

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
Національний ботанічний сад імені М. М. Гришка

DOI: <https://doi.org/10.59647/978-617-14-0471-7/1>

НОВІ ТА МАЛОПОШИРЕНІ ОЛІЙНІ КУЛЬТУРИ В УКРАЇНІ

Монографія

Київ

2025

*Затверджено до друку вченою радою Національного ботанічного саду
імені М. М. Гришка НАН України (протокол №11 від 02 жовтня 2025 р.)*

Рецензенти :

В. І. Мельник – д.б.н., професор,
Національний ботанічний сад імені М. М. Гришка НАН України
О.Л.Тонха – д.с.-г.н., професор,
Національний університет біоресурсів і природокористування України
О.П. Кравець – д.б.н.
Інститут клітинної біології та генетичної інженерії НАН України

Відповідальні редактори - чл.-кор. НАН України, професор **Рахметов Д. Б.**
- чл.-кор. НАН України, професор **Заїменко Н.В.**

Автори: Д. Б. Рахметов, Н. В. Заїменко, О. П. Бондарчук, Н. А. Павлюченко, С. М. Ковтун-Водяницька, Н. П. Дідик, О. М. Вергун, І. П. Харитоновна, О. І. Дзюба, С. О. Рахметова, О. П. Юношева, І. В. Левчук, А. М. Гнатюк, О. В. Закрасов, Н. В. Нікішова, А. В. Любінська, А. Д. Рахметов, Р. Я. Блюм, Я. Б. Блюм

Н75 Нові та малопоширені олійні культури в Україні : монографія / Д. Б. Рахметов, Н.В.Заїменко, О. П. Бондарчук та ін. – Київ : НАН України, НБС імені М.М. Гришка, 2025. – 326 с.
ISBN 978-617-14-0471-7

Наведено результати теоретичних узагальнень та проведених експериментальних досліджень щодо ролі нових та малопоширених економічно важливих олійних культур (*Camelina sativa* та *Brassica carinata*) для покращення продовольчої і біологічної безпеки. Подано інформацію про генофондову колекцію олійних культур – рижію посівного, гірчиці ефіопської та ріпаку. Представлено дані про біолого-морфологічні, біохімічні особливості та продуктивність мобілізованих і створених генотипів олійних рослин в умовах інтродукції у правобережному Лісостепу України. Подано результати досліджень щодо морфолого-біологічних особливостей плодів та насіння рослин. Наведено дані про вміст та вихід ліпідів з насіння і результати аналізу жирнокислотного складу олії для визначення напрямку її використання. Показано роль сучасних біолого-екологічних і алелопатичних методів у поліпшенні ростових процесів, підвищенні продуктивності олійних рослин. Представлено науково-методичні засади поліпшення біотрофних властивостей ґрунту та безвідходної утилізації побічної продукції. Показано роль кремнію в механізмах зворотного зв'язку в системі ґрунт-рослина-ґрунт.

Для біологів, ботаніків, фізіологів, екологів, інтродукторів, рослинників, викладачів, аспірантів і студентів.

УДК 573.6.086.83:579.66(477-25)

Друкується в авторській редакції.

Відповідальність за достовірність наданого для видання матеріалу автори несуть одноосібно.

Будь яке відтворення тексту без згоди авторів та видавництва забороняється.

**Роботу підготовлено та видано
за підтримки Президії НАН України**

ISBN 978-617-14-0471-7

© Національна академія наук України, 2025
© Національний ботанічний сад імені М.М. Гришка, 2025
© Рахметов Д. Б., Заїменко Н.В., Бондарчук О. П. та ін., 2025

NOVEL AND LESS COMMON OILSEED CROPS IN UKRAINE

Monograph

Kyiv
2025

*Approved for publication by the Academic Council M.M. Gryshko National Botanical Garden
of the National Academy of Sciences of Ukraine (protocol No. 11 of October 02, 2025)*

Reviewers:

V. I. Melnyk – Doctor of Biological Sciences, Professor,
M.M. Gryshko National Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Ukraine
O. L. Tonkha – Doctor of Biological Sciences, Professor,
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
O. P. Kravets – Doctor of Biological Sciences
Institute of Cell Biology and Genetic Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine

Editors-in-chief: corresponding member of the NAS of Ukraine, professor **Rakhmetov D. B.**
corresponding member of the NAS of Ukraine, professor **Zaimenko N. V.**

Authors : D. B. Rakhmetov, N. V. Zaimenko, O. P. Bondarchuk, N. A. Pavlyuchenko, S. M. Kovtun-
Vodyanytska, N. P. Didyk, O. M. Vergun, I. P. Kharitonova, O. I. Dzyuba, S. O. Rakhmetova,
O. P. Yunosheva, I. V. Levchuk, A. M. Gnatiuk, O. V. Zakrasov, N. V. Nikishova, A. V. Lyubinska,
A. D. Rakhmetov, R. Ya. Blum, Ya. B. Blum

Novel and less common oilseed crops in Ukraine: monograph /D. B. Rakhmetov,
N. V. Zaimenko, O. P. Bondarchuk et al. – Kyiv: National Academy of Sciences of Ukraine,
M.M. Gryshko NBG, 2025. – 326 p.
ISBN 978-617-14-0471-7

The results of theoretical generalizations and experimental studies on the role of novel and less widespread economically important oilseeds (*Camelina sativa* and *Brassica carinata*) in improving food and biological security are presented. Information is provided on the gene pool collection of oilseeds. Data on the biological, morphological, biochemical features and productivity of mobilized and created genotypes of oilseeds under conditions of introduction in the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine are presented. The results of studies on the morphological and biological features of fruits and seeds of plants are presented. Data on the content and yield of lipids from seeds and the results of the analysis of the fatty acid composition of oil to determine the direction of its use are presented. The role of modern biological, ecological and allelopathic methods in improving growth processes, increasing the productivity of oilseeds is shown. The scientific and methodological principles of improving the biotrophic properties of the soil and waste-free utilization of by-products are presented. The role of silicon in feedback mechanisms in the soil-plant-soil system is shown.

For biologists, botanists, physiologists, ecologists, plant growers, teachers, graduate students and students.

UDC 573.6.086.83:579.66(477-25)

*The work has been prepared and published
with the support of the Presidium of the National Academy of Sciences of Ukraine*

ISBN 978-617-14-0471-7

©National Academy of Sciences of Ukraine, 2025
© M.M. Gryshko National Botanical Garden, 2025
© Rakhmetov D. B., Zaimenko N. V., Bondarchuk O. P. et al., 2025

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ЕКОНОМІЧНО ВАЖЛИВІ ОЛІЙНІ КУЛЬТУРИ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ПРОДОВОЛЬНОЇ І БІОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ	13
РОЗДІЛ 2. <i>BRASSICA CARINATA</i> A. BRAUN (ГІРЧИЦЯ ЕФІОПСЬКА АБО КАПУСТА КІЛЬОПОДІБНА) – НОВА ДЛЯ УКРАЇНИ ОЛІЙНА РОСЛИНА	39
РОЗДІЛ 3. УМОВИ, ОБ’ЄКТИ ТА МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	51
РОЗДІЛ 4. РОСТОВІ, БІОХІМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА ПРОДУКТИВНІСТЬ МОБІЛІЗОВАНИХ І СТВОРЕНИХ ГЕНОТИПІВ РОСЛИН РИЖІЮ (<i>CAMELINA SATIVA</i>)	66
4.1. Ростові особливості та продуктивність мобілізованих і створених генотипів рослин рижію	66
4.2. Морфолого-біологічні особливості плодів та насіння рослин різних генотипів <i>Camelina sativa</i>	78
4.3. Біохімічні особливості рослин різних генотипів <i>Camelina sativa</i>	82
4.4. Біохімічний склад олії рижію посівного та гірчиці ефіопської.....	90
РОЗДІЛ 5. БІОЛОГО-МОРФОЛОГІЧНІ, БІОХІМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА ПРОДУКТИВНІСТЬ МОБІЛІЗОВАНИХ І СТВОРЕНИХ ГЕНОТИПІВ РОСЛИН <i>BRASSICA CARINATA</i> A. BRAUN В УМОВАХ ІНТРОДУКЦІЇ У ПРАВОБЕРЕЖНОМУ ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ	96
5.1. Ростові особливості та продуктивність мобілізованих і створених генотипів рослин <i>Brassica carinata</i>	96
5.2. Фізіологічний стан рослин <i>Brassica carinata</i> в умовах інтродукції	123
5.3. Біохімічні особливості рослин різних генотипів <i>Brassica carinata</i>	127
5.4. Енергетична цінність олійних рослин роду <i>Brassica</i>	134
5.5. Біохімічний склад олії <i>Brassica carinata</i> залежно від генотипових особливостей рослин	137
5.6. Мінеральний склад рослин <i>Brassica carinata</i>	145
РОЗДІЛ 6. РОЛЬ СУЧАСНИХ БІОЛОГО-ЕКОЛОГІЧНИХ ТА АЛЕЛОПАТИЧНИХ МЕТОДІВ У ПОЛІПШЕННІ РОСТОВИХ ПРОЦЕСІВ, ПІДВИЩЕННІ ПРОДУКТИВНОСТІ ОЛІЙНИХ РОСЛИН (РИЖІЮ, ГІРЧИЦІ ТА РІПАКУ)	155
6.1. Вплив кремнієвмісних добрив на ріст, розвиток і продуктивність олійних рослин	155
6.2. Біохімічний склад рослин рижію, гірчиці та ріпака.....	167
6.3. Післядія кремнієвмісних добрив на другий рік після внесення на ростові та фізіолого-біохімічні особливості рослин родини Brassicaceae	180
РОЗДІЛ 7. НАУКОВО-МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ПОЛІПШЕННЯ БІОТРОФНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ҐРУНТУ ТА БЕЗВІДХОДНОЇ УТИЛІЗАЦІЇ ПОБІЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ	192
РОЗДІЛ 8. РОЛЬ КРЕМНІЮ В МЕХАНІЗМАХ ЗВОРОТНОГО ЗВ’ЯЗКУ В СИСТЕМІ ҐРУНТ-РОСЛИНА-ҐРУНТ	228
ЗАКЛЮЧЕННЯ	276
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	281
ДОДАТКИ	315

ВСТУП

Період війни вимагає швидких і рішучих дій, підпорядкованих єдиній меті – відсічі збройної агресії. Поряд із відстоюванням територіальної цілісності, Україна стоїть перед проблемою забезпечення власної продовольчої, енергетичної та біологічної безпеки. Зважаючи на це, диверсифікація сортаменту високопродуктивних олійних культур комплексного використання в умовах воєнного стану має вагомe наукове та практичне значення.

Аналіз сучасного стану досліджень та розробок у сфері виробництва сільськогосподарської продукції в Україні та в інших країнах помірного клімату для виробництва збалансованих харчових продуктів і безвідходної утилізації побічної продукції свідчить про високий економічний потенціал подальшого впровадження у сільськогосподарську практику як традиційних (ріпак, суріпиця), так і нових та малопоширених (рижій, гірчиця ефіопська тощо) олійних культур з родини Хрестоцвітих (*Brassicaceae*), застосування передових методів їхньої селекції, а також нових методів поліпшення біотрофних властивостей ґрунтів.

Відомо, що серед високоолійних культур в Україні та значній частині Європи, чільне місце займає саме ріпак, для вирощування якого використовується 10-14% ріллі. Однак, як свідчить практика, традиційне рослинництво в зоні помірного клімату не може повною мірою вирішити поставлені завдання за рахунок вирощування ріпаку. Зокрема, ріпак є виснажливою для ґрунтів сільськогосподарською культурою. У країнах із вираженим континентальним кліматом, до яких належить також Україна, рівень його щорічного виробництва є нестабільним через низький рівень морозо- та зимостійкості. До того ж, склад олії ріпаку за вмістом ненасичених жирних кислот – ненайкращий варіант використання з метою харчування. Тому актуальним є впровадження у сільськогосподарське виробництво малопоши-

рених, нетрадиційних та нових високопродуктивних олійних рослин, які не лише конкурують з ріпаком, але й переважають його за важливими характеристиками, будучи джерелом якісної харчової і технічної олії. До таких перспективних олійних культур можна віднести рижій посівний (*Camelina sativa*) та гірчицю ефіопську або капусту кільоподібну (*Brassica carinata*).

Зокрема, рижій – екологічно пластична, скоростигла рослина з винятковим якісним жирнокислотним складом олії, яка має поліфункціональне значення як харчова, технічна та біопаливна культура, що забезпечує високі врожаї на маргінальних ґрунтах. Світовим трендом є використання олії рижію для отримання авіаційного біопалива. Гірчиця ефіопська, запропонована вперше як нова олійна рослина в Україні, здатна забезпечити високу урожайність і стійкість є перспективною для виробництва технічних олій для військової промисловості, а також авіаційного біопалива.

Рижій – стародавня культура харчового призначення, яка характеризується винятковими властивостями як екологічно пластична рослина. Культура має можливості для вирощування в озимих та ярих посівах як найскоростигліша (рання чи ультрорання) з найкоротшим вегетаційним періодом рослина (65-75 діб). Рижій посівний завдяки його особливостям жирнокислотного складу, скоростиглості та можливості комбінованого вирощування з іншими культурами (Zanetti et al., 2021; Блюм, 2022; Біологічні..., 2024) має значну перспективу для культивування в Україні як поліфункціональна (у першу чергу харчова), так і біопаливна культура (світовим трендом є використання олії для отримання авіаційного біопалива) (Blume et al., 2022a). Як рослина невибаглива до родючості ґрунту, рижій можна вирощувати на низькородючих маргінальних ґрунтах (Очеретна та Флорова, 2020; Obour et al., 2015; Zanetti et al., 2021; Jiand et al., 2014; Блюм, 2022).

Однією з перспективних інтродукованих олійних культур в Україні є гірчиця ефіопська (або капуста кільоподібна). Як нова для України олійна

рослина вона протягом багаторічного періоду проходить комплексні інтродукційні дослідження на базі НБС НАН України спільно з ДУ «Інститут харчової біотехнології і геноміки НАН України». Рослина в умовах України показала високий урожайний потенціал та стійкість і може швидко стати перспективною олійною культурою у разі використання відповідних молекулярно-генетичних та біотехнологічних методів для створення цінних генотипів і сортів із заданими кількісними та якісними характеристиками олії. Зважаючи на походження (гірські райони Африки) та поширення (крім Африки, в Азії, Південній Європі, Австралії, Північній Америці, Канаді) ця культура в умовах України має великі перспективи для реалізації свого генетичного і біологічного потенціалу – за стійкістю до абіотичних та біотичних стресових факторів і забезпечення високої урожайності (Song et al., 2021; Roslinsky, 2021; Thakur et al., 2021; Yim et al., 2022). *B. carinata* також має ряд переваг у порівнянні з ріпаком, зокрема має вищий вміст олії, акумулює більше біомаси під час вегетації, здатна пригнічувати ріст бур'янів та має більш розвинену кореневу систему, що дозволяє використовувати її в тому числі і для фітореMediaції (Marillia et al., 2014). Наразі культивування *B. carinata* як нової олійної культури широко вивчається різними дослідниками (Seerpaul et al., 2021a), також розглядається можливість створення озимих генотипів зі значно вищою врожайністю (Seerpaul et al., 2021a, b).

Таким чином, з огляду на викладене вище, важливого значення набуває розробка інноваційних біотехнологій і селекційних технологій підвищення урожайності насіння та вмісту олії в насінні рослин *Camelina sativa* і *Brassica carinata*. Наразі, ці завдання відповідають необхідності забезпечення належного рівня біологічної безпеки у рослинництві та збереження родючості ґрунтів при вирощуванні зазначених культур. Слід відзначити, що для порівняння з новими і малопоширеними олійними культурами родини капустяних – рижієм та гірчицею ефіопською – взято

ріпак, який є добре відомою і важливою в Україні, але виснажливою для ґрунтів культурою. Введення у широку культуру нових або стародавніх, малопоширених чи забутих олійних рослин з винятковими позитивними якісними властивостями є надзвичайно важливими завданнями сьогодення.

Одночасно розробляються і супутні технології застосування різноманітних екологічно безпечних органічних сполук та природних мінералів як для рекультивації порушених ґрунтів, так і підвищення урожайності різних сільськогосподарських культур, у тому числі і для підвищення їх олійності (3-5%). Виснаження та дефіцит природних ресурсів у результаті бойових дій і наростаючий дефіцит продовольства роблять актуальним вирішення питання ефективної рекультивації порушених земель та ґрунтів із застосуванням безпечних для довкілля природних кремнієвмісних мінералів. За рахунок поєднання органічних матеріалів різного походження з кремнієвмісними мінералами забезпечується синтез полікремнієвих кислот, присутність яких у ґрунті призводить до покращення органо-мінерального комплексу, зменшення деградації органічної речовини, оптимізації агрофізичних показників, розвитку агрономічно корисних мікроорганізмів, зниження ґрунтової і токсичності.

Мета роботи – залучення нових та малопоширених економічно важливих олійних культур для створення високопродуктивних селекційних ліній із використанням генетичних маркерів та розробка технології підвищення їх продуктивності за рахунок поліпшення біотрофних властивостей ґрунту.

Об'єкт досліджень – процес мобілізації, інтродукційного вивчення різних генотипів і створення високопродуктивних селекційних ліній та сортозразків рослин. Розробка методів покращення ростових і продуктивних показників рослин та поліпшення біотрофних властивостей ґрунту за умов використання оригінальних кремнієвмісних добрив.

Предмет дослідження – нові та малопоширені олійні культури: гірчиця ефіопська або капуста кільчоподібна (*Brassica carinata*); ріжій посівний (*Camelina sativa*); ріпак (*Brassica napus*) і кремнієвмісні добрива.

