактеріями (r = 0,72–0,86). Ця біотична мережа безпосередньо впливає на біохімію ґрунту, зокрема на пул доступних макроелементів.

Таблиця 4.3.

Кореляційна матриця (r) синергічних взаємозв'язків між фізіологічними групами мікробіоти ґрунту

Компонети	Азотфіксуючі	Фосформобілізуючі	Мікроміцети
Азотфіксуючі		0,65	0,57
Фосформобілізуючі	0,65		0,78
Мікроміцети	0,57	0,78	
Стрептоміцети	0,76	0,89	0,72
Спороутворюючі	0,60	0,86	0,70

Згідно з регресійними моделями (рис. 4.2), вміст лужногідролізованого азоту жорстко детермінується активністю азотфіксаторів та стрептоміцетів (r = 0,72–0,74). Рівень доступного фосфору (P2O5) має найпотужнішу фізіологічну кореляцію з пулом фосформобілізуючих бактерій (r = 0,92). Крім того, вміст фосфору сильно залежить від загальної біологічної активності ґрунту (r = 0,92) та позитивно позначається на щільності нематод (r = 0,87) і дощових черв'яків (r = 0,37).

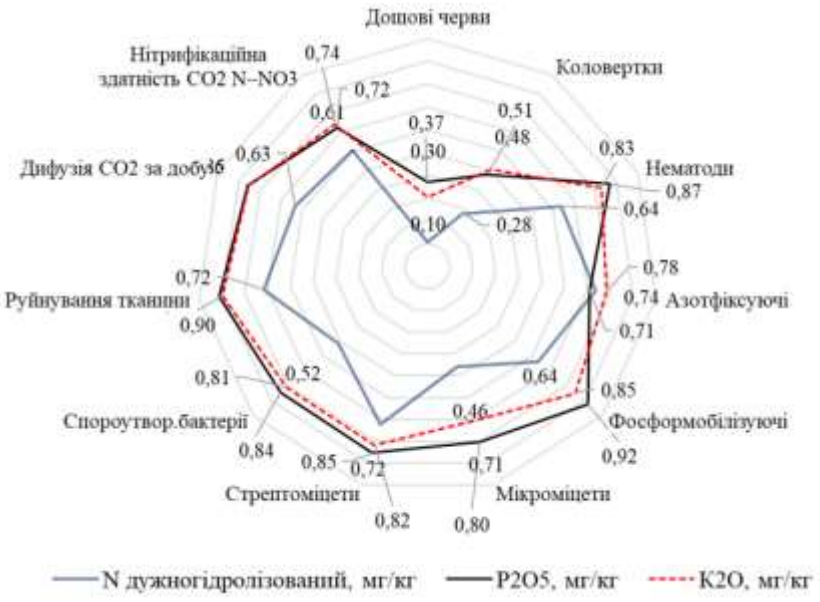


Рис. 4.2. Кореляційні плеяди залежності вмісту макроелементів від активності ґрунтової біоти

Таким чином, експериментально доведено відсутність алелопатичної чи токсичної дії кореневої системи *Cannabis sativa* L. на ґрунтову мікробіоту. За органічної технології вирощування ризосфера конопель стимулює формування потужних синергічних мікробіоценозів, які забезпечують ефективну мобілізацію макроелементів та підтримують екологічний баланс агробіогеоценозу.

Отже впровадження органічної моделі вирощування конопель посівних ініціює інтенсивний розвиток ґрунтового мікробіоценозу, що проявляється у зростанні чисельності азотфіксуючих бактерій на 19–24 % та фосформобілізаторів на 12 % порівняно з контрольними ділянками. Встановлено, що агроценози конопель є сприятливим середовищем для функціонування ґрунтової мезофауни, забезпечуючи стабільну щільність популяцій дощових черв’яків та мікрофауни. Виявлена система прямих кореляційних зв’язків між мікробіологічною активністю та вмістом доступних форм азоту й фосфору підтверджує, що біологізація землеробства дозволяє ефективно управляти поживним режимом ґрунту без залучення синтетичних добрив. Таким чином, *Cannabis sativa* L. в органічних сівозмінах виступає екологічно безпечною культурою, що сприяє відновленню біологічної активності та родючості едафотопу.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі на основі системного аналізу масиву експериментальних даних вирішено актуальне наукове завдання щодо обґрунтування фізіолого-морфологічних і репродуктивних механізмів розвитку конопель посівних (*Cannabis sativa* L.) та їхньої взаємодії з ґрунтовим мікробіоценозом за умов органічного землеробства.