У роботі були використані такі методи досліджень: загальнонаукові (гіпотеза, експеримент, спостереження, аналіз, синтез) і спеціальні методи (польовий і лабораторний – хімічні, біохімічні, мікробіологічні, агрохімічні). На основі сучасних методів інтродукції, акліматизації, молекулярної селекції, біохімії та біотехнології рослин встановлено особливості росту, розвитку і якісні та кількісні показники рослин, продуктивний потенціал, алелопатичні властивості нових олійних культур і створених генотипів.

Вперше в Україні оцінено мобілізований генофонд економічно-важливих олійних рослин (84 зразки) та відібрано генотипи (понад 20) для їх маркер-опосередкованої селекції і виведено 4 високоадаптивні сорти.

Розроблено науково-методичні засади та введено в культуру гірчицю ефіопську і ріжій озимий як перспективні олійні рослини в Україні. Встановлено морфолого-біологічні особливості та сезонні ритми росту і розвитку рослин та господарсько-технологічні властивості ріжію і гірчиці ефіопської у період технічної стиглості.

Визначено рівень стійкості рослин та опрацьовано способи підвищення функціонування фотосистеми II і покращення фізіологічних процесів за використання генетичного потенціалу рослин та мікродобрив.

Визначено біохімічний склад і продуктивний потенціал різних біотипів рослин. Вивчено вміст та вихід ліпідів із насіння і проведено аналіз жирно-кислотного складу олії. За оцінкою якісного і кількісного складу ліпідів та інших нутрієнтів фітосировини (56 зразків) визначено напрями використання рослин. Виявлено закономірності накопичення нутрієнтів у рослин залежно від різних чинників. Визначено вміст 22-х макро- і мікроелементів у рослин-

ній сировині та показано їх роль у ростовому і метаболічному процесах у рослин.

Встановлено, що найвищий вміст олії у насінні рижю становив 39,48 % (с. Руно). Виявлено, що за жирнокислотним складом олії для різних форм рослин *Camelina sativa* характерним є високий вміст ліноленової (31,4–35,6 %), лінолевої (19,8–24,6 %), олеїнової (11,9–18,5 %), гондоїнової-11-ейкозенової (9,5–12,9 %), пальмітинової (9,5–11,4 %) жирних кислот.

Виявлено, що олія *Brassica carinata* характеризується високим вмістом ерукової кислоти (36-45 %), лінолевої (15,00-18,84 %), ліноленової (11-13 %) та олеїнової (7,00-9,57 %). Визначено також, що фітомаса (3444-3994 ккал/кг) і насіння (5830-6331 ккал/кг) олійних рослин характеризуються високою енергетичною цінністю.

Розроблено сучасні біо- та фітотехнологічні методи поліпшення біотрофних властивостей ґрунту, які сприяють покращенню фізіолого-біохімічних, ростових процесів, підвищенню продуктивних показників та стійкості олійних рослин – за умови використання органо-мінеральних кремнієвмісних добрив. Встановлено суттєве підвищення вмісту кремнію, титану і цинку в ґрунті, збільшилися показники брасиностероїдів та синтез хлорофілу *a* у листках, що позитивно вплинуло на адаптаційну здатність організму і зростання накопичення вторинних метаболітів у рослинах. Доведено позитивний вплив кремнію на алелопатичний режим прикореневого середовища рижю, гірчиці та ріпаку впродовж вегетаційного періоду.

Опрацьовано методи безвідходної утилізації побічної продукції (подано заявки на 2 патенти на винахід). Розроблено оригінальні технології виробництва збалансованих харчових продуктів, технічних та фітозасобів на основі нових олійних культур.

Робота складається з вступу, восьми розділів, заключної частини, списку літератури та додатків. У першому розділі показано роль економічно важ-

ливих олійних культур для покращення продовольчої і біологічної безпеки. У другому розділі представлено інформацію про *Brassica carinata* A. Braun (гірчиця ефіопська або капуста кільчоподібна) як нову для України олійну рослину. У розділі 3 наведено умови, об'єкти та методи проведення досліджень. У розділі 4 представлено ростові особливості рослин, а також продуктивність мобілізованих і створених генотипів рижію. Показано морфолого-біологічні особливості плодів та насіння і наведено біохімічні особливості рослин та складу олії різних генотипів *Camelina sativa*. У розділі 5 показано біолого-морфологічні, біохімічні особливості та продуктивність мобілізованих і створених генотипів рослин *Brassica carinata* в умовах інтродукції у правобережному Лісостепу України. В розділі 6 розкрито роль сучасних біолого-екологічних і алелопатичних методів у поліпшенні ростових процесів, підвищенні продуктивності олійних рослин (рижію, гірчиці та ріпаку). У розділі 7 представлено науково-методичні засади поліпшення біотрофних властивостей ґрунту та безвідходної утилізації побічної продукції. У розділі 8 показано роль кремнію в механізмах зворотного зв'язку в системі ґрунт-рослина-ґрунт.

Ключові слова : олійні культури, *Camelina sativa*, *Brassica carinata*, *Brassica napus*, селекційні лінії, продуктивність, ліпіди, органо-мінеральні кремнієвмісні добрива, алелопатичний режим, біотрофні властивості ґрунту.

РОЗДІЛ 1.

ЕКОНОМІЧНО ВАЖЛИВІ ОЛІЙНІ КУЛЬТУРИ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ПРОДОВОЛЬЧОЇ І БІОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

Сталий розвиток людської цивілізації можливий за вирішення низки найнеобхідніших глобальних задач, серед яких зміна клімату, збереження фіторізноманіття, раціональне використання ресурсів природи та відтворення біорізноманіття, забезпечення людства продуктами харчування, лікарськими засобами, тваринництво – збалансованими кормами. До цих проблем в Україні додався воєнний конфлікт, який розв'язала росія. Це призвело до суттєвого ускладнення усіх проблем екологічного, економічного, продовольчого, соціального, енергетичного, гуманітарного тощо спрямування.

Завдання, які спрямовані на вирішення цих та інших актуальних проблем, потребують нагального вирішення з використанням сучасних науково-інноваційних підходів.

Війна у нашій державі похитнула ринки продуктів харчування та енергії у світі. Адже агропродовольча система є вразливою до наслідків екологічних потрясінь, війн, мінливості клімату та економічних негативних змін. Дослідники констатують, що у 2023 році у світі з'явився новий мегатренд – зростання закупівлі продуктів харчування не лише серед містян, але й сільського населення, також відмічено зростання споживання продуктів із високим ступенем обробки. Це питання потребує вирішення шляхом трансформації агропродовольчих систем в умовах урбанізації та забезпечення можливостей кожної людини мати доступ до здорової їжі (The State of Food Security ..., 2023). Світові негаразди та фінансові спекуляції вплинули на вартість і пропозицію сільськогосподарської продукції: війна в Україні підняла ціни на сільськогосподарську продукцію

до історично високих рівнів. Насамперед, це стосується пшениці та рослинних олій, які необхідні для здорового та збалансованого харчування людини з точки зору споживання корисних речовин і калорійності.

Рослинні олії є ключовим продуктом здорового харчування та важливим джерелом жирів: їхня дольова частка близько 10% добової калорійності харчових продуктів (300 ккал на день на людину), що робить їх другою за важливістю групою продуктів після зернових. Олія також є поживним джерелом омега-3 і омега-6 жирних кислот і вітамінів Е і К. Не менш важливим є те, що рослинні олії – один із головних продуктів для бідних споживачів, які не можуть перейти на більш дороге вершкове масло або інший тваринний жир. Поряд із іншими товарами, ціни на багато рослинних олій були на дуже високому рівні до 22.02.2022. Відтоді ціни на рослинну олію зросли в середньому майже на 30% (Glauber et al., 2022). У цілому олійні культури забезпечують покращення соціально-економічних умов існування, що призводить до зниження рівня бідності, підвищення якості освіти і покращення доступу до продуктів харчування та систем охорони здоров'я (Food Security and Sustainable ..., 2022).

Згідно аналітики Світового банку з гострою продовольчою безпекою до 2025 року зіткнуться 943 млн. людей і 956 млн. – до 2028 року. У реальному вираженні інфляція цін на продовольство у світі на кінець поточного року перевищила загальну інфляцію на 76% у 166 країнах (станом на 04.12.2023) (Food Security, 2023). Тож перед українським суспільством як частиною світової спільноти стоять невідворотні виклики, які потребують готовності до їх адекватного сприйняття і оперативного науково-практичного вирішення.

У зв'язку з цим має важливе значення інтродукція, акліматизація, адаптація, селекція та біотехнологія нових малопоширених, нетрадиційних, а також стародавніх і забутих господарсько-цінних рослин з метою

забезпечення різноманітних потреб людства у цінних фітоджерелах для виробництва збалансованих харчових продуктів, лікарських засобів тощо. Відомо, що після хліба олія є важливим продуктом харчування. Україна має передові позиції у Європі та світі з виробництва й експорту олії та олійної продукції. Зважаючи на це, розширення асортименту рослинних олій за рахунок диверсифікації вирощуваних олійних культур з одного боку та забезпечення екологічного балансу у землеробстві, у контексті сприяння невиснажливого землекористування за рахунок наявних головних олійних культур – соняшника та ріпаку – з іншого боку, має важливе значення.

Наразі, необхідність забезпечення біологічної безпеки у рослинництві та збереження родючості ґрунту, за рахунок вирощування зазначених культур, робить проблему надзвичайно актуальною. Тож введення в широку культуру нових або стародавніх, малопоширених чи забутих олійних рослин із виключними позитивними якісними властивостями є важливою задачею сьогодення.

До малопоширених перспективних олійних культур відноситься рижій посівний (*Camelina sativa* (L.) Crantz) – стародавня культура людства, яка характеризується виключними властивостями – як екологічно пластична, високопродуктивна рослина, перспективна для виробництва харчової олії, шроту для кормових раціонів тварин та/або біопаливної сировини.

Актуальним завданням є мобілізація вихідного матеріалу, створення високоадаптивних сортів рослин рижію на основі оригінальної генотипової бази, покращення ростових, продуктивних показників, вмісту та якості олії (Рахметов, 2011; Рахметов та ін., 2014; Yemets et al., 2014). Результати досліджень різних форм і сортозразків *C. sativa*, які мобілізовані та утримуються в колекціях відділу культурної флори Національного ботанічного саду імені М.М. Гришка НАН України, сприяють на сьогодні вирішенню задач продовольчої та біологічної безпеки України і є науковим

підґрунтям для розробки нових лікарських препаратів шляхом створення високопродуктивних рослин із використанням генетичних маркерів та підвищення їхньої продуктивності за рахунок поліпшення біотрофних властивостей ґрунту.

Таксономія роду Рижії (*Camelina* Crantz.). Рід рижії(*Camelina* Crantz, вперше опубліковано у Stirp. Austr. Fasc. 1: 18 (1762)) належить до порядку Brassicales родини Brassicaceae триби Camelinaeae. Природний ареал знаходиться у південній, східній та південно-східній частині Європи, Середземномор'ї, Центральній Азії – до Пакистану. У свій час ботаніками було описано 12 видів цього роду (Котов, 1953). Сучасні таксономічні переліки наводять 8-11 видів роду: *Camelina alpkoensis* Yild., *Camelina alyssum* Thell., *Camelina anomala* Boiss. & Hausskn. ex Boiss., *Camelina barbareaifolia* DC., *Camelina caisir* Wall., *Camelina hispida* Boiss., *Camelina incana* J.Presl & C.Presl, *Camelina laxa* C.A.Mey., *Camelina microcarpa* Andr. ex DC., *Camelina rumelica* Velen., *Camelina sativa* Crantz (WFO, 2023); *Camelina alyssum* (Mill.) Thell., *Camelina anomala* Boiss. & Hausskn., *Camelina hispida* Boiss., *Camelina laxa* C.A.Mey., *Camelina microcarpa* Andr. ex DC., *Camelina neglecta* J.R.Brock, Mandáková, Lysak & Al-Shehbaz, *Camelina rumelica* Velen., *Camelina sativa* (L.) Crantz (POWO, 2023), *Camelina alyssum* (Mill.) Thell., *Camelina alyssum* subsp. *integerrima* (Čelak.) Smejkal, *Camelina anomala* Boiss. & Hausskn., *Camelina hispida* Boiss., *Camelina laxa* C.A.Mey., *Camelina macrocarpa* Wierzb. ex Reichenb., *Camelina microcarpa* Andr. ex DC., *Camelina rumelica* Velen., *Camelina rumelica* subsp. *transcaspica* (Fritsch) Hegi, *Camelina sativa* (L.) Crantz (Francis et al., 2009; The Plant List ..., 2023).

Наукова назва походить від грецьких слів «chamai» – низький і «linion» – льон. Прямий переклад – «низький льон», бо рижії часто росте в посівах льону, глушить їх, через що льон виростає низький (Рева, Рева, 1976).

Види роду *Camelina* відносять до підтриби *Capsellinae* Hayek., для яких характерним є відсутність серединних нектарників, а бічні мають придатки; судинні пучки з ідіобластами, волоски галузисті; наявні прямостоячі при основі не мішковидні чашолистки. Пелюстки – з нігтиками, жовті. Зав'язь – сидяча, стовпчик – видовжений. Плід – стручечок, оберненояйцеподібної форми, що розкривається двома опуклими стулками з випнутою серединною жилкою. Гнізда багатонасінні, насінина овальна, з плоскими сім'ядолями. Рослини опушені простими та галузистими волосками (Котов, 1953).

Для природної флори України визначники та «Флори» наводять шість видів (Котов, 1953; Визначник..., 1999), проте два з них сучасні системи та бази даних (POWO, 2023; Euro+Med 2006+, 2023; WFO, 2023) вказують лише як синоніми *Camelina sativa*, який зараз сприймається географічно і морфологічно більш широко. Однак зразки з території України, які були описані як окремі види, можуть слугувати базою для проведення селекційної роботи та отримання нових сортів, гібридів, форм і культиварів, адаптованих в умовах України.

Морфолого-біологічна характеристика зразків рослин Camelina поширених в Україні (Котов, 1953; Визначник рослин, 1999).

1. Рижій білоцвітий або румелійський (*Camelina rumelica* Velen., *Camelina rumelica* subsp. *rumelica* = *Camelina albiflora* (Kotschy ex Boiss.) N.Busch.)

Однорічник або дворічник в умовах помірної зони. Осіма рослина, на початку розвитку утворює розетку листків. Стебло 15-50 см заввишки, просте або з небагатьма видовженими пагонами, у верхній частині – голе, у нижній – густо опушене переважно довгими відхиленими волосками, зрідка трапляються галузисті волоски. Листки довгасті, сірі, густо вкриті простими волосками. Пелюстки 7-8 мм завдовжки, білі або жовтуваті, удвоє довші за чашечку. Стручечки грушоподібні, дрібні 5-8 мм з малоопуклими стулками, зі стовпчиком 1,5-3 мм. Насінина жовтаво-коричнева, 1,0-1,5 мм завдовжки та

0,4-0,6 мм завширшки. Квітують рослини у квітні-травні. Природний ареал даного виду знаходиться у Південно-Східній Європі до Центральної Азії та Північного Пакистану. Поширений у Середземномор'ї, на Балканах, Кавказі, Закавказзі, у Туркменістані (гірські райони), Вірменії, Курдистані, Ірані, Центральній Азії та Паміро-Алтаї. В Україні досить поширений, особливо у південних регіонах (на крайньому півдні трапляється зрідка) та в АР Крим. Росте уздовж доріг як бур'ян на полях (рис. 1. 1).



Рис. 1. 1. Ареал рижію білоцвітого

<https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:279868-1#distributions>
https://euromed.luomus.fi/euromed_map.php?taxon=292057&size=medium

2. **Рижій дрібноплідний** (*Camelina microcarpa* Andr. Andr. ex DC.). $2n = 40$. У природних умовах рослини даного виду трапляються на території помірної зони Євразії, півночі Африки (рис. 1. 2). В Україні росте у степах, на степових та кам'яних схилах. Поширений по всій території України (в Степу і Лісостепу – звичайно, на Поліссі – рідко), як бур'ян у посівах та уздовж залізничних колій. Вид досить поліморфний, тому в межах його виділяють ще низку внутрішньовидових таксонів, з яких для природної флори України вказані:

C. microcarpa var. *integerrima* Lindem – листки цілокраї, квітконіжки майже голі;

C. microcarpa var. *denticulata* Lindem – стеблові листки середнього ярусу зубчасті, квітконіжки коротковолосисті.

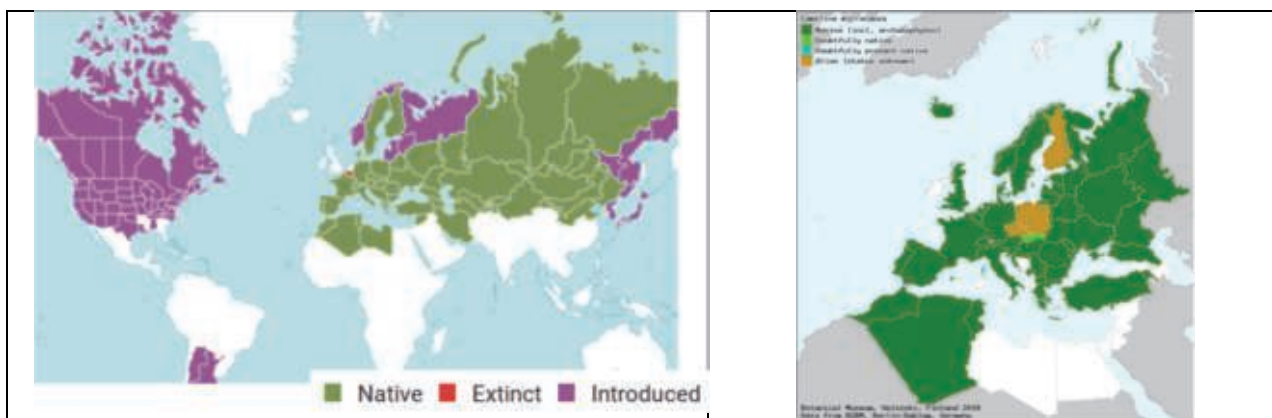


Рис. 1. 2. Ареал рижію дрібноплідного

<https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:279860-1>
https://euromed.luomus.fi/euromed_map.php?taxon=293099&size=medium

Рижій дрібноплідний одно- чи дворічна рослина. Озимі рослини перезимовують у стані розетки. Стебло 20-60 (80) см заввишки, просте або розгалужене на верхівці, густо облиствлене, у нижній частині сизувате, оскільки рясно опушене криючими трихомами – короткими галузистими та простими волосками. Прикореневі листки швидко засихають після запилення квіток. Стеблові листки – ланцетні або лінійно-ланцетні, сидячі, при основі стрілоподібні, (0,8) 1,5-5,5(7) см × 1-10(20) мм, краї цілі або, рідше, майже дрібнозубчасті, на верхівці загострені, дещо опушені. Суцвіття – видовжена китиця з косо догори спрямованими квітконіжками. Оцвітина подвійна: чашолистки 2-3,5 × 0,5-1 мм; пелюстки блідо-жовті, 2,5-3,5 × 1-2 мм, майже вдвічі довші за чашечку. Тичинкові нитки 1,5–3,0 мм завдовжки; пиляки 0,5 мм. Стручечки – від грушоподібних до вузьких, довгасті, дрібні, численні, 3,5-5(7) × 2-4(5) мм завширшки, у досить густих гронах, легко розкриваються зі стулками, що опуклі лише по середині і мають широкий плоский край, на верхівці – загострені. Насіння жовтувато-коричневого кольору, видовжено яйцеподібне 1-1,2(1,5) × 0,5-0,6 (0,7) мм, трохи стиснуте, поверхня дрібно-горбкувата. Квітує протягом травня-серпня.

У насінні міститься 23-36 % олії, йодне число 146,4. Олія придатна для виготовлення лаків та фарб.

3. **Рижій дикий** або **лісовий** (*Camelina sylvestris* Wallr. – наразі наводиться як синонім *C. microcarpa*). В окремих наукових публікаціях наводиться як *Camelina silvestris* L., що очевидно є помилкою у назві виду (Павленко та ін., 2012).

Природний ареал охоплює Південно-Східну Європу до Центральної та Північної Азії. В Україні росте на більшій частині України, переважно в степовій зоні, окрім Закарпаття, Карпат, Полісся і АР Крим, по степових схилах, як бур'ян на полях, уздовж доріг.

Рижій дикий – однорічник або дворічник. Озима рослина на початку свого розвитку утворює прикореневу розетку. Має сіро-зелене забарвлення. Стебло 20-60 см заввишки, просте або знизу розгалужене, цупке, вкрите простими, довгими, відстовбурченими та помірно розгалуженими короткими волосками. Прикореневі листки довгасті або довгастооберненояцеподібні, з черешком. Стеблові листки численні, ланцетні, сидячі, в основі – стрілоподібні з видовженими вушками. Чашолистки 2,0-2,5 мм завдовжки, видовжено-ланцетні. Пелюстки – ланцетні, вузькі, білувато-жовтуваті, 3-4 (5) мм завдовжки. Плоди – у пухкому гроні, короткогрушоподібні або майже кулясті 5-7 (8) мм завдовжки та 3,5-4,5 (5) мм завширшки. Стулки стручечків – грубі з широким пласким краєм, по центру мають тонке ребро. Плідоніжки 5-10 (15) мм завдовжки, відстовбурчені або майже горизонтально відхилені. Стовпчик 1,5-2,0 мм завдовжки. Насіння червоно-коричневе 1,2-1,5 мм завдовжки. Стулки плоду розтріскуються важче, ніж у рижію дрібноплідного. Квітують рослин протягом травня-липня.

Відрізняється від типового *C. microcarpa* більшими коротко-грушоподібними, майже округлими 5-7 мм завдовжки та 3,5-4,5 мм завширшки стручечками з грубими потовщеними плодоніжками 5-10 мм, рідкими китицями, а також характером опушення стебел.

4. **Рижій лляний, льоновий чи бурачковий** (*Camelina alyssum* Thell. = *Myagrum alyssum* Mill., *C. linicola* Schim. et Spenn.). Природне поширення – від Європи до Кавказу. Трапляється скрізь, де вирощують льон: Скандинавія, Середня Європа, головним чином у не Чорноземній смузі (рис. 1. 3).

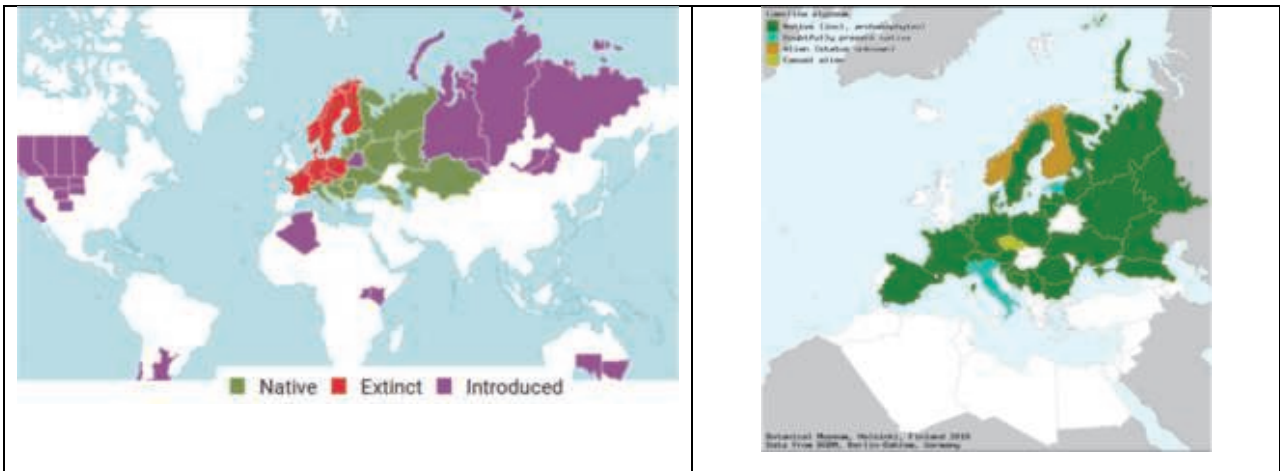


Рис. 1. 3. Ареали рижію лляного

<https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:279832-1#children>
https://euromed.luomus.fi/euromed_map.php?taxon=293854&size=medium

В Україні рослини даного виду трапляються зрідка як рудеральні у посівах льону переважно на Поліссі й у Лісостепу. Описані різновиди та підвид:

C. alyssum var. *integrifolia* Wallr. – листки цілокраї;

C. alyssum var. *dentata* Wallr. – листки зубчасті;

C. alyssum subsp. *sublinicola* Zing. – являє собою перехідну форму між рижієм голим та лляним. Розміром стручечків та насіння рослини близькі до *C. alyssum*, а опушенням – до *C. glabrata*;

C. alyssum var. *caucasica* – поширена на Кавказі;

C. alyssum var. *crepitans* Jarmolenko – стручечки горизонтально відхилені, розкриваються на самому початку достигання, пристосована до посівів льону низького (кудряша).

Рослина здебільшого не опушена, іноді вкрита дуже дрібними галузистими волосками, жовто-зелена. Яра. Стебло 30-80 (100) см заввишки, тонке, майже не розгалужене, листки лінійно-ланцетні, нечисленні, ніжні. Квітки в рідких, коротких гронах на квітконіжках 7-13 мм завдовжки, більших

як у *C. glabrata*. Чашолистки довгастоеліптичні 3-4 мм завдовжки і 5 мм завширшки. Пелюстки довгастоклиноподібні, мають заокруглену верхівку 5-6 мм завдовжки і 2 мм завширшки, блідо-жовті чи жовтуваті. Стручечки 9-13 мм завдовжки та 5-7 мм завширшки, кулясто-грушоподібні чи округлояйцеподібні, з притупленою верхівкою, дуже опуклими, тонкими, на початку розвитку – м'якими стулками, що легко здавлюються, на дуже відхилених, а при ніжних плодах навіть повислих плодоніжках. Стовпчик 1,5 мм завдовжки, насінина довгастояйцеподібна близько 2,5 мм завдовжки і 1,4 мм завширшки, дещо сплюснута, з виразно виступаючим корінцем, який прилягає до середини однієї з сім'ядоль, з поверхні дрібногорбкувата, жовтувато- або червонувато-бура. Однорічник. Квітує у червні-серпні.

Насіння р. лляного містить 41-36 % олії, йодне число – 142,9, число омилення – 188,1, число Генера – 94-59 і рефракція при 40° – 66,6.

Спроба ввести даний вид рослин у культуру поки що не мала успіху, але цілком можлива у північних областях.

5. **Рижій посівний** (*Camelina sativa* Crantz). Поліморфний вид, природний ареал якого простягається від Південно-Східної та Східної Європи до Далекого Сходу (рис. 1. 4).

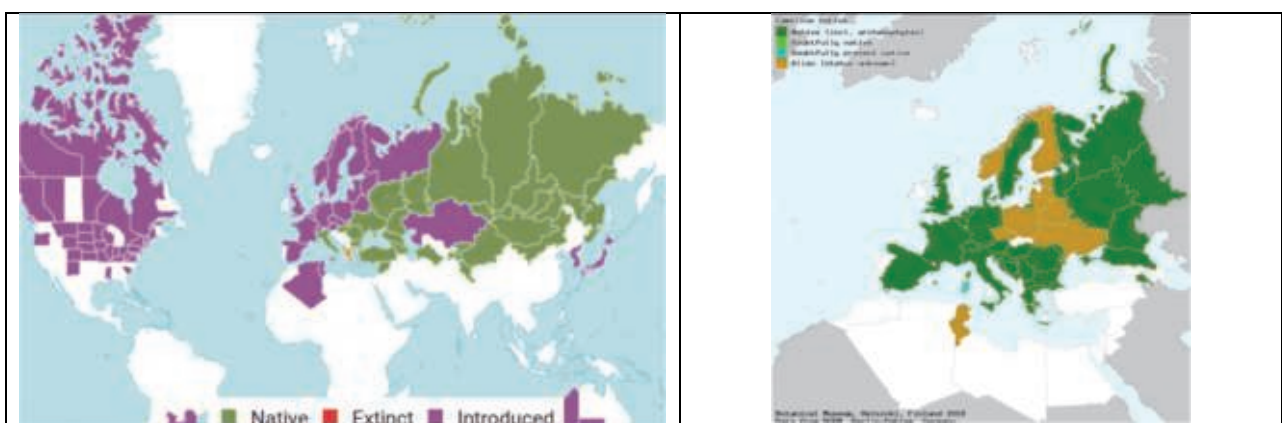


Рис. 1. 4. Ареали рижію посівного

<https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:279870-1#distributions>

https://euromed.luomus.fi/euromed_map.php?taxon=293863&size=medium

Однорічна трав'яна рослина заввишки 90-100 см, може мати голе чи опушене стебло з різним ступенем галуження. Листки на коротких черешках або сидячі, дрібні, ланцетної форми, цілокраї, або зубчаті. Суцвіття типу китиця утворене дрібними квітками, які мають жовтий (від насиченого до блілого) колір оцвітини. Насіння помаранчевого, червоно-коричневого кольору формується у плодах типу стручечок. Плоди мають обернено-яйцеподібну форму (Корнієвський та ін., 2017). Відрізняється від попередніх видів більшими стручечками 6-12 мм із сильно опуклими стулками.

Даному виду притаманні понад 30 синонімічних наукових назв, під якими і досі може траплятися інформація в літературних джерелах щодо цієї рослини. З народних назв у світі достатньо поширені: несправжній льон (false flax), золото насолоди (gold of pleasure), німецький кунжут (German sesame), сибірська олія (Siberian oilseed). В Україні дану рослину називають рижій, ллянка, рижик, низький льон, суріпиця, трава рудої (Camelina Oil ...; Рижій сійний...; Рижій (насіння) ...).

В Україні були описані як окремі таксони рижій голий і р. озимий або волосистий, які трапляються на даній території.

Рижій голий (*Camelina glabrata* (DC.) Fritsch = *C. sativa* (L.) Crantz).

Однорічні рослини. Стебла 30-80 см заввишки, прямі, злегка опушені короткими галузистими волосками (з домішкою простих, особливо у верхній частині) або майже голі. Листки сидячі, ланцетні, гострі, при основі стрілоподібні, цілокраї або невиразно зубчасті. Квітки – в коротких та видовжених гронах, на досить довгих 12-20 мм завдовжки квітконіжках, чашолистки довгасті, тупі, 2,5-3 мм завдовжки та 1 мм завширшки. Пелюстки клиноподібнодовгасті, на верхівці заокруглені 4-5 мм завдовжки, яскраво-жовті. Стручечки оберненояйцеподібні з круглою верхівкою, з дуже опуклими товстими стулками 7-9 мм завдовжки, на косу догори спрямованих квітконіжках, стовпчик 1,5-2 мм завдовжки. Насінина видовженояйцеподібна близько 2 мм

завдовжки і 1 мм завширшки, дрібногорбкувата, жовтувато-бура. Квітування протягом червня-серпня.

Рижій голий вирощують на полях, також трапляється як бур'ян, головним чином у Лісостепу і Степу, зрідка на Поліссі.

Загальне поширення: Скандинавія, Середня Європа, Північна Африка, Північна Америка.

У насінні міститься 27,4-49,0 % жирної олії, яка при холодному пресуванні – золотисто-жовтого кольору, а при гарячому пресуванні – зеленувато-коричнева або коричнево-жовта. Олія має специфічний гострий часниковий запах і смак, що залежить, за деякими даними, від домішки насіння талабану. Гіркота властива лише свіжій олії і з часом зникає. Олія належить до мало висихаючих. При 15°C олія сильно гусне, при 18-19°C застигає в масу подібну до вершкового масла. Олія складається переважно з гліцеридів пальмітинової та олеїнової кислот і одного ізомера лінолевої кислоти. Придатна для їжі, виготовлення оліфи та миловаріння.

У XX ст. рижій голий вирощували в культурі до північної межі Чорнозему (в Україні та деяких районах північної Європи).

Рижій озимий або волосистий (*C. pilosa* (DC.) Zinger, *C. sativa* subsp. *pilosa* (DC.) Zinger). Рослина опушена рясними відстовбурченими простими та дрібними галузистими волосками. Стебла – товсті, грубі, галузисті, прямо-стоячі, 30-100 см з великою кількістю щільно розміщених листків. Пелюстки золотисто-жовті близько 5 мм. Грона – при плодах – з нечисленними стручечками. Стручечки 7-12 мм завдовжки, 4,5-6 мм завширшки, багаточисельні, зближені, видовжено-грушоподібні, майже овальні, з опуклими здутими, грубими, темнуватими стулками, вузьким плескуватим краєм. Стовпчик у 4 рази коротший за стручечок. Насінина – довгастояйцеподібна, 1,2-1,8 мм завдовжки і близько 1 мм завширшки, дрібногорбкувата, жовто-коричнева. Квітування спостерігається протягом квітня-травня (червня).

Рослини даного виду поширені практично по всій Європі та на Кавказі. В Україні трапляється всюди, крім Полісся і полинового Степу. На півдні країни – рідше. Вирощують на полях, трапляється як бур'ян на узбіччях, на покладах корисних копалин.

Насіння містить 25-36 % олії, придатної для їжі, виготовлення фарб та мила. Макуха містить багато фосфатної кислоти, тож її можна використовувати як добриво. Зелена маса придатна на корм для овець.

Таким чином, на території України, згідно сучасних таксономічних переліків, у природній флорі трапляється 5 видів рижію: *Camelina rumelica*, *C. microcarpa*, *C. sylvestris*, *C. sativa*, *C. alyssum*. Зважаючи на їхню морфологічну внутрішньовидову неоднорідність статус окремих, раніше описаних видів потребує уточнення – шляхом вивчення морфологічних особливостей таксонів у культурі.

Історія культури рижію посівного (*Camelina sativa* Crantz), біохімічна складова та напрями практичного використання у світовій практиці. Рижій посівний є стародавньою важливою олійною культурою. Олію отримують із насіння. Відповідно до результатів археологічних розкопок встановлено, що *C. sativa* відома ще в епоху бронзи та в епоху заліза, і була – разом із льоном та зерновими – визначальним інгредієнтом у харчуванні людини. Насіння і стручечки були знайдені під час археологічних розкопок у Скандинавії та віднесені до бронзового віку (1800 р. до н. е.) (Berti et al., 2016). Це підтверджує думку, що *C. sativa* як культурна рослина потрапила до південної та центральної Скандинавії і Фінляндії саме у бронзову епоху. Вважається, що рижій вирощується як культурна олійна рослина з 4000 року до н.е. Відомо про вирощування *C. sativa* у регіоні долини Рейну в Німеччині – ще у 600 році до н.е. У середні віки *C. sativa* вирощували спорадично. Широко відома з XVI ст. як культурна рослина також у районах Середземномор'я і в Середній Європі. Практикували посіви рижію також у Середній Азії (Рева, Рева, 1976). У

Північній та Східній Європі (Франція, Бельгія, на Балканах) як олійну культуру вирощували та споживали до 1930-40-х років, коли на заміну прийшли більш доступні високоврожайні культури, зокрема ріпак та соняшник. До прикладу, попит на олію *C. sativa* в часи індустріальної епохи настільки упав у Швеції, що до 1929 року її виробництво було повністю припинено. Наразі *C. sativa* культивується широко в Канаді та США, спорадично – на півночі та сході Європи, в Ірландії, Фінляндії, Німеччині, Австрії, Україні, Польщі, Словенії, Італії, а також у Китаї (Gillespie et al.; Russo, 2011-12; Jarour, 2019; Government of ...; Piravi-vanak et al., 2022; Riaz et al., 2022; Артюх, 2018; Блюм, 2022).