1. Аналіз сучасної наукової літератури та експериментальних даних засвідчив, що *Cannabis sativa* L. володіє високою фізіологічною пластичністю. Рослина здатна до ефективної адаптації в умовах органічної моделі вирощування (повної відсутності синтетичних добрив та пестицидів) без настання критичної депресії ростових процесів та фотосинтетичної активності.
2. Встановлено, що лінійний ріст стебла та накопичення вегетативної біомаси (луб’яних волокон) жорстко детермінуються генетичною програмою генотипу (частка впливу понад 90 %) та кліматичними умовами вегетаційного періоду. Натомість зміна трофічного режиму на органічний має лише модифікуючий вплив (близько 4 %), не призводячи до статистично значущого зниження продуктивності апікальних та латеральних меристем.
3. Доведено високу чутливість морфогенезу кореневої системи до едафічних чинників. В умовах дефіциту легкозасвоюваних мінеральних солей спостерігається компенсаторне розростання підземної біомаси (збільшення маси коріння з 1,18 т/га до 1,68 т/га), що збільшує площу абсорбції і забезпечує ефективне трофічне живлення за рахунок взаємодії з ґрунтовою мікробіотою.
4. Дослідження репродуктивного потенціалу та вторинного метаболізму не виявило суворого фізіологічного антагонізму між інтенсивністю біосинтезу канабіноїдів та масою сформованого насіння. Сорти подвійного напряму використання (Глоба, Лара, Сула) продемонстрували збалансоване донорно-акцепторне співвідношення між вегетативною та генеративною

сферами, що робить їх ідеальними біотипами для екологічно безпечного виробництва.

5. Виявлено потужний стимулюючий вплив кореневих ексудатів конопель на ґрунтовий мікробіоценоз. В органічному агроценозі чисельність азотфіксуючих бактерій зростає на 19–24 %, а фосформобілізуючих – на 12 % порівняно з контрольними ділянками. Спростовано гіпотезу про тотальну алелопатичну токсичність ризосфери конопель для ґрунтової фауни, оскільки зафіксовано високу щільність популяцій дощових черв'яків та мікрофауни.
6. Встановлена система прямих (синергічних) кореляційних зв'язків між мікробіологічною активністю та пулом доступних форм азоту й фосфору доводить, що інтеграція *Cannabis sativa* L. в органічні сівозміни сприяє відновленню біологічної активності едафотопу та дозволяє ефективно управляти поживним режимом екосистеми природним шляхом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Agronomy of fibre hemp (Cannabis sativaL.) in Europe. P. C. Struik, S. Amaducci, M. J. Bullard, N. C. Stutterheim, G. Venturi, H. T. H. Cromack. Ind. Crop Prod. 2000. №11. P. 107–118. https://doi.org/10.1016/S0926-6690(99)00048-5.
2. Industrial hemp (Cannabis sativa L.) growing on heavy metal contaminated soil: Fibre quality and phytoremediation potential. P. Linger, J. Mussig, H. Fischer, J. Kobert. Ind. Crop Prod. 2002. №16. P. 33–42. DOI:10.1016/S0926-6690(02)00005-5.
3. Industrial hemp as an alternative crop in North Dakota. D. G. Kraenzel, T. Petry, B. Nelson, M. J. Anderson, D. Mathern, R. Todd. Agricultural Economics Report. 1998. № 402. DOI: 10.22004/ag.econ.23264.
4. Characterisation of hemp (Cannabis sativa L.) roots under different growing conditions. S. Amaducci, A. Zatta, M. Raffanini, G. Venturi. Plant Soil. 2008. №313. P. 227–235. DOI:10.1007/s11104-008-9695-0.
5. Shi G., Cai Q. Cadmium tolerance and accumulation in eight potential energy crops. Biotechnology Advances. 2009. Vol. 27, Iss. 5. P. 555–561. DOI:10.1016/j.biotechadv.2009.04.006.
6. Enhanced tolerance of industrial hemp (Cannabis sativa L.) plants on abandoned mine land soil leads to overexpression of cannabinoids. PLoS ONE. 2019. Vol. 14. Iss. 8. P. 1–14. DOI: 10.1371/journal.pone.0221570.
7. Phytoremediation potential of hemp (Cannabis sativa L.): Identification and characterization of heavy metals responsive genes. R. Ahmad, Z. Tehsin, S. T. Malik, S. A. Asad, M. Shahzad, M. Bilal, M. M. Shah, S. A. Khan. Clean Soil Air Water. 2016. №44. P. 195–201. DOI:10.1002/clen.201500117.
8. Перспективи вирощування конопель, сої та амаранту на радіоактивно забруднених територіях. О. О. Тетерук, В. Б. Ковальов, В. П. Ландін, В. П. Фещенко. Збалансоване природокористування. 2018. №4. С. 37–45.
9. Kok C. J., Coenen G. C. M., de Heij A. The effect of fibre hemp (Cannabis