В харчовий раціон давніх слов'ян рижей входив традиційно (Артюх, 2018). В широку культуру на теренах України був введений у другій половині XIX ст., до того часу його розглядали переважно як засмічувач у посівах (Мельничук та ін., 2012). На початку XX ст. рижей успішно вирощувався на територіях сучасних Полтавської, Чернігівської, Київської, Херсонської областей (Рева, Рева 1976). В Україні рижей залишався традиційною олійною культурою до середини XX сторіччя (Блюм, 2022).

Щодо походження р. посівного, то вважається, що це охоплює регіон Північної Європи та Південно-Східної Азії. Територію України на сьогодні визначають як осередок генетичного різноманіття та імовірного центру походження *C. sativa* (Glamkhar et al., 2010), адже посиленний поліморфізм окремих органів у зразках *C. sativa* з цього регіону вказує на значний ступінь генетичної варіації (Riaz et al., 2022). Це – на тлі всього іншого обмеженого генетичного різноманіття, хоча сучасна зародкова плазма містить достатню фенотипову різноманітність для забезпечення агрономічного прогресу (Zubr, 2003). Доведено, що врожайність насіння пов'язана з генотипом рослини (Gehring et al., 2006), а кількісний вміст олії у насінні є сильною спадковою ознакою (Vollmann et al., 1996).

Філогенія *C. sativa* результативно досліджена в останнє десятиліття. У 2014 році канадські вчені провели секвенування геному *C. sativa*. В результаті проведених досліджень вдалося встановити, що геном є гексаплоїдним, складається з трьох різних субгеномів, що робить його схожим за структурою з геномами ріпаку та пшениці. Субгеноми об'єднані через гібридизацію між невідомими батьківськими видами. Пізніше вчені Teresi Mandakova, Milan Pouch і Martin Lysak з дослідницької групи Martin Lysak із Central European Institute of Technology, Masaryk University (Брно, Чехія) розшифрували і встановили найближчих родичів *C. sativa* настільки глибоко, як до цього ніхто не робив. Унікальні результати їхнього дослідження опубліковані в журналі «Plant Cell» (2019 р.) та у розділі журналу «In Brief». Ученим вдалося реконструювати батьківські геноми *C. sativa* і прослідкувати історію еволюції гексаплоїдного геному, встановити механізми, які відповідають за нинішню форму геномів. Встановлено, що предковий і диплоїдний геном *C. sativa* були сформовані в результаті хромотрипсису, який у край рідко трапляється серед рослин (Jarour, 2019). Хромотрипсис як явище досліджений Philip Stephens разом із колегами та запроваджений як поняття і науковий термін у 2011 році (Stephens et al., 2011).

Унікальність відкриття чеських вчених дозволяє селекціонерам удосконалити цю давню і надзвичайно економічно важливу сільськогосподарську культуру. Адже на сьогодні селекція даної культури утруднена через низьке генетичне різноманіття, переважаюче самозапилення та втрату попередніх стійких форм і сортів.

На сьогодні рижій є популярною високоврожайною олійною культурою в усьому світі, оскільки олія має як харчове, так і промислове застосування. Рижій має багато позитивних якостей, які роблять його унікальним серед олійних культур, що є основною причиною, чому він викликає великий інтерес серед аграріїв. Важливою ознакою є хороші адаптивні якості куль-

тури: *C. sativa* добре пристосовується до різних умов навколишнього середовища, невибагливий до ґрунту і стійкий до несприятливих кліматичних умов та шкідників (зокрема, у порівнянні з ріпаком і гірчицею). Незважаючи на те, що врожайність насіння і вміст олії сильно змінюються залежно від умов вирощування, ці показники перевершують ріпак у випробуваннях за ідентичних умов посухи, що за сучасних умов змін клімату є надзвичайно важливим. Це у поєднанні з відносно низькими витратами робить *C. sativa* ідеальною культурою для використання на менш продуктивних землях та в районах без достатньої кількості опадів для підтримки інших культур. При виробництві у таких умовах *C. sativa* не витіснить культури, які використовуються для виробництва продуктів харчування, і позитивно вирішить дискусію про їжу як паливо, яка часто стає на заваді використанню рослинної олії для виробництва палива.

Окрім того, *Camelina* забезпечує високоякісні корми з достатнім вмістом залишкових ліпідів (5–10%), які мають білковий профіль, подібний до соєвого борошна. Це робить шрот *Camelina* ідеальним для додавання до раціонів домашньої птиці та іншої худоби (Murphy, 2016). Трава, плоди і насіння рижію також можуть бути цінним джерелом флавоноїдів (Павленко і др., 2012). Рижій вирощують на Поліссі та у Північному Лісостепу (Мельничук та ін., 2012), головним чином, для отримання олії заради освітлення, фарбування і харчових потреб. Сучасне виробництво рижієву олію використовує як для парфумерних потреб, так і в машинобудуванні. Існує також перспектива використання рижію для переробки його на біодизель.

З відновленням інтересу до *C. sativa* на початку 2000-х років цю рослину розглядали як джерело сировини для використання лише в біодизельній та косметичній галузях. Проте, в останні роки пріоритетною галуззю споживання *C. sativa* стала харчова промисловість. Такий інтерес викликаний насамперед компонентним складом олії, яка міститься у насінні

рослин, та висока його олійність. На сьогодні ці ознаки вирізняють *C. sativa* серед інших олійних культур і надають їй переваги у вирощуванні та використанні. Вміст олії у насінні коливається у межах 38-43 %. Олія має золотаво-рудий колір, їй притаманний легкий горіховий аромат і гірчичний післясмак. Вона характеризується багатим профілем поліненасичених жирних кислот, а макуха, яка залишається після екстракції олії, теж багата на високоцінні поживні сполуки (Matteo et al., 2023).

Насіння рижію містить біологічно цінні поліненасичені жирні олії, до складу яких входять органічні кислоти, вітаміни групи А, В, Е, К, макро- та мікроелементи (Насіння рижію ..., 2012; Рижій посівний ..., 2018; Користь насіння ..., 2020). Насіння містить від 25 до 50% висихаючої олії (йодне число 132–153), 28 % білка. Протягом століть цінний жирно-кислотний склад насіння *C. sativa* сприяв його використанню у народній медицині. Насіння рижію має антиоксидантні властивості, регулює обмін речовин організму, підвищує імунітет. Відвар насіння допомагає регулювати рівень цукру в крові та полегшує перебіг цукрового діабету, а також покращує загальний стан організму.

Олія містить 40% α -ліноленової кислоти ($18:3n-6$) омега-3 жирної кислоти, яка має важливе значення у раціоні людини. Високий вміст ненасичених жирних кислот (близько 90%) робить олію рижію швидковисихаючою, тому її можна використовувати для виготовлення полімерів, лаків, фарб, косметики і дерматологічних засобів. Загалом олія рижію завдяки своєму складу має багатогранне використання у різних галузях (Guendouz et al., 2015; Культура рижій ..., 2021; Рахметов та ін., 2021; Guendouz et al., 2022).

Понад 90% олії *C. sativa* складають ненасичені жирні кислоти, 64% поліненасичені, 30% мононенасичені і 6% – насичені жирні кислоти. Домінантою серед ненасичених жирних кислот є α -ліноленова кислота ($18:3n-3$) – 30-40%, лінолева кислота ($18:2n-6$) – 15-25%, олеїнова кислота – 15%, ейкозенова кислота – 15 %. Співвідношення α -ліноленової кислоти і лінолевої кислоти –

40 %:15 % додає унікальності олії *C. sativa*, на противагу іншим звичайним рослинним оліям, якими є соняшникова, ріпакова, оливкова, соєва. В олії також наявна гондоева кислота, що надає особливості *C. sativa*, оскільки роль цієї кислоти в організмі людини поки невідома. Вміст білку в насінні складає 27-32 %. Вміст токоферолу – близько 700 мг/кг, вітаміну Е (γ -токоферол) – близько 100 мг/100г. Токоферол наряду з іншими антиоксидантами визначає стійкість олії до окислення та згіркнення. Олія *C. sativa* вважається більш стійкою за перекисним числом, ніж соняшникова, кукурудзяна, кунжутна (Gillespie et al. ...). Макуха, яка залишається після відтиску олії, теж багата білком і незамінними n-3 і n-6 жирними кислотами (Ibrahim, El Habbasha, 2015).

Олія рижю має унікальні лікувальні властивості, обумовлені хімічним складом: бактерицидні, протипухлинні, ранозагоювальні, протизапальні та протиглисні. Наявність омега-3 і омега-6 кислот дозволяє очистити організм від солей, токсинів, радіонуклідів, важких металів. У народній медицині рижєву олію використовують для профілактики утворення каменів у нирках, при низькому гемоглобіні, для стабілізації кров'яного тиску, нормалізації рівня гормонів, холециститі, цирозі печінки, гепатитах, при жовчнокам'яній хворобі та гінекологічних захворюваннях. Олія рижю незамінна в лікуванні багатьох дерматологічних проблем: псоріазу, нейродерміту, діатезу, кропив'янці та ін. (Рижій посівний ..., 2018).

Олія здатна покращувати співвідношення n-6/n-3 жирних кислот у їжі. Альфа-ліноленова кислота (18:3n-3) служить субстратом для ейкозапентаєнової кислоти, докозагексаєнової кислоти і гормонів, які виконують важливі функції в організмі людини, зокрема для підтримки імунітету. Надзвичайно важливим для немовлят і дітей є збагачення їжі α -ліноленовою кислотою. Включення олії рижю в дитячий раціон видається перспективним заходом зміцнення здоров'я. Оздоровчий потенціал олії рижю завдяки високому вмісту α -ліноленової кислоти, токоферолів та інших антиоксидантів робить

олію рижію дуже привабливою з харчової точки зору (Steinke et al., 2000; Deng et al., 2001; Zubr, Matthaus, 2002; Ciorescu et al., 2007; Cais-Sokolinska et al., 2011; Faten et al., 2015). Також олія знижує рівень холестерину завдяки синергічній дії α -ліноленової кислоти і антиоксидантів (Ibrahim, El Habbasha, 2015).

Наявність омега-3 жирних кислот ставить в один ряд олію *C. sativa* з оліями тваринного походження – з морської риби як класичного джерела даних жирних кислот. Проте, так званий «риб`ячий жир» далеко не всім смакує та імponує за ароматом, а також має складніші виробничі моменти – добування, переробку, зберігання, тому *C. sativa* розглядається як нове джерело омега-3 олій (Belavneh et al., 2018). Олія і макуха є потенційними замінниками як «риб`ячого жиру», так і «риб`ячого борошна», які використовуються у кормах для аквакультури. Макуха містить значний рівень сирого білку – 38%, до складу якого входять метіонін і фенілаланін у значних кількостях (Hixson, Parrish, 2014). Зважаючи на суворий контроль встановлених квот по вилову риби – Total Allowable Catch (TAS), перспективи збільшення виробництва «риб`ячого жиру» дуже обмежені. Тому *C. sativa* виступає в ролі альтернативної сировини (Gillespie et al.).

На сьогодні є харчове і нехарчове використання олії *C. sativa*. Олію, а також макуху (шрот), розглядають як інгредієнт для функціональних харчових продуктів, додають до рецептур кормів для тварин, використовують у косметологічній та лікувальній продукції, а також для біопалива й агрохімікатів. Наразі є заклики до збільшення дослідницьких робіт саме з питання використання олії *C. sativa* в продуктах, зокрема функціональних харчових та нутрицевтиках, у косметичі і фармації (Mondor, Hernandez-Alvarez, 2021).

У липні 2008 році Комісія ЄС прийняла постанову – EU Commission issued a directive, яка дозволила використання *C. sativa* та її похідних у кормах. Попередньо макуха (*Camelina sativa cake* (CSC)) як кормова добавка не була схвалена у ЄС. Регламентовано, що кількість загальних глюкозинолатів у

кормах не становить загрози для тварин і не є загрозою для здоров'я людини. Додатково у вересні 2008 року Division of Animal Nutrition of the Food and Drug Administration (FDA) надали роз'яснення щодо обмеженого використання макухи CS як комерційного кормового інгредієнта (Aronen et al., 2009).

У 2010 році Міністерством охорони здоров'я Канади ухвалено рішення про використання нерафінованої олії *C. sativa* холодного віджиму як харчового інгредієнта у державі (Ibrahim, El Habbasha, 2015). Вміст ерукової кислоти в олії *C. sativa* зазвичай нижчий за допустимий максимальний рівень – 5 %, тому згідно вимог регуляторної постанови B.09.022 (Канада) це дає можливість використання даної олії в харчових продуктах (Justice Laws ..., 2022). Метод холодного віджиму забезпечує в кінцевому продукті незначну кількість білка (< 300 мг білка/100г олії). Наявність інгібіторів трипсину незначна і не становить загрози у перетравленні білків. Невелика кількість глюकोзинолатів, які мають токсичні властивості в результаті можливого перетворення на ізотіоціанати та інші сполуки і негативно діють на функцію щитоподібної залози, загрози не становить. Алергічних реакцій у людей від споживання олії *C. sativa* не зафіксовано. Тобто токсикологічна оцінка, проведена канадськими спеціалістами, показала відсутність перепон для споживання олії *C. sativa*. Олія придатна до використання в кулінарії як заправка до салатів, а також у спредах і маргаринах (Government of ...; Maršalkienė et al., 2020).

У 2016 році олія з насіння *C. sativa* отримала статус загально визнаної безпечності – Generally Recognized as Safe (GRAS) – від управління, яке займається контролем продуктів та лікарських препаратів – United States Food and Drug Administration (FDA) (GRN642, 2016) (Belavneh et al., 2018).

Олія з насіння *C. sativa* завдяки жирно-кислотному складу є альтернативою лляній олії та риб'ячому жиру. Олія рижію має високий вміст омега-3 жирних кислот. Макуха – джерело вітамінів B₁, B₃, B₅, вона домінує серед

вітамінів B₃. Цікаво, що вміст вітаміну B₁ в олії *C. sativa* разюче вищий (18 мкг/г), ніж у льоні (6 мкг/г) та ріпаку (8 мкг/г); вміст B₃ (194 мкг/г) перевищує ніж удвічі вміст у лляному насінні (91 мкг/г); вміст B₅ такий самий як і в показника льону – 11 мкг/г і нижчий, ніж у ріпака (16 мкг/г). Також макуха містить макро- та мікроелементи: 1,0-1,6% припадає на Ca, K, P; високий вміст Fe – 329, Mn – 40, Zn – 69 мкг/г (Ibrahim, El Habbasha, 2015).

Завдяки тому, що олія має чудовий аромат, смак, тривалий період зберігання, витримує нагрівання до 245°C, не втрачаючи корисних властивостей, на сьогодні вона є популярним інгредієнтом у кулінарії, зокрема у палео-кулінарії (неандертальській дієті) та веганській. Наприклад, шведська компанія «Camelina of Sweden» на початку зимового періоду 2015/16 років налагодила випуск «Camelina Oil». Супроводжує продукцію всіма необхідними сертифікатами, здійснює продаж через мережу, мінімальна ємність – 1 кг за майже 25 євро (Scratton ...). Підприємство у Канаді «Oliméga» пропонує «Signé Caméline» як унікальний продукт, смак якого поєднує нотки лісового горіха, кунжуту і трав та рекомендує до використання в сирому вигляді чи у рецептах випічки (Oliméga ...).

Із подрібненого насіння або макухи *C. sativa* можна отримати борошно, яке придатне для використання у хлібопекарській справі. Як інгредієнт воно сприяє травленню. Єгипетські вчені встановили, що борошно містить у своєму складі 13 % залишків олії, 6 % золи, 12 % сирої клітковини, 30 % сирого протеїну, 27 % безазотистих речовин та ін. Вміст білку складає 30-35 % сухої речовини і переважна частина – це запасні білки насіння (60 і 20 % від загального білку в достиглому насінні). Наявні вуглеводи включають моно-, ди-, оліго-, полісахариди і клітковину (Ibrahim, El Habbasha, 2015). Наявність омега-3 жирних кислот сприяють збагаченню хліба (Gillespie et al. ...). З огляду на той факт, що функціональне харчування стає все більш популярним у світі, асортимент продуктів із фізіологічно функціональними інгредієнтами

потребує розширення. Функціональність харчових продуктів визначається біологічними та фармакологічними властивостями інгредієнтів, що входять до їхнього складу. Завдяки цьому вони мають здатність позитивно впливати на певні функції організму людини.

Одним із функціональних продуктів, досить різноманітних, сьогодні є хліб і хлібобулочні вироби. В Україні виробляється понад 100 найменувань різних сортів хліба. Використання при їх виготовленні рецептурних інгредієнтів, отриманих із сировини рослинного походження, збагаченої біологічно активною речовиною (БАР), покращує кулінарні якості, харчову цінність хліба, забезпечує його лікувально-профілактичну спрямованість (Лебеде́нко та ін., 2013; Методи аналізу..., 2017).

Олія *C. sativa* є цілком прийнятною сировиною для виробництва косметичної продукції – кремів, лосьйонів, бальзамів, помади, брускового мила (Sampath, 2009). Вона добре зволожує, захищає та заспокоює шкіру людини, є ефективним засобом у боротьбі з почервонінням і запаленням шкіри, для покращення стану волосся. Може використовуватися як базова олія для розведення натуральних ефірних олій, також як додаток до натуральних солей для ванн, до мила та масажних олій (Camelina oil ...; Organic Camelina ...). Встановлено, що олія має підвищену трансдермальну дифузію, завдяки чому може бути «транспортним засобом» для олій рослинного походження (Савіна та ін., 2021).

Розширюється і набирає обертів технічне використання *C. sativa*. На сьогодні відомо, що авіаційне біопаливо уже використовується на більш ніж 1500 комерційних рейсах. Біопаливо отримують шляхом купажування: звичайне пальне для реактивних двигунів змішують із 50 % біопалива, яке отримане із *C. sativa*, відпрацьованої рослинної олії та водоростей (Gillespie et al. ...). Також підвищився інтерес фермерів до рижію як до олійної культури, для виробництва біодизеля в США та в інших країнах світу, а також

в Україні (Яковлева-Носарь та ін., 2015; Шевченко та ін., 2017; Демидась та ін., 2011; Цикало та ін., 2019).

Одним з найважливіших напрямків використання рижію є енергетична галузь (Agarwal et al., 2010; Ciubota-Rosie et al., 2013; Dobre et al., 2011; Karcauskiene et al., 2014; Frohlich et al., 2005; Krohn et al., 2012; Moser et al., 2010; Singh et al., 2014).

Взагалі, завдяки компонентному складу, олія *C. sativa* має широкий спектр використання, починаючи з харчових продуктів, косметичних засобів, тваринних кормів, і закінчуючи біопаливом (Frame et al., 2005; Russo, 2015; Guendouz et al., 2022).

C. sativa вважається надзвичайно адаптивною культурою. Рослина має можливості для вирощування в озимих та ярих посівах і характеризується найкоротшим вегетаційним періодом. Як рослина, маловибаглива до родючості ґрунту, рижію може вирощуватися на низькородючих маргінальних ґрунтах (Очеретна, Фролова, 2020; Рахметов, 2011; Alberghini et al., 2022). Також для її вирощування придатні різні водно-кліматичні, ґрунтові та орографічні умови – від суворих помірно бореальних зон до критично посушливих тропічних. Культура високосумісна з існуючими методами ведення сільського господарства. *C. sativa* має короткий цикл вирощування. Вирізняється кращою стійкістю до весняних заморозків та посухи порівняно з ріпаком. Має хорошу конкурентну спроможність проти бур'янів. Зазвичай не рекомендується вирощувати на одному місці частіше, ніж один раз на 3-4 роки. Затрати на вирощування є низькими, оскільки рослини потребують мало води, добрив та пестицидів – у порівнянні з іншими олійними культурами, такими як соняшник, соя чи ріпак. *C. sativa* стійка до хвороб: альтернаріозу, чорної ніжки хрестоцвітих, окремі генотипи виявляють стійкість до склеротиніозної гнилі стебла, бурої оперізуючої кореневої гнилі, пероноспорозу. Проте рослини *C. sativa* чутливі до кили, білої іржі та хвороби

айстри жовтої. З огляду на позитивні характеристики культури відмічений ріст її посівів у Північній Америці та Європі (Sequin-Swartz et al., 2009; Ibrahim, El Habbasha, 2015; Piravi-vanak et al., 2022; Matteo et al., 2023).

Встановлено, що хімічний склад і врожайність насіння змінюються залежно від періоду вирощування, генотипу посівного матеріалу, умов навколишнього середовища (температурний показник і вологість), використаних агротехнічних прийомів вирощування (строк сівби, стан ґрунту, використання добрив, гербіцидів, зрошення тощо) (Riaz et al., 2022). Значну роль відіграють кліматичні фактори, які впливають на продуктивність *C. sativa* – кількість поліненасичених жирних кислот, загальний вміст олії та білку в насінні. Виявлено, що у холодному кліматі відсоток виходу ненасичених жирних кислот вищий. Таким чином, можливе вирощування цієї рослини як у холодних провінціях – для харчових цілей, так і в тропічних провінціях – для промислових цілей (Hunsaker, 2013; Kahrizi. Et al., 2015; Raziei et al. 2018).

В Україні *C. sativa* культивується переважно у північній частині Лівобережного Лісостепу та Поліссі. Загальна площа посівів складає 5-6 тис. га, що становить 3% всіх олійних рослин. Часто використовують як проміжну та післяжнивну культуру. Добре росте на всіх типах вітчизняних ґрунтів, окрім важких глинистих; витримує весняні приморозки, стійкий до посухи, шкідників і хвороб. Найкращими попередниками вважаються озимі і ранні ярі зернові, а також картопля, льон, кукурудза, цукрові буряки, овочі та баштанні культури. Сіють як широкорядним, так і суцільним способом. Середній урожайність насіння *C. sativa* в Україні складає 1,0-1,5 т/га (Рижій. ТОВ «Камруд-Агро», *електрон. ресурс*). Наприклад, урожайність *C. sativa* у Канаді в середньому становить 1,2-1,5 т/га, (за норми висіву 600 насінин на 1 м² показник зростає до 1,59 т/га); у Німеччині – 1,15-1,60 т/га; у Франції – 2,3-3,0 т/га (Ibrahim, El Habbasha, 2015). Вважається, що вміст сухої речовини та вміст олії у рослині переважно залежать від кількості днів після цвітіння

(Pollard et al., 2015), також це стосується і вмісту білку та олії в насінні (Rodriguez-Rodriguez et al., 2013).

У літературі трапляються відомості про сорти *C. sativa*: Lindo, Soledo, Bavaria, Ukrainian, Volynska, Zarya Socialisma (Riaz et al., 2022), Soheil (Piravivanak et al., 2022); Степовий 1, Міраж, Гірський, Клондайк, Престиж, Славутич, Зевс, Перемога, Євро 12 (Опис та ... Вітчизняні сорти., *electron. res.*). У Державному реєстрі сортів рослин України на тепер представлено 8 сортів, які рекомендовано для вирощування у різних кліматичних зонах, серед них 2 сорти (Перемога та Євро-12) створені у Національному ботанічному саду імені М. М. Гришка НАН України (Державний реєстр ..., 2025). Але сьогодні є велика потреба у цільових сортах із підвищеною продуктивністю насіння, високим виходом олії та якісними характеристиками жирних кислот, що визначає основні напрями їх використання.

Підсумовуючи результати літературного скринінгу, стає очевидним необхідність розробки інноваційних біотехнологій підвищення урожайності насіння, вмісту олії та її якісних характеристик у рослин роду *Camelina*. Наразі в Україні рідко відомий із давніх часів, але досі лишається малопоширеною культурою. Одним із стримуючих чинників була відсутність високоадаптивних продуктивних сортів для різнопланового використання. У цьому плані в НБС імені М.М. Гришка НАН України створено унікальні за якісним та кількісним складом колекції корисних рослин з різних ботаніко-географічних регіонів світу, які включають понад 2000 таксонів (Колекційний фонд ..., 2020). Серед цього колекційного фонду генотипова колекція *Camelina sativa* нараховує близько 35 зразків. Ця колекція є особливо цінною з погляду збереження різноманітності рослин *ex situ*, створення нових форм та сортів рослин, всебічні дослідження біологічних, екологічних особливостей рослин, використання фітосировини для виробництва різних харчових продуктів, технічних та лікарських фітозасобів.

Тому актуальним є впровадження у сільськогосподарське виробництво нетрадиційних і нових високопродуктивних олійних рослин, здатних не лише конкурувати з ріпаком, але навіть переважати його за важливими характеристиками – як джерела якісної харчової і технічної олії. До таких перспективних олійних культур відносяться рижій посівний та гірчиця ефіопська.

Наразі, ці завдання відповідають і необхідності забезпечення належного рівня біологічної безпеки у рослинництві та збереження родючості ґрунтів за вирощування зазначених культур. Введення в широку культуру нових або стародавніх, малопоширених або забутих олійних рослин із виключними позитивними якісними властивостями є надзвичайно важливою задачею сьогодення. Одночасно існує велика потреба у розробці супутніх технологій застосування різноманітних екологічно безпечних органічних сполук і природних мінералів як для рекультивації порушених ґрунтів, так і для підвищення урожайності досліджуваних культур, у тому числі – для підвищення їхньої олійності.

РОЗДІЛ 2.

***BRASSICA CARINATA* A. BRAUN (ГІРЧИЦЯ ЕФІОПСЬКА АБО КАПУСТА КІЛЬОПОДІБНА) – НОВА ДЛЯ УКРАЇНИ ОЛІЙНА РОСЛИНА**

Сьогодні набули актуальності питання створення нових культур та сортів рослин, адаптованих до мінливих кліматичних умов. Виведення цих рослин дозволить вирішити такі питання, як забезпечення людства збалансованими продуктами харчування, технічними, енергетичними та лікарськими засобами, а тваринництва – високоякісними кормами. Тому вирішення цих завдань, зокрема в Україні, є однією з основних складових поліпшення якості життя завдяки задоволенню базових потреб людини, її здоров'я та екологічного добробуту країни. У зв'язку з цим необхідно розробити нові біологічні заходи, аби агроландшафти не лише забезпечували людину потрібною чистою продукцією, але й сприяли регенерації води і повітря, підтримці здоров'я населення. Використання нових культур як сировини для харчових продуктів, лікарських фітозасобів, біопалив та фітодобрих має важливе екологічне й економічне значення (Біологічні..., 2024).

Великого значення набуває вивчення інтродукційних ресурсів та мобілізація нових для регіону видів з високою нормою реакції до посухи, холоду і морозу, а також як цінних рослин, спроможних забезпечувати високу продуктивність та імунність.

Колекційний фонд енергетичних і ароматичних рослин НБС імені М. М. Гришка НАН України як науковий об'єкт Національного надбання має важливе наукове, практичне, соціальне та просвітницьке значення. Він слугує базою для відбору нових високопродуктивних культур і створення сортів корисних рослин для розширення різноманіття біологічних ресурсів та

покращення продовольчої, біологічної і енергетичної безпеки (Біологічні..., 2024; Фундаментальні ..., 2024).

Період війни вимагає швидких та рішучих дій, підпорядкованих єдиній меті – відсічі збройної агресії. Поряд із відстоюванням територіальної цілісності, Україна стоїть перед проблемою забезпечення власної продовольчої, енергетичної та біологічної безпеки. Відомо, що олія є цінним продуктом харчування, джерелом для виробництва різних лікарських фітозасобів, мастильно-паливних і лакофарбових матеріалів тощо. Україна традиційно зорієнтована на виробництво та експорт олії та олійної продукції. У зв'язку з цим важливе наукове і практичне значення має мобілізація, підбір та введення в культуру нових, нетрадиційних, малопоширених високопродуктивних олійних рослин з метою розширення сортаменту рослинних олій та диверсифікація вирощуваних культур в Україні.

Зокрема, гірчиця ефіопська – екологічно пластична, високопродуктивна рослина з винятковим якісним жирнокислотним складом олії, яка має поліфункціональне значення, що забезпечує високі врожаї на маргінальних ґрунтах. Гірчиця ефіопська розглядається вперше як нова олійна рослина в Україні, здатна забезпечити високу урожайність і стійкість. Вона є перспективною для виробництва технічних олій для військової промисловості, а також авіаційного біопалива.

Brassica carinata також має ряд переваг у порівнянні з ріпаком, зокрема – має вищий вміст олії, акумулює більше біомаси під час вегетації, здатна інтенсивніше пригнічувати ріст бур'янів і має більш розвинену кореневу систему, що дозволяє використовувати її в тому числі – для фіторемедіації (Marillia et al., 2014; Рахметов та ін. 2024). Наразі культивування *B. carinata* як нової олійної культури широко вивчається різними дослідниками (Seerpaul et al., 2021a), в тому числі розглядається можливість створення озимих генотипів зі значно вищою врожайністю (Seerpaul et al., 2021a, b).

Родина Brassicaceae є однією із найпоширеніших груп рослин, представники якої здавна культивуються і до тепер мають важливе економічне та господарське значення (Raza et al., 2020; Vergun et al., 2017). Серед різноманіття відомих і широкоживаних культур цієї родини особливої уваги заслуговує *Brassica carinata* A. Braun як високопродуктивна олійна, цінна харчова, лікарська, кормова, медоносна культура (Hagos et al., 2024).

Brassica carinata широко відома як абіссинська капуста, абіссинська гірчиця, африканська капуста, ефіопська капуста, ефіопська гірчиця, ефіопський ріпак, гірчична капуста, гірчиця коллар, chou Éthiopien, moutardd'Abyssinie (USDAARS, 2014).

Brassica carinata утворилася внаслідок міжвидової гібридизації між *Brassica nigra* та *Brassica oleracea* (Gómez-Campo, 1999; Warwick et al., 2006). Як гібридогенний вид геном включає батьківські види. *Brassica carinata* є амфіплоїдним видом (BBCC, $2n = 34$; Prakash et al., 2011). Геном *Brassica* походить від *Brassica nigra* (BB, $2n = 16$), а геном *Carinata* – з *Brassica oleracea* (CC, $2n = 18$; Prakash et al., 2011). Трикутник U (U 1935) описує тісний генетичний зв'язок між амфідиплоїдними видами *B. carinata*, *B. juncea* та *B. napus* та диплоїдними видами *B. nigra*, *B. rapa* та *B. oleracea*.

Таксономічне положення рослин *Brassica carinata* (USDAARS, 2014):

Царство: Plantae (рослини)

Підцарство: Tracheobinta (судинні рослини)

Супервідділ: Spermatophyta (насіннєві рослини)

Відділ: Magnoliophyta (квіткові рослини)

Клас: Magnoliopsida (дводольні)

Підклас: Dilleniidae

Порядок: Carpparales

Родина: Brassicaceae

Триба: Brassiceae

Під: Brassica L.

Вид: Brassica carinata A. Braun

Однією з найпоширеніших гіпотез сьогодення щодо батьківщини походження виду рослин *B. carinata* є високогірне плато Ефіопії та прилеглі частини Східної Африки і Середземноморського узбережжя. (Seerauletal., 2021). Підтвердженням цієї гіпотези є те, що батьківські види, були досить поширеними у вище згаданих регіонах у період, коли, як вважається і з'явилася *B. carinata* (Alemayehueta., 2002).

Вважається, що вирощування *B. carinata* почалося в 4-5 тисячолітті до нашої ери у Північно-Східній Африці на території сучасної Ефіопії, Судану та Еритреї, а згодом ареал збільшився до прилеглих регіонів, таких як Східна тропічна Африка (Кенія, Танзанія та Уганда), Західна і Центральна тропічна Африка (Камерун та Демократична Республіка Конго), Західна тропічна Африка (Кот-д'Івуар), Південна тропічна Африка (Мозамбік, Малаві, Замбія та Зімбабве), Південна Африка (Ботсвана), Західна частина Індійського океану (Мадагаскар) та Південно-Західна Азія (Саудівська Аравія та Ємен) (Simmonds, 1979; Warwick et al., 2009; Delesa, 2006).

Інтерес до вирощування *B. carinata* у світі в умовах недостатнього зволоження зріс у середині 1980-х років. Рослина високо цінується як потенційна альтернатива існуючим олійним культурам.

Завдяки можливостям використання сировини рослин *B. carinata* в різних перспективних та інноваційних галузях промисловості як культури з низьким рівнем непрямих змін у землекористуванні або взагалі без них, спостерігається зростаюча тенденція її вирощування у різних частинах світу (Campbell et al., 2023; Ambaw et al., 2024).

Так, *B. carinata* активно культивується на своїй батьківщині – в країнах Африки, а саме у Ботсвані, Камеруні, Кот-д'Івуарі, Мадагаскарі, Малаві, Мозамбіку, Судані, Демократичній Республіці Конго, Замбії та Зімбабве

(Marillia et al., 2014; Tesfaye et al., 2023). Також рослина інтродукована в Азії, Індії та Пакистані, де активно культивується (Chauhan et al., 2011; Lal et al., 2013; Zada et al., 2013).

На теренах Європи *B. carinata* теж знайшла своє місце і культивується у Великобританії, Греції, Італії та Іспанії (Font et al., 2004; Namatov et al., 2000; Cardone et al., 2003; Alcántara et al., 2011) (рис. 2. 1).

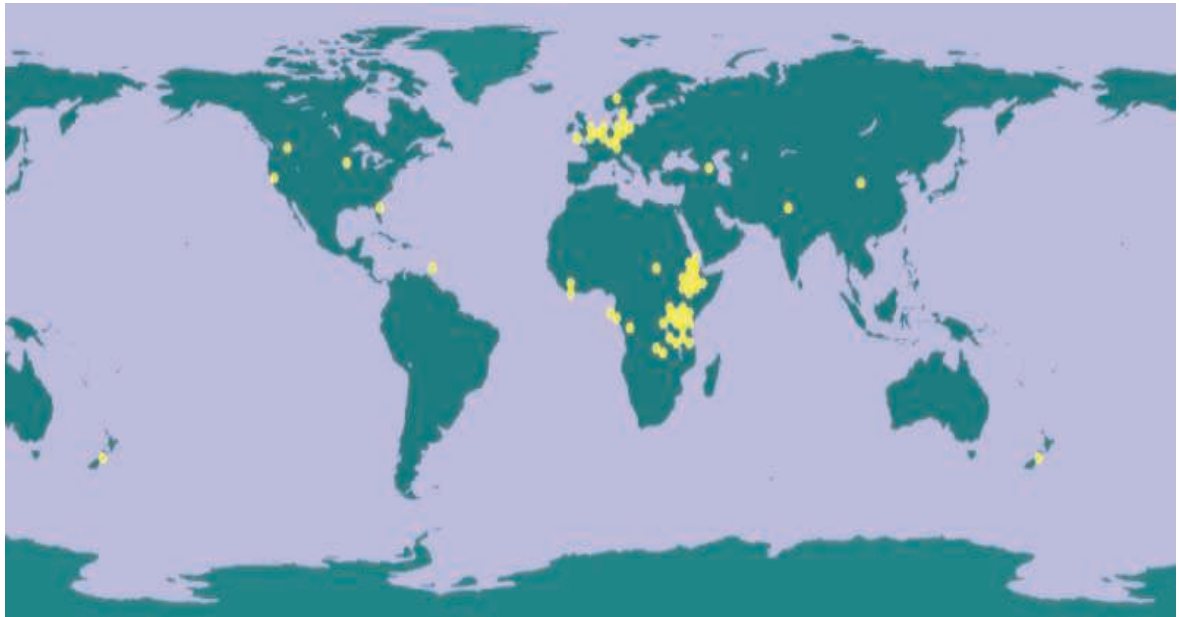


Рис. 2. 1. Походження та поширення рослин *Brassica carinata*

У Північній Америці рослини *B. carinata* активно вирощується в Канаді (Саскачеван, Манітоба, Альберта) у США (Монтана, Північна та Південна Дакота, Вайомінг, Небраска, Канзас, Оклахома, Техас, Луїзіана, Міссісіпі, Алабама, Джорджія, Флорида) (Kumar et al., 2020). Також значні експериментальні посіви рослин *B. carinata* наявні на території Південної Америки – Чилі та Уругвай (Seerpaul et al., 2016).