sativaL.) on selected soilborne pathogens. J. Int. Hemp Assoc. 1994. №1. P. 6–9. https://www.druglibrary.net/olsen/HEMP/IHA/iha01103.html.

10. Merfield C. N. Industrial hemp and its potential for New Zealand. A Report for the 1999 Kellogg Rural Leadership Course. 1999. 33 P. http://www.merfield.com/research/2003/hemp/hemp.pdf.
11. Suitability assessment of different hemp (Cannabis sativa L.) varieties to the cultivation environment. M. Baldini, C. Ferfuia, F. Zuliani, F. Danuso. Industrial crops and products. 2020. №143. 111860. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111860.
12. Amaducci S., Errani M., Venturi G. Plant population effects on fibre hemp morphology and production. Journal of Industrial Hemp. 2002. №7. P. 33–60. https://doi.org/10.1300/J237v07n02_04.
13. The effect of N and P fertilization on growth, seed yield, and quality of industrial hemp in the Parkland region of Saskatchewan. C. L. Vera, S. S. Malhi, J. P. Raney [et al.]. Canadian Journal of Plant Science. 2004. №84. P. 939–947. https://doi.org/10.4141/P04-022.
14. Досягнення і проблеми генетики і селекції конопель. Генетика і селекція на межі тисячоліть / В. Г. Вировець та ін. К. : Логос. 2001. Т. 3. С. 55–57.
15. Інформаційний бюлетень наукових розробок за 2006–2010 рр. Р. Н. Гілязетдінов та ін. Суми : ПВКП «Корпункт», 2012. 39 с.
16. Гармашов В. В., Фомічова О. В. До питання органічного сільськогосподарського виробництва в Україні. Вісник аграрної науки. 2010. №7. С. 11–16.
17. Papastylianou P., Kakabouki I., Travlos I. (2018). Effect of nitrogen fertilization on growth and yield of industrial hemp (Cannabis sativa L.). Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca. 46. (1). P. 197–201. https://doi.org/10.15835/nbha46110862.
18. Adamovics A., Ivanovs S., Stramkale V. Investigations about the impact of norms of the fertilisers and cultivars upon the crop capacity biomass of industrial hemp. Agronomy Research. 2016. №14(3). P. 641–649.

https://doi.org/10.15159/AR.17.002.

19. Laleh S., Jami Al-ahmadi M., Parsa S. Response of hemp (Cannabis sativa L.) to integrated application of chemical and manure fertilizers. Acta agriculturae Slovenica. 2021. Volume 117. №2. DOI: http://dx.doi.org/10.14720/aas.2021.117.2.1819.
20. Plant analysis handbook III: A guide to sampling, preparation, analysis and interpretation for agronomic and horticultural crops. Micro-Macro Publishing Inc. G. M. Bryson, H. A. Mills, D. N. Sasseville, 2014. 571 p.
21. Ivanyi I., Izsaki Z. Effect of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization on nutritional status of fiber hemp. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 2009. № 40 (1–6). P. 974–986. https://doi.org/10.1080/00103620802693466.
22. Legros S., Picault S., Cerruti N. Factors affecting the yield of industrial hemp – Experimental results from France. In P. Bouloc (Ed.). Hemp: Industrial production and use. 2013. P. 72–97.
23. Application of individual digestate forms for the improvement of hemp production. J. Velechovský, M. Malík, L. Kaplan, P. Tlustoš. Agriculture 2021. № 11. 1137. https://doi.org/10.3390/agriculture11111137.
24. Łochyńska M., Frankowski J. Impact of silkworm excrement organic fertilizer on hemp biomass yield and composition. Ecological Engineering. 2020. № 20 (10). P. 63–71. DOI 10.12911/22998993/112858.
25. Кабанець В. М. Вплив добрив і норм висіву насіння на продуктивність рослин конопель сорту Гляна. Збірник наукових праць «Агропромислове виробництво Полісся». Житомир, 2017. № 10. С. 42–45.
26. Буджерак А. И. Реакция сельскохозяйственных культур на последействие различных систем удобрений. Агрохимия. 2000. № 4. С. 43–48.
27. Писаренко П. В., Калініченко А. В., Горб О. О. Формування екологічно збалансованих агроекосистем шляхом усунення негативних явищ у сучасному розвитку ґрунтових процесів. Вісник Полтавської державної аграрної академії. 2006. №1. С. 11–14.