Також, *B. carinata* знайшла своє місце і досить активно культивується в Австралії (Khangura et al., 2006).

Природний ареал – Африка (Саудівська Аравія, Ємен, Ефіопія, Еритрея, Кенія, Руанда, Уганда і Танзанія).

Попри це, вирощування у великих обсягах залишається переважно обмеженим рідною Ефіопією та сусідніми країнами. Традиційно на своїй

батьківщині *B. carinata* використовується як листовий овоч, що забезпечує людський раціон необхідними мікроелементами (Chadha et al., 2006). Молоді ніжні листки споживають у сирому вигляді, а старіші – разом зі стеблами – відварюють до розм'яккання і їдять як капусту. Також в Африці *B. carinata* іноді вирощують як олійну культуру. Олію використовують для приготування їжі, як пальне для освітлення та в традиційній медицині (Prakash et al., 2011).

Загалом в інших частинах світу *B. carinata* використовується як низьковуглецева нехарчова олійна сировина для виробництва сучасних відновлюваних видів палива, шроту з високим вмістом білку для годівлі тварин та виготовлення біопродуктів (Licata et al., 2024). Це зумовлено, в тому числі, високою економічною ефективністю такого використання, адже після виокремлення з рослини олії існує можливість подальшого використання зеленої маси на інші потреби, в тому числі перетворення її целюлозної біомаси на цінні хімічні продукти, зокрема органічні кислоти. Згідно сучасних досліджень шрот, що залишається після отримання олії, може бути використаним для виробництва пропіонової кислоти. Ця кислота на біологічній основі може слугувати відновлюваною сировиною для промислових хімікатів і консервантів, замінюючи продукти на основі викопного палива (Ammar et al., 2021).

Рослина має важливі агрономічні особливості, що дозволяють вирощувати її як озиму культуру у вологих субтропічних регіонах, або як яру культуру – у вологому континентальному кліматі. Рослина *B. carinata* жаростійка, стійка до хвороб та осипання насіння, а також є невибагливою до нестачі води, на відміну від інших близьких родичів (Raman et al., 2017).

Тривалість дозрівання культури становить від 154 до 165 діб. Врожайність насіння у перший рік вирощування рослин є вищою і становить від 2,8 тони га до 3,4 тони га. На другий рік вегетації, на повторних посівах, урожайність зменшується на 29 % (Seerpaul et al., 2021; Kumar et al., 2020).

Для поширення культури на великі та менш сприятливі території необхідно адаптовані сорти, які є морозостійкими, скоростиглими, ефективно використовують поживні речовини, мають високу врожайність із бажаним вмістом олії та жирних кислот (Kumar et al., 2020; Mulvaney et al., 2019).

Так, дослідження Mahesh Bashyal щодо накопичення та розподілу поживних речовин, залежно від періоду розвитку рослин і географічної широти, проводилися на чотирьох ділянках у Джеї (штат Флорида) та Солсбері (штат Північна Кароліна) протягом двох років. У ході досліджень були визначені показники біомаси і накопичення поживних речовин на різних стадіях росту. У Флориді для формування врожайності 1635 кг/га насіння та 10 872 кг/га біомаси необхідно було використовувати N – 169 кг, P – 22 кг, K – 160 кг, S – 58 кг, Zn – 475 г, B – 218 г. У Північній Кароліні за врожайності 2428 кг/га насіння і 9102 кг/га біомаси винос становив N – 178 кг, P – 26 кг, K – 87 кг, S – 24 кг, Zn – 416 г, B – 127 г. Елементи з високими індексами врожаю включали P, N, S та Mg. Ефективність використання N, P і K становила 16,83 та 8 кг насіння на кілограм спожитих поживних речовин відповідно. Отже, результати демонструють тимчасове накопичення і розподіл поживних речовин у *B. carinata*. Вони є критично важливими для вдосконалення стратегій управління поживними речовинами (Bashyal et al., 2023).

Також Paul Cockson вивчав вплив поживних речовин, зокрема мікроелементів, на ріст та розвиток рослини у різних фазах, а саме: вегетації, бутонізації, квітування і плодоношення. Рослини вирощували за різних концентрацій мікроелементів (0, 25, 50, 75, 87,5 і 100%) модифікованого розчину Хогланда. Результати показали, що внесення мікроелементів має значний вплив на продуктивність *Brassica carinata* на різних життєвих стадіях. Внесення бору (B) мало найбільший вплив на ріст і розмноження. Оптимальні відносні концентрації елементів у тканинах листків змінювалися залежно від концентрації мікроелементів та стадій розвитку. У різні періоди розвитку

спостерігалися певні закономірності накопичення поживних речовин у тканинах листків, незважаючи на збільшення концентрації мінеральних елементів, таких як В (47,2-50,0 мг-кг), Cu – фаза вегетації (6,62-7,57 мг-кг), Zn – фаза вегетації (27,47-39,87) і квітування (33,98-43,50 мг-кг), Мо – фаза квітування (2,42-3,23 мг-кг) та Мп – фаза бутонізації (117,03-161,63 мг-кг). Таким чином, *Brassica carinata* має різні вимоги до родючості ґрунту і накопичує різні концентрації мінеральних елементів у тканинах листкової пластинки на різних етапах свого розвитку (Cockson et al., 2021).

В іншому дослідженні було оцінено вплив норм азоту на показники поглинання поживних речовин, біомаси, врожайності насіння та хімічного складу. Максимальна врожайність насіння досягалася при нормі 134 кг/га азоту. Вміст білку та глюкозинолатів у насінні знижувалися при внесенні норм азоту до 90 кг/га і зростала за більших норм, тоді як вміст олії, навпаки, збільшувався.

Час і спосіб внесення азоту значно впливали на врожайність, а накопичення сухої речовини лінійно зростало. Цей показник збільшувався на 35 % при 90 кг/га і на 82 % – при 134 кг/га азоту порівняно з контролем (Bashyal et al., 2021).

Ще одне дослідження мало на меті виявити вплив високо температурного стресу на рослину. В результаті досліджень було виявлено, що високі температури мали суттєвий вплив на ріст і розвиток рослин, зумовлюючи зниження рівня ненасиченості мембранних ліпідів. Ці адаптаційні механізми підтримують плинність мембран і можуть слугувати основою для створення стійких до високих температур сортів рослин, що дозволить ефективніше вирощувати рослини у регіонах зі спекотним кліматом (Zoong Lwe et al., 2021).

Насіння *B. carinata* містить від 18,7 до 28,3 % білку та 42–52 % олії з добре розподіленим профілем жирних кислот. Загалом у різних зразках олії було ідентифіковано 16 жирних кислот. Ерукова кислота (41–43 %) складає основний компонент жирних кислот, за якою слідує лінолева, ліноленова та олеїнова кислоти (Kumar et al., 2020). *B. carinata* демонструє бажаний

профіль олії, широку адаптивність і продуктивність за неоптимальних умов (Blackshaw et al., 2011; Gesch et al., 2019).

Протягом життєвого періоду в рослин спостерігається зміна хімічного складу: зростає вміст олії та мононенасичених жирних кислот, тоді як вміст білку, глюकोзинолатів і поліненасичених жирних кислот зменшується (Seepaul et al., 2021).

Результати досліджень інших авторів також підтверджують, що вміст олії в насінні є досить високим та становить від 35,93 до 45,25%. Склад олії насіння варіюється за вмістом жирних кислот залежно від сорту і умов вирощування, але зазвичай містить 35–44 % ерукової, 15–22 % лінолевої, 16–20 % ліноленової, 10–12% олеїнової, 7–9 % ейкозенової, 2–4 % пальмітинової кислоти (Mulvaney, 2019). Також олія містить високий рівень неомильних речовин та низькі значення первинних і вторинних продуктів окислення, які не перевищували регламентовані межі (Mohdaly et al., 2022).

Окрім цього рослини мають низький вміст кисню (7,80%) і киснево-вуглецеве співвідношення (0,07), що зменшує потребу у водні при гідродезоксигенації. Metали, гетероатоми (азот, сірка) і фосфор присутні в дуже низьких концентраціях. Основні функціональні групи рослини включають: алкани, алкени, карбонові кислоти, складні ефіри та спирти (Redda et al., 2024).

Хімічний склад *B. carinata*, зокрема її олії, дозволяє використовувати рослину як високоефективну сировину для виробництва біопалива. Наприклад, у США вирощування цієї культури як озимої надає можливість виробникам отримати значну кількість біопаливної сировини для задоволення внутрішніх енергетичних потреб. Гірчиця ефіопська вписується в існуючі системи землеробства як озима культура, не вимагаючи значних змін в методах обробки землі. Зокрема, у Джей (штат Флорида США) було проведено дослідження щодо кількісної оцінки впливу хронології посівів на продуктивність у диверсифікованих сівозмінах. В результаті було виявлено, що врожай-

ність і якість насіння не залежали від хронології посівів. Дослідження показало, що нечутливість врожайності рослин до попередніх ярих культур дозволяє гнучко інтегрувати її в сівозміни, надаючи можливість обробляти понад 1,4 мільйона гектарів, з яких можна отримати понад 1224 мільйони літрів авіаційного палива, таким чином замінивши 1,40–2,33 % від загальних потреб авіаційного палива на нафтовій основі (Alam et al., 2019; Joseph E. et al, 2023).

В Іспанії та Італії олія з насіння також використовується для виробництва біопалива і для біопромислових цілей, наприклад, виготовлення мастила, фарби, косметики, пластмаси (Cardone et al., 2003).

У Канаді рослина *B. carinata* також активно розглядається як культура для виготовлення біопалива, але в даний час вирощується як покривна культура для зменшення ерозії ґрунту і використання гербіцидів, а також для сприяння збереженню вологи в садах. Подібним чином *B. carinata* використовується і в Україні. Покривна культура заорюється в ґрунт для використання як сидерат або біофумігант. Крім того, аліл-ізотіоціанат із насіння *B. carinata* використовується як біофумігант та біопестицид (Blackshaw et al., 2011; Alcántara et al., 2011; WWF..., 2024). *B. carinata* також використовується для фітореMediaції важких металів (Ahmed et al., 2001).

Рослини *B. carinata* можуть використовуватися як корм для ВРХ, або у чистому вигляді, або у вигляді шроту – побічного продукту переробки насіння. Враховуючи хімічний склад та економічну ефективність набагато доцільніше використовувати саме шрот у якості кормів, отриманий після вилучення з нього олії для інших потреб. Такий корм є високобілковим, його можна додавати до суміші разом з іншими джерелами білка – для повноцінного задоволення потреб худоби.

Після екстракції гексаном шрот має такий хімічний склад: вміст вологи – 7,69–9,23 %; сирий жир – 9,70–16,90 %; протеїн – 41,21–45,50 %; клітковина – 21,32–28,35 %; зола – 4,22–4,60 %. В шроті наявні макроелементи (Mg, Ca,

P, K) та мікроелементи (Al, Fe, Zn), а також помірний вміст сірки (1,13–1,38 %) й азоту (5,65–6,85 %).

До того ж шрот *Brassica carinata* різних генотипів може бути цінним джерелом природних антиоксидантів – завдяки своїй антиоксидантній здатності та потенціалу поглинання вільних радикалів. Загальний вміст фенолів і протеїну в екстракті шроту *Brassica carinata* варіював від 43,2 до 132 мг/100 г та від 24,6 до 35,4 мг/100 г відповідно.

Це робить шрот *B. carinata* високоцінним білковим кормом з багатим амінокислотним складом та беззаперечною харчовою цінністю, особливо у сучасних екологічних умовах (Schulmeister et al., 2019, Redda et al., 2024).

Зважаючи на походження (гірські райони Африки) і поширення (окрім Африки, в Азії, Південній Європі, Австралії, Північній Америці, Канаді) ця культура в умовах України представляє великі перспективи для реалізації свого генетичного та біологічного потенціалу за стійкістю до абіотичних і біотичних стресових факторів, а також забезпечення високої урожайності (Roslinsky, 2021; Thakur et al., 2019; Yim et al., 2022, Рахметов, 2024).

Brassica carinata A. Braun – гірчиця ефіопська – нова для України олійна рослина, яка проходить комплексні інтродукційні, селекційно-генетичні та фізіолого-біохімічні дослідження на базі НБС імені М.М. Гришка НАН України (спільно з ДУ «Інститутом харчової біотехнології і геноміки НАН України»). Створено колекцію генотипів *Brassica carinata* різного походження, яка налічує близько 30 таксонів.

Рослини *Brassica carinata* мають такі біолого-морфологічні характеристики (Методика..., 2024): однорічна трав'яна рослина; висота рослин – до 200 (інколи вище) см; діаметр стебла до 20 мм; листки чергові, голі або злегка опушені та часто воскові; нижні листові пластинки – до 20 см завдовжки і 10 см завширшки; суцвіття – сильно розгалужені, пухкі, складні кисті; квітки – актиноморфні; квітконіжки циліндричні – 5–6 мм завдовжки;

чашолистки чотири, світло-зелені – 4-7 мм завдовжки; пелюстки кремові або жовті, білі – 6-10 мм завдовжки; тичинок – шість; плоди – нерозкривні стручки; стручки – до 5 см завдовжки; кількість насінин у стручку – до 20; насіння кулясте, діаметром 1,0–1,5 мм; забарвлення насіння – від жовтого до жовто-коричневого і коричневого; насіння містить 25–47% олії.

Brassica carinata в умовах України показала великий продуктивний потенціал та стійкість і може бути перспективною олійною культурою за використання відповідних молекулярно-генетичних та біотехнологічних методів для створення цінних генотипів і сортів із заданими кількісними та якісними характеристиками олії.

Зважаючи на високий адаптивний та продуктивний потенціал рослин *Brassica carinata* і враховуючи потреби вітчизняного енергетичного та продовольчого ринку є необхідність у залученні до всебічних інтродукційних досліджень в умовах України широкого спектру генотипів цих рослин для введення у промислову культуру і розширення вітчизняної сировинної бази олійних рослин.

РОЗДІЛ 3.

УМОВИ, ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Польові та лабораторні дослідження щодо створення, оцінки та відбору високопродуктивних селекційно-генетичних ліній, форм, сортозразків і сортів гірчиці ефіопської (*Brassica carinata*), рижію озимого (*Camelina sativa*, f. *biennis*), а також ріпаку (*B. napus*, f. *annua*) та опрацювання сучасних методів поліпшення біотрофних властивостей ґрунту і методів безвідходної утилізації побічної продукції рослин були проведені на експериментальній базі Національного ботанічного саду імені М.М. Гришка НАН України (НБС імені М.М. Гришка) та Дослідного сільськогосподарського виробництва Інституту фізіології рослин і генетики НАН України (ДСВ ІФРГ НАН України «Глеваха»).

Об'єкт досліджень – процес мобілізації, інтродукційного вивчення різних генотипів гірчиці ефіопської (*Brassica carinata*) та рижію (*Camelina sativa*) (у порівнянні з ріпаком – *B. napus*) і створення високопродуктивних селекційних ліній та сортозразків рослин. Розробка методів покращення ростових і продуктивних показників рослин та поліпшення біотрофних властивостей ґрунту за використання оригінальних кремнієвмісних добрив.

Предмет дослідження – економічно важливі олійні культури: гірчиця ефіопська (*Brassica carinata*); рижій посівний (*Camelina sativa*); ріпак (*Brassica napus*) і кремнієвмісні добрива.

Внаслідок проведених інтродукційних, генетично-селекційних та біотехнологічних досліджень у відділі культурної флори НБС імені М.М. Гришка НАН України зібрано цінну генофондову колекцію (KF-705.2) економічно важливих олійних культур: рижію посівного (*Camelina sativa*) – 35 зразків; гірчиці ефіопської (*Brassica carinata*) – 17; ріпаку (*Brassica napus*) – 32 зразки (табл.3.1-3.3, рис. 3.1-3.3).

Таблиця 3.1

Генофондова колекція мобілізованих і створених
високопродуктивних форм рослин рижію посівного (*Camelina sativa*)

Латинська назва	Українська назва
1	2
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz (f. biennis)	Рижий посівний (озима форма)
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz (f. biennis), cv.s. Bohemskyi	Рижий посівний (озима форма), с. Богемський
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz (f. annua), cv. Yevro-12	Рижий посівний (яра форма), с. Євро-12
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz (f. annua), cv. Kolondaik	Рижий посівний (яра форма), с. Колондаик
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz (f. annua), cv. Mirazh	Рижий посівний (яра форма), с. Міраж
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz (f. annua), cv. Peremoha	Рижий посівний (яра форма), с. Перемога
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz (f. annua), f. EORZHIAFCH	Рижий посівний (яра форма), ф. ЕОРЖЯФЧ
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz (f. annua), f. EORZHIAF-1	Рижий посівний (яра форма), ф.ЕОРЖЯФ-1
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz (f. annua), f. EORZHIAF-2	Рижий посівний (яра форма), ф. ЕОРЖЯФ-2
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz. (f. annua), f. EORZHIAF-3	Рижий посівний (яра форма), ф. ЕОРЖЯФ-3
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz (f. annua), f. EORZHIAF-4	Рижий посівний (яра форма), ф. ЕОРЖЯФ-4
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz (f. annua), f. EORZHIAF-5	Рижий посівний (яра форма), ф. ЕОРЖЯФ-5
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz (f. annua), f. EORZHIAFD	Рижий посівний (яра форма), ф. ЕОРЖЯФД
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz (f. annua), f.1	Рижий посівний (яра форма), ф.1
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz (f. annua), f.2	Рижий посівний (яра форма), ф.2
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz (f. annua), f.3	Рижий посівний (яра форма), ф.3

1	2
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz (f. annua), f. EORZHIAFCHP	Рижій посівний (яра форма), ф. ЕОРЖЯФЧП
<i>Camelina microcarpa</i> Andrz.	Рижій дрібноплідний
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz (f. annua)	Рижій посівний (яра форма)
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz (f. annua)	Рижій посівний (яра форма)
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz (f. annua), cv. Pivnichna krasunia	Рижій посівний (яра форма), с. Північна красуня
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz (f. annua)	Рижій посівний (яра форма)
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz (f. annua), cv. Suneson	Рижій посівний (яра форма), с. Сунесон
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz (f. annua), f. 1-TFR	Рижій посівний (яра форма), ф. 1-ТФР
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz (f. annua), f. 2-TFR	Рижій посівний (яра форма), ф. 2-ТФР
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz (f. annua), f. 3-TFR	Рижій посівний (яра форма), ф. 3-ТФР
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz (f. annua), f. 4-TFR	Рижій посівний (яра форма), ф. 4-ТФР
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz (f. annua), f. 5-TFR	Рижій посівний (яра форма), ф. 5-ТФР
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz (f. annua), f. 6-TFR	Рижій посівний (яра форма), ф. 6-ТФР
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz (f. annua), f. 7-TFR	Рижій посівний (яра форма), ф. 7-ТФР
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz, cv. Yubylar, UE 0600069, INK	Рижій посівний, сорт Юбіляр, UE 0600069, ІНК
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz, cv. Kozyr,	Рижій ярий, сорт Козирь, UE0600071
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz, cv. Brazetto	Рижій посівний, сорт Бразетто
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz, cv. Runo	Рижій посівний, сорт Руно
<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz, cv. Ranok	Рижій посівний, сорт Ранок

Таблиця 3.2

Генофондова колекція мобілізованих і створених
високопродуктивних форм рослин ріпаку (*Brassica napus*)

Латинська назва	Українська назва
<i>Brassica napus</i> L. f. annua DC., cvs. Rimal	Ріпак ярий, сз. Рімал
<i>Brassica napus</i> L. f. annua DC., cv. Yamal	Ріпак ярий, с. Ямал
<i>Brassica napus</i> L. f. annua DC., cv. Mriia	Ріпак ярий, с. Мрія
<i>Brassica napus</i> L. f. annua DC.,cv. Sribliastyi	Ріпак ярий, с. Сріблястий
<i>Brassica napus</i> L. f. annua DC., cv. Bolero	Ріпак ярий, с. Болеро
<i>Brassica napus</i> L. f. annua DC., cv.Yantar-H	Ріпак ярий, с. Янтар-Г
<i>Brassica napus</i> L. f. annua DC., f. EORIAFA	Ріпак ярий, ф. ЕОРЯФА
<i>Brassica napus</i> L. f. annua DC., f. EORIAFAP	Ріпак ярий, ф. ЕОРЯФАП
<i>Brassica napus</i> L. f. annua DC., f. EORIAFK	Ріпак ярий, ф. ЕОРЯФК
<i>Brassica napus</i> L. f. annua DC., f. EORIAFVL	Ріпак ярий, ф. ЕОРЯФВЛ
<i>Brassica napus</i> L. f. annua DC., f. EORIAOFV	Ріпак ярий, ф. ЕОРЯОВВ
<i>Brassica napus</i> L. f. annua DC., f. EORIAF-5	Ріпак ярий, ф. ЕОРЯФ-5
<i>Brassica napus</i> L. f. biennis DC., cv. Falkon	Ріпак озимий, с.Фалкон
<i>Brassica napus</i> L. f. biennis DC., cv. Senator liuks	Ріпак озимий, с. Сенатор люкс
<i>Brassica napus</i> L. f. biennis DC., cv. Vatan	Ріпак озимий, с. Ватан
<i>Brassica napus</i> L. f. biennis DC., cv. Sveta	Ріпак озимий, с. Света
<i>Brassica napus</i> L. f. biennis D.C., cv. Dembo	Ріпак озимий, с. Дембо
<i>Brassica napus</i> L. f. biennis DC.,cv. Kronos	Ріпак озимий, с. Кронос
<i>Brassica napus</i> L. f. biennis DC., cv. Danhal	Ріпак озимий, с. Дангал
<i>Brassica napus</i> L. f. biennis DC., cv. Mykytynetskyi	Ріпак озимий, с. Микитинецький
<i>Brassica napus</i> L. f. biennis DC., cv.Tysmenytskyi	Ріпак озимий с. Тисменицький
<i>Brassica napus</i> L. f. biennis DC., f. EROF-1	Ріпак озимий, ф. ЕРОФ-1
<i>Brassica napus</i> L. f. biennis DC., f. EROF-2	Ріпак озимий, ф. ЕРОФ-2
<i>Brassica napus</i> L. f. biennis DC., f. EROF-3	Ріпак озимий, ф. ЕРОФ-3
<i>Brassica napus</i> L. f. biennis DC., f. EROF-4	Ріпак озимий, ф. ЕРОФ-4
<i>Brassica napus</i> L. f. biennis DC., f. EROF-5	Ріпак озимий, ф. ЕРОФ-5
<i>Brassica napus</i> L. f. biennis DC., f. EROF-6	Ріпак озимий, ф. ЕРОФ-6
<i>Brassica napus</i> L. f. biennis DC., f. EROFD-1	Ріпак озимий, ф. ЕРОФД-1
<i>Brassica napus</i> L. f. biennis DC., f. EROFITSB	Ріпак озимий, ф. ЕРОФІЦБ
<i>Brassica napus</i> L. f. biennis DC., f. EROFK	Ріпак озимий, ф. ЕРОФК
<i>Brassica napus</i> L. f. biennis DC., f. EROF-Odil A	Ріпак озимий, ф. ЕРОФ-Оділ А
<i>Brassica napus</i> L. f. biennis DC., f. EROFVH	Ріпак озимий, ф. ЕРОФВГ

Таблиця 3.3

Генофонд мобілізованих та відібраних високопродуктивних форм рослин гірчиці ефіопської або капусти кільоподібної (*Brassica carinata*) в НБС імені М.М. Гришка НАН України

Латинська назва	Українська назва
<i>Brassica carinata</i> A. Braun, f. BC NPF-1	Гірчиця ефіопська (капуста кільоподібна), ф. КК ППФ - 1
<i>Brassica carinata</i> A. Braun, f. BC NPF- 2	Гірчиця ефіопська (капуста кільоподібна), ф. КК ППФ - 2
<i>Brassica carinata</i> A. Braun, f. BC NPF- 3	Гірчиця ефіопська (капуста кільоподібна), ф. КК ППФ - 3
<i>Brassica carinata</i> A. Braun, f. BC NPF- 4	Гірчиця ефіопська (капуста кільоподібна), ф. КК ППФ - 4
<i>Brassica carinata</i> A. Braun, f. BC NPF- 5	Гірчиця ефіопська (капуста кільоподібна), ф. КК ППФ - 5
<i>Brassica carinata</i> A. Braun, f. BC NPF- 6	Гірчиця ефіопська (капуста кільоподібна), ф. КК ППФ - 6
<i>Brassica carinata</i> A. Braun, f. BC NPF- 7	Гірчиця ефіопська (капуста кільоподібна), ф. КК ППФ - 7
<i>Brassica carinata</i> A. Braun, f. BC NPF- 8	Гірчиця ефіопська (капуста кільоподібна), ф. КК ППФ - 8
<i>Brassica carinata</i> A. Braun, f. BC SCF- 1	Гірчиця ефіопська (капуста кільоподібна), ф. КК СГСФ - 1
<i>Brassica carinata</i> A. Braun, f. BC SCF- 2	Гірчиця ефіопська (капуста кільоподібна), ф. КК СГСФ - 2
<i>Brassica carinata</i> A. Braun, f. BC SCF- 3	Гірчиця ефіопська (капуста кільоподібна), ф. КК СГСФ - 3
<i>Brassica carinata</i> A. Braun, f. BC SCF- 4	Гірчиця ефіопська (капуста кільоподібна), ф. КК СГСФ - 4
<i>Brassica carinata</i> A. Braun, f. BC SCF- 5	Гірчиця ефіопська (капуста кільоподібна), ф. КК СГСФ - 5
<i>Brassica carinata</i> A. Braun, f. BC SCF- 6	Гірчиця ефіопська (капуста кільоподібна), ф. КК СГСФ - 6
<i>Brassica carinata</i> A. Braun, f. BC SCF- 7	Гірчиця ефіопська (капуста кільоподібна), ф. КК СГСФ - 7
<i>Brassica carinata</i> A. Braun, f. BC SCF- 8	Гірчиця ефіопська (капуста кільоподібна), ф. КК СГСФ - 8
<i>Brassica carinata</i> A. Braun, f. BC SCF- 9	Гірчиця ефіопська (капуста кільоподібна), ф. КК СГСФ - 9



A



B



Рис. 3. 1. Колекція генотипів *Camelina sativa* (А і Б) та сорт Руно (В)





Б

Рис. 3. 2. Колекція генотипів *Brassica carinata* (А) та відібрана форма (Б)



Рис. 3. 3. Генотип *Brassica napus*

Проведено дослідження з вивчення впливу кремнієвмісних добрив на ріст, розвиток і продуктивність рослин рижію, гірчиці та ріпаку у різні фази розвитку (рис. 3. 4).



А

Веgetативна фаза



Б

Фаза квітування



Фаза дозрівання насіння

Рис. 3. 4. Дослід із вивчення впливу кремнієвмісних добрив на ріст, розвиток і продуктивність рослин рижю, гірчиці та ріпаку в різні фази розвитку (А-В)

Погодні умови у період проведення досліджень (2023-2024 рр.). Як свідчать результати досліджень, період вегетації рослин у 2023 р. характеризувався тим, що середньомісячна температура була значно вища від норми у період з квітня по жовтень (Центральна..., 2023) (рис. 3. 5).

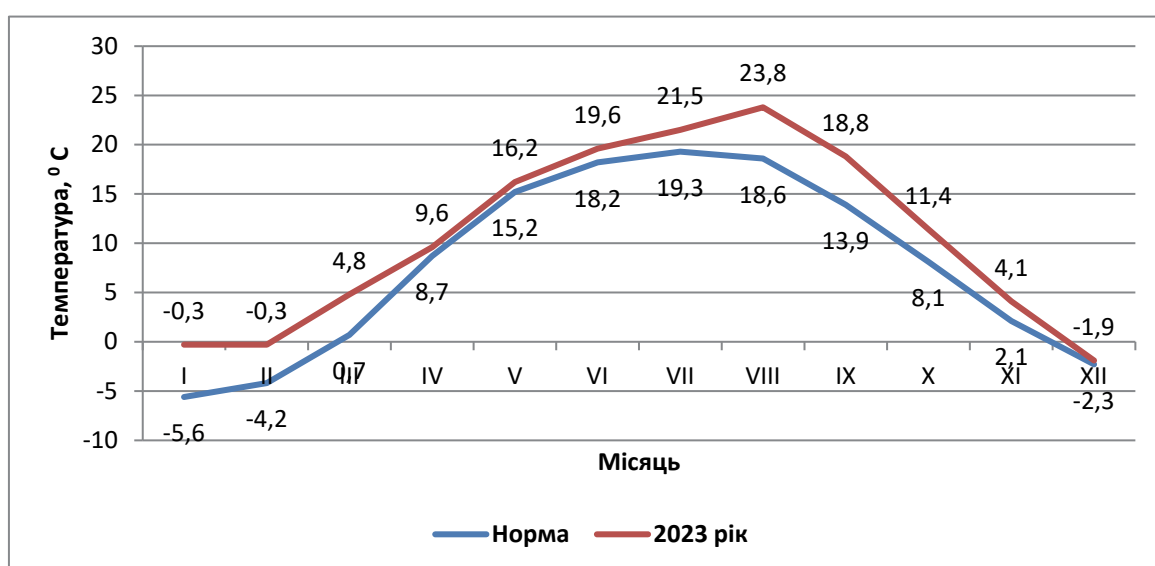


Рис. 3. 5. Середньомісячна температура повітря у 2023 р. порівняно з нормою, °C

Місячна кількість опадів у період вегетації суттєво перевищувала норму в липні. Особливо посушливими були травень, серпень і вересень (рис. 3. 6).

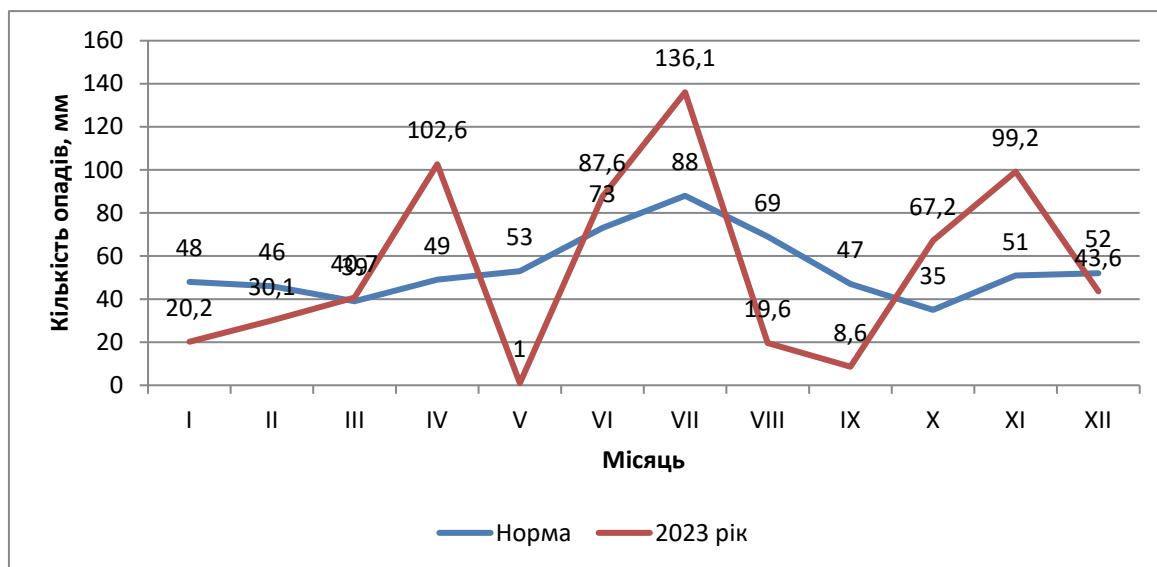


Рис. 3. 6. Середньомісячна кількість опадів у 2023 р. порівняно з нормою, мм

Період вегетації рослин у 2024 р. характеризувався тим, що середньомісячна температура була значно вища від норми у період з березня по жовтень (Центральна..., 2024) (рис. 3. 7).

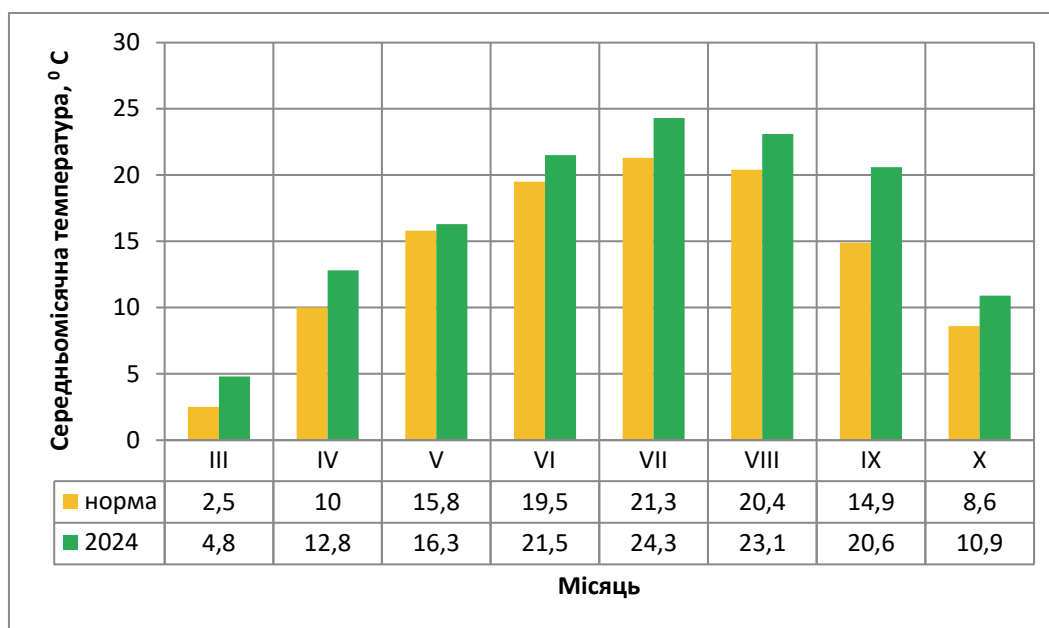


Рис. 3. 7. Середньомісячна температура повітря у 2024 р. порівняно з нормою, °С

Місячна кількість опадів у період вегетації суттєво перевищувала норму в квітні та особливо у червні. Посушливими були травень, серпень і вересень (рис. 3. 8).