28. Soti P., Rugg S., Racelis A. Potential of cover crops in promoting mycorrhizal diversity and soil quality in organic farms. Journal of Agricultural Science. 2016. №8. 42. DOI:10.5539/jas.v8n8p42.
29. Hemp yields and its rotation effects on wheat under rainfed mediterranean conditions. G. Gorchs, J. Lloveras, L. Serrano, S. Cela. Agronomy Journal. 2017. №109. P. 1551–1560. DOI:10.2134/agronj2016.11.0676.
30. Yield response of continuous soybean to one-season crop disturbance in a previous continuous soybean field in Northeast China. X. Liu, Y. Li, B. Han, Q. Zhang, K. Zhou, X. Zhang, M. Hashemi. Field Crop Res. 2012. №138. P. 52–56. DOI:10.1016/j.fcr.2012.09.012.
31. Bocsa I., Karus M., Gohmeyer D. Der Hanfanbau. Munster : Gandevirtschaftsverlag GmbH. 2000. 196 p.
32. Рекомендації по вирощуванню льону-довгунця і конопель різних напрямків використання / В. М. Кабанець, Р. Н. Гілятзедінов, О. Л. Коваленко, В. М. Кулик. Глухів : Дослідна станція луб'яних культур Інститут СГ ПС НААН. 2013. 16 с.
33. Allelopathic properties of hemp. Konstantinovic B., Koren A., Kojić M., Samardzic N. Contemporary Agriculture. 2021. №70(3-4). P. 101–107. DOI:10.2478/contagri-2021-0015.
34. ElSohly M. A., Slade D. Chemical constituents of marijuana: the complex mixture of natural cannabinoids. Life Sci. 2005. №78. P. 539–548. https://doi.org/10.1016/j.lfs.2005.09.011.
35. The essential oil from industrial hemp (Cannabis sativa L.) by-products as an effective tool for insect pest management in organic crops. G. Benelli, R. Pavela, R. Petrelli [et al]. Industrial Crops and Products. 2018. №122. P. 308–315. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.05.032.
36. Plant extracts for developing mosquito larvicides: from laboratory to the field, with insights on the modes of action. R. Pavela, F. Maggi, R. Iannarelli [et al]. Acta Tropica. 2019. № 193. P. 236–271. https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2019.01.019.

37. Mukhtar T., Kayani M. Z., Hussain M. A. Nematicidal activities of Cannabis sativa L. and Zanthoxylum alatumRoxb. Against Meloidogyne incognita. Industrial Crops and Products. 2013. №42. P. 447–453. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.06.027.
38. Ilieva-Makulec K., Bielecki M., Makulec G. Plants with known antagonistic properties against pests: how they influence non-target free-living soil fauna? Studia Ecologiae et Bioethicae. 2017. № 15 (4). P. 41–53. DOI:10.21697/seb.2017.15.4.05.
39. McPartland J. M. A review of Cannabis diseases. Journal of the International Hemp Association. 1996. № 3(1). P. 19–23. https://druglibrary.org/olsen/hemp/iha/iha03111.html.
40. Nematology in South Africa: a view from the 21st Century. E. R. van Biljon, F. Hourie, V. W. Spaull [et al]. Springer International Publishing. Nematode pests of tobacco and fibre crops. Switzerland. 2017. P. 285–310. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44210-5_12.
41. Effects of various amendments on industrial hemp (Cannabis sativa) growth and accumulation of heavy metal Pb in lead-contaminated soils. Y. P. Xu, R. Guo, H. Y. Guo [et al.]. Acta Agriculturae. 2019. №7. P. 57–62. DOI : 10.19386/j.cnki.jxnyxb.2019.07.10.
42. Climatic vulnerabilities and ecological preferences of soil invertebrates across biomes. F. Bastida, D. L. Eldridge, S. R. Abades, F. D. Alfaro. Molecular Ecology. 2019. Volume 29. Issue 4. P. 752–761. https://doi.org/10.1111/mec.15299.
43. Finnan J., Styles D. Hemp: A more sustainable annual energy crop for climate and energy policy. Energy Policy. 2013. Volume 58. P. 152–162. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.02.046.
44. Biomass and energy yield of industrial hemp grown for biogas and solid fuel. T. Prade, S.-E. Svensson, A. Andersson, J.-E. Mattsson. Biomass and Bioenergy. 2011. Volume 35. Issue 7. P. 3040–3049. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.04.006.

45. Мигаль М. Д. Біологія луб'яних волокон: монографія. Суми, 2011. 390 с.
46. The relationship of stem and seed yields to flowering phenology and sex expression in monoecious hemp (Cannabis sativa L.). A.-M. Faux, X. Draye, R. Lambert [et al.]. European Journal of Agronomy. 2013. Volume 47. P. 11–22. https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.01.006.
47. Сучасні сорти промислових конопель: матеріали семінару-тренінга «Промислові коноплі: вирощування, збирання, переробка», (Глухів, 2–6 квітня. 2018 р.). Інститут луб'яних культур Національної академії аграрних наук та Асоціація «Українські технічні коноплі».
48. Проблеми селекції і насінництва конопель : зб. наук. пр. Інституту землеробства УААН. В. Г. Вировець та ін. К., ІЗ УААН. 2003. С. 83–88.
49. Кабанець В. М. Інститут сільського господарства Північного Сходу НААН – багатогалузева наукова установа. Підвищення ефективності виробництва сільськогосподарської продукції в Північно-Східному регіоні України : Матеріали обласної науково-практичної конференції молодих учених та аспірантів. Суми : Видавничий будинок «Еллада», 2016. 74 с.
50. Мигаль М. Д., Шульга І. Л. Динаміка зміни вмісту канабіноїдів у вегетативних і генеративних органах конопель. Луб'яні та технічні культури. Збірник наукових праць. 2014. №3 (8). С. 71 – 80.
51. Cannabidiol for the psychosis in Parkinson's disease. J. A. S. Crippa, A. W. Zuardi, J. E. C. Hallak [et al]. Journal of Psychopharmacology. 2009. Vol. 23, Iss.8. P. 979–983. doi: 10.1177/0269881108096519.
52. Identification of psychoactive degradants of cannabidiol in simulated gastric and physiological fluid / J. Merrick, L. Brian, T. Sebree [et al]. Cannabis Cannabinoid Res. 2016 (1). P. 102–112.
53. European hemp-based food products – Health concerning cannabinoids exposure assessment N. Kladar, B. S. Čonić, B. Božin, L. Torović. Food Control. 2021. Volume 129. 108233. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108233.
54. Marzocchi S., Caboni M. Effect of harvesting time on hemp (Cannabis sativa L.) seed oil lipid composition. Authorea. 2020. №7. DOI:

10.22541/au.158354018.86295548.

55. Konuşkan D. B. Chapter 2 - Minor bioactive lipids in cold pressed oils. Green Technology, Bioactive Compounds, Functionality, and Applications. 2020. P. 7–14. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818188-1.00002-5.
56. Research of physical and chemical parameters of the oil obtained from organic and conversion hemp seeds varieties "Hliana". N. Sova, M. Lutsenko, A. Korchmaryova, K. Andrusevych. Ukrainian food journal. 2018. Volume. 7. Issue 2. P. 244–552. DOI:10.24263/2304-974X-2018-7-2-7.
57. Agroecological conditions of industrial hemp production in the western Pannonian agricultural subregion and fatty acids composition of hemp seed oil. M. Sraka, D. Škevin, M. Obranović, J. Butorac. Journal of Central European Agriculture. 2019. Volume. 20. №3. P. 809–822. https://doi.org/10.5513/JCEA01/20.3.2529.
58. Hemp flour as a valuable component for enriching physicochemical and antioxidant properties of wheat bread. A. Mikulec, S. Kowalski, R. Sabat [et al.]. LWT-Food Sci Techn. 2019. №102. P.164–172. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.12.028.
59. Švec I., Hrušková M. Properties and nutritional value of wheat bread enriched by hemp products. Potravinarstvo. 2015. №9. (1). 487. DOI:10.5219/487.
60. Deferne J. L., Pate D. W. Hemp seed oil: A source of valuable essential fattyacids. Journal of the International Hemp Association. 1996.№3(1). P. 4–7.
61. Пилипченко А. В. Агробіологічні аспекти вирощування конопель посівних (*Cannabis sativa* L.) за системою органічного землеробства в умовах нестійкого зволоження Лісостепу України : дис. … д-ра філ. : 201 / Полтав. держ. аграр. ун-т. Полтава, 2023. 245 с.
62. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. Москва : Колос, 1985. 351 с.
63. Маринич О. М., Шищенко П. Т. Фізична географія України: підручник. Київ : Знання, 2005. 511 с.
64. Мойсейченко В. Ф., Єщенко В. О. Основи наукових досліджень в агрономії. Київ : Вища школа, 1994. 344 с.