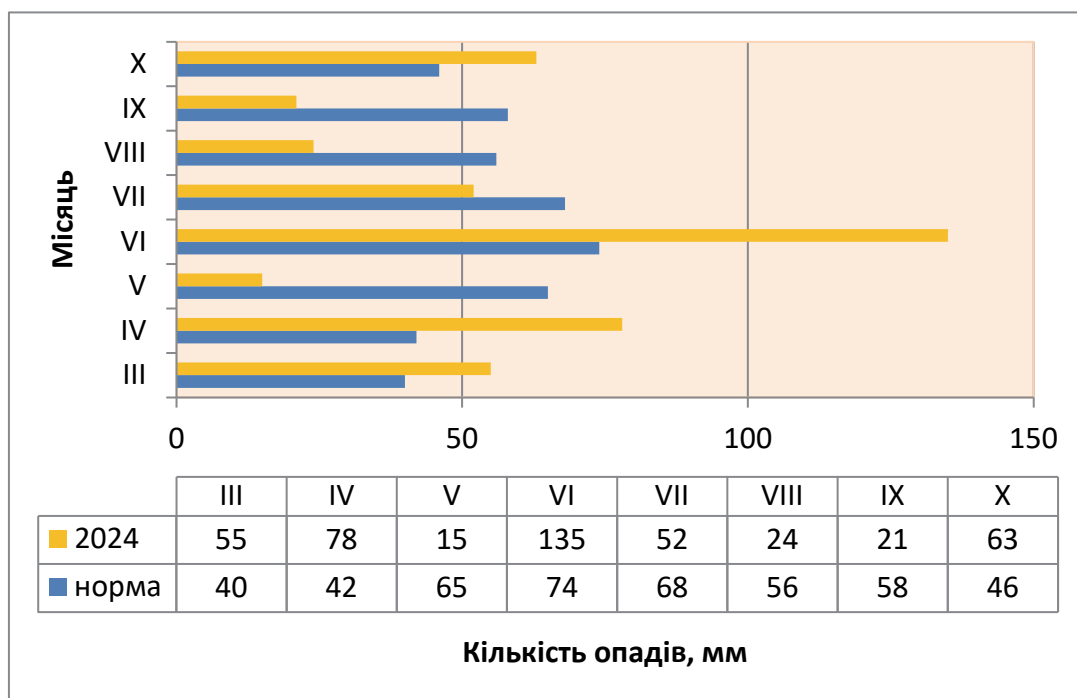


Рис. 3. 8. Середньомісячна кількість опадів у 2024 р. порівняно з нормою, мм

Проте за цих умов рослини капустяних культур успішно вегетували і забезпечили високі продуктивні показники. Завдяки адаптаційному потенціалу досліджуваних рослин несприятливі погодно-кліматичні умови несуттєво позначилися на рості, розвитку та проходженні продукційного процесу, що підтверджується результатами експериментальних досліджень.

У роботі були використані такі методи досліджень: загальнонаукові (гіпотеза, експеримент, спостереження, аналіз, синтез) і спеціальні методи (польовий і лабораторний – хімічні, біохімічні, мікробіологічні, агрохімічні). На основі сучасних методів інтродукції, акліматизації, молекулярної селекції, біохімії та біотехнології рослин будуть встановлені особливості росту, розвитку і якісні, кількісні показники рослин, продуктивний потенціал, алелопатичні властивості нових олійних культур і створених генотипів.

Полеві досліді закладали відповідно до існуючих методик для Держсортмережі та науково-дослідних установ у чотирьохкратному повторенні. Розмір посівних ділянок – 35-40 м², їх облікова площа – 25-30 м². Розміщення варіантів по повтореннях – систематичне і рендомізоване.

Кремнієвмісне добриво, до складу якого входять мулові відклади (70%) і природний мінерал анальцим (30%), вносили із розрахунку 300 кг/га.

Висота рослин, морфологічний опис їхніх органів визначались шляхом вимірів та візуально. Для вивчення морфологічних особливостей будови представників досліджуваних родин застосовувалась загальноприйнята морфологічна термінологія (Zyman et al., 2012).

Морфологічний опис мікроскульптури поверхні насіння рослин виконано згідно *Illustrated guide to the morphology of flowering plants* (Zyman et al., 2012). Також використано біометричний і порівняльний методи визначення їх зовнішніх та внутрішніх ознак. Одночасно проведено фотофіксацію у проекції за довжиною, шириною та поперечному розрізі за використання електричного USB мікроскопу SIGETA Expert 10-300x 5.0Mpx, а також цифрової фотокамери Canon 400 D. Лінійні розміри фіксували електронним цифровим штангенциркулем «Generic» і вимірювальної стрічки Xiaomi Duka SD.

Масу 1000 насінин оцінювали на електронних аналітичних вагах AXIS ANG 200C у десятиразовій повторності згідно міжнародних правил аналізу насіння (1999).

Біохімічні аналізи рослинних зразків проведені у динаміці від початку до завершення вегетації згідно загальноприйнятих методик у біохімічній лабораторії відділу культурної флори НБС імені М. М. Гришка. Аналізи по дослідженню алелопатичних, мікробіологічних та біохімічних особливостей рослин і ґрунту проведені у лабораторіях відділу алелопатії НБС.

Дослідні зразки відбирали у фазу квітання, плодоношення та дозрівання насіння згідно загальноприйнятих методик. Для виявлення біохімічної

цінності рослин визначали: абсолютно суху речовину шляхом висушування зразків при температурі 105°C до постійної маси; золу – методом спалювання зразків в муфельній печі «СНОЛ 7,2-1100» (Termolab) (при 500...700°C). Вміст фотосинтетичних пігментів (хлорофілів *a* і *b*) визначали спектрофотометрично – спектрофотометр «Specor» UNICO 2800 (Мусиенко, 2001). Вміст азоту у рослинних зразках визначали методом Кьельдаля на апараті KDN – 04D – Kjeldal Digestion Unit та апарат ATN – 100. Загальний вміст цукрів – методом Бертрана, вміст аскорбінової кислоти – методом титрування 2,6-дихлорфеноліндофенолом.

Визначення певних класів біологічно активних речовин зокрема, вторинних рослинних метаболітів виконано на базі ЦККП «Високоєфективна рідинна хроматографія (ВЕРХ)» НБС імені М.М. Гришка НАН України на автоматичному чотирьохканальному рідинному хроматографі Agilent 1100 з діодноматричним детектором та хімічною станцією (Agilent Technologies – Німеччина).

Проведено аналіз сировини рослин – листки, стебла, суцвіття, плоди, корені – різних форм гірчиці ефіопської на вміст хімічних елементів з метою оцінки її збагаченості окремими елементами та безпечності. Аналізи виконані у Центрі колективного користування науковими приладами «Спектрометричний центр елементного аналізу» Національного ботанічного саду імені М. М. Гришка НАН України.

Кількісний і якісний склад хімічних елементів у рослинній сировині визначали методом мас-спектрометрії з індукційно-зв'язаною плазмою (ІЗП – МС) на апараті ICAP 6300 DUO (Thermo Fisher Scientific, США). Межі виявлення елементів для даного апарату сертифіковані ДП "УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТОМ". Суть методу полягає у тому, що розчин, який досліджується, подається за допомогою насосу до розпилювача, у якому потоком аргону переходить в аерозоль. Аерозоль через інжектор плазмової горілки потрапляє до плазми, де під дією високої температури (7000-8000 К) всі елементи, які містяться у

пробі, іонізуються. Утворені позитивно заряджені іони проходять крізь систему іонної оптики до аналізатора, де відбувається відбір іонів із певним співвідношенням маси до заряду (m/z) і детектування інтенсивності потоку відповідних іонів. Сигнал, який отримується, трансформується у залежність інтенсивності від величини m/z і обробляється. Перевагою цього методу є те, що визначення елементів можливе як на найнижчому рівні концентрації, так і на високих рівнях, що забезпечує якість багатоелементного аналізу.

Підготовку проб абсолютно сухої рослинної сировини проводили шляхом гомогенізації, зважування з подальшим озоленням розчином азотної кислоти. Потім наважки переміщували до хімічної мікрохвильової печі. У ній під дією заданих параметрів тиску і температури відбувалося розкладання зразків. Отриманий екстракт вводили безпосередньо до мас-спектрометра і за допомогою концентричного розпилювача переводили в аерозоль з подальшим поданням до аргонної плазми, де проходила іонізація. Потім відбувалася сепарація іонів за мас-зарядним співвідношенням і вимірювання інтенсивності сигналів цих сепарованих іонів аналітів. Повторність дослідів – трикратна.

Статистичну обробку отриманих даних здійснювали за допомогою програми Microsoft Excel 2010 (пакет «Аналіз даних»). Для вираження отриманих даних використовували мінімальні, максимальні, середні значення, стандартне відхилення, коефіцієнт варіації.

РОЗДІЛ 4. РОСТОВІ, БІОХІМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА ПРОДУКТИВНІСТЬ МОБІЛІЗОВАНИХ І СТВОРЕНИХ ГЕНОТИПІВ РОСЛИН РИЖІЮ (*CAMELINA SATIVA*)

4.1. Ростові особливості та продуктивність мобілізованих і створених генотипів рослин рижію

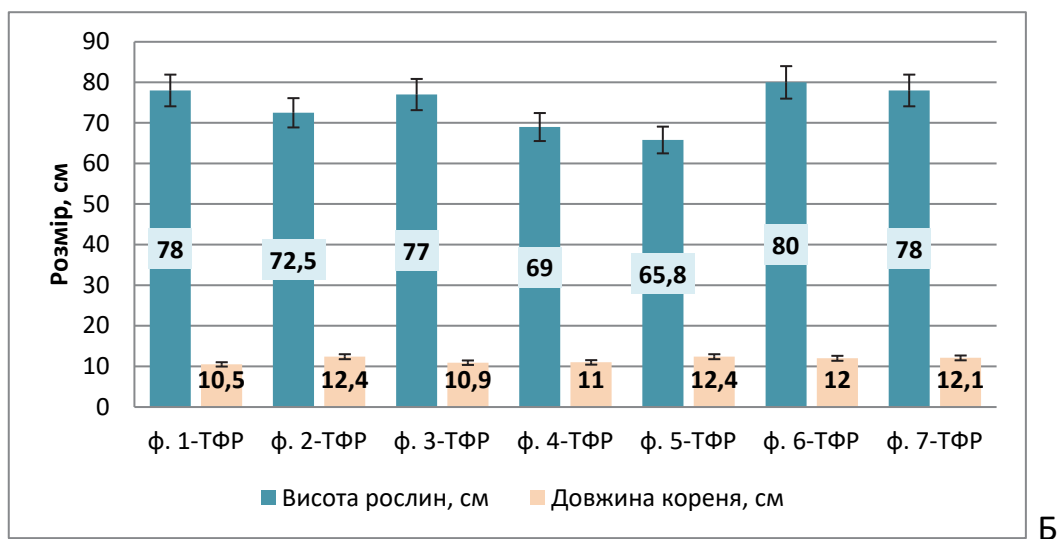
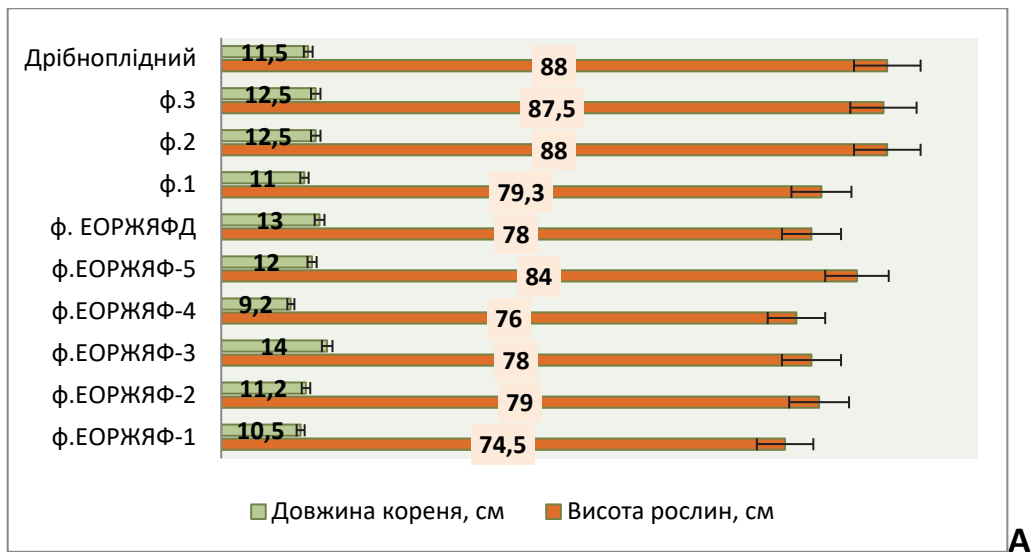
Протягом багаторічного періоду у відділі культурної флори Національного ботанічного саду імені М.М. Гришка НАН України створена унікальна за якісним і кількісним складом колекція олійних рослин, яка включає понад 200 таксонів. Серед цього колекційного фонду генотипова колекція *Camelina sativa* нараховує близько 35 зразків. На основі цього вихідного матеріалу різними селекційними методами виведено понад 10 ярих та 5 озимих форм рослин. Слід зазначити, що всі включені до Державного реєстру сорти рижію відносяться до ярої форми рослин. На жаль, сорти озимої форми рослин досі відсутні в культурі в Україні.

За наслідками досліджень представників роду *Camelina* встановлено морфолого-біологічні, екологічні, біохімічні особливості рослин різних форм та сортів. Визначено особливості проходження продукційних процесів, накопичення важливих речовин у рослин, формування урожайності надземної маси і насіння та структури урожаю. Виявлено вміст та вихід ліпідів із насіння, визначено жирнокислотний склад жирної олії і на цій основі встановлено найперспективніші генотипи.

Встановлено, що в умовах досліджень генотипи рослин *Camelina sativa* проходять всі етапи органогенезу за один вегетаційний період. Розвивається від набубнявіння насіння до його дозрівання. Рослини проходять фази розвитку: сходи, перший справжній листок, розетка, стеблування, бутонізація, квітування, плодоношення і дозрівання. Фаза масового квітування в озимої форми рослин проходить у III декаді квітня – I декаді травня, ярої форми – в

I – II декадах червня. Дозрівання насіння в озимій форми відбувається одночасно на початку червня, ярої форми – на початку липня. Тривалість вегетаційного періоду ярих форм рослин становить від 55 до 95 діб, озимих – 270-300 діб.

За результатами досліджень встановлено, що рослини рижію посівного різних генотипів у фазі технічної стиглості вирізняються за морфометричними показниками. Визначено висоту рослин, довжину кореня, діаметр стебла у основі у 25 зразках рижію у фазі плодоношення-дозрівання (рис. 4. 1, А-В).



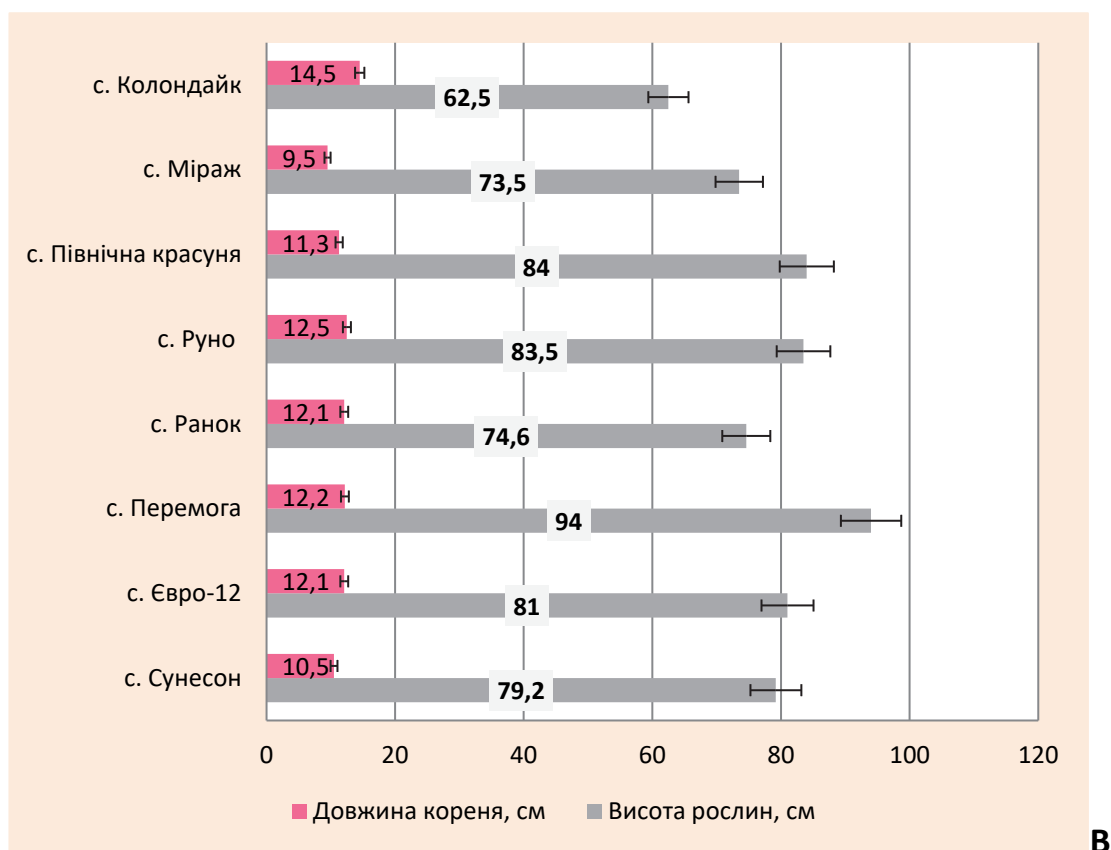


Рис. 4. 1. Висота рослин і довжина коренів різних генотипів ріжю посівного ярого у фазі плодоношення-дозрівання (А-В)

Установлено, що висота рослин ріжю залежно від генотипів змінюється від 62,5 см до 94,0 см. Найбільшою висотою характеризувалися рослини ріжю ф. 1 та сорт Перемога, найменшою – с. Колондайк. Довжина кореня у генотипів ріжю посівного ярого у фазі плодоношення-дозрівання була різною і становила від 9,2 до 14,5 см.

У роботах D. Neupane та інших (2018, 2019, 2020), M. Berti (2010) зазначається, що залежно від форми, сорту та умов вирощування