65. Результати селекції технічних конопель щодо збільшення вмісту канабігеролу. А. В. Пилипченко, М. М. Орлов, С. В. Шкурдода, В. В. Пасічник, К. П. Король. Вісник ХНАУ. Серія : Рослинництво, селекція і насінництво, плодоовочівництво і зберігання. 2018. № 1. С. 126–134. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhnau_roslyn_2018_1_15
66. Пилипченко А. В., Пісковий М. Б. Особливості селекції нових сортів конопель посівних у ТОВ «Інститут органічного землеробства». Вісник ПДАА. 2020. №1. С. 13–24. DOI: https://doi.org/10.31210/visnyk2020.01.01.
67. Регидратационный метод определения биомассы микроорганизмов в почве. С. А. Благодатский, Е. В. Благодатская, А. Ю. Горбенко [и др.]. Почвоведение. 1987. № 4. С. 64–71.
68. ДСТУ ISO 14240 : 2003. Якість ґрунту. Визначення ґрунтової мікробної біомаси. Частина 1 : Метод субстрат-стимульованого дихання : К. Держстандарт України, 2004. 15 с.
69. Штатнов В. И. К методикеопределения биологической активности почвы. Докл. ВАСХНИЛ. 1952. Вып. 6. С. 27–33.
70. Балюк С. А., Барахтян В. О. Методики визначення складу та властивостей ґрунтів. Х., 2004. 212 с.
71. ДСТУ 7695:2015. Насіння конопель. Технічні умови.
72. ДСТУ 8422:2015. Треста конопляна. Технічні умови.
73. ДСТУ 8423:2015. Солома конопляна. Технічні умови.
74. Балаєв А. Д., Піковська О. В., Тонха О. Л. Вміст гумусу та лабільних органічних речовин за різного використання чорнозему типового. Науковий журнал «Рослинництво та ґрунтознавство». 2018. №286. С. 173–179.
75. Пісковий М. Б., Пилипченко А. В. Особливості розвитку біоти ґрунту в посівах конопель за технологіями органічного землеробства та її вплив на продуктивність. Вісник Полтавської державної аграрної академії. 2019. № 3. С. 35–42. doi: 10.31210/visnyk2019.03.04.
76. Мигаль М.Д. Біологія формування насіннєвої продуктивності конопель:

монографія. Суми: видавничий будинок «Еллада», 2015. 233 с.

77. Features of forming the productivity of modern hemp varieties using organic cultivation technology. A. Pylypchenko, M. Marenych, V. Hanhur, T. Tymoshchuk, L. Malynka. Scientific Horizons. 2023. №26 (7). P. 54–65. DOI: https://doi.org/10.48077/scihor7.2023.54.
78. Response of essential oil hemp (Cannabis sativa L.) growth, biomass, and cannabinoid profilesto varying fertigation rates. S. L. Anderson, B. Pearson, R. Kjelgren, Z. Brym. PLoS ONE. 2021. №16. e0252985. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252985.
79. Пилипченко А. В., Пісковий М. Б. Особливості селекції нових сортів конопель посівних у ТОВ «Інститут органічного землеробства». Вісник ПДАА. 2020. №1. С. 13–24. DOI: https://doi.org/10.31210/visnyk2020.01.01.
80. Пилипченко А. В. Результати випробування органічних промислових конопель у ТОВ «Інститут органічного землеробства. *Вісник Харківського національного аграрного університету.* Серія «Рослинництво, селекція і насінництво, плодовочівництво», 2018. Вип. 2. С. 162–170.
81. Балаєв А. Д., Піковська О. В., Тонха О. Л. Вміст гумусу та лабільних органічних речовин за різного використання чорнозему типового. *Науковий журнал «Рослинництво та ґрунтознавство»*. 2018. № 286. С. 173–179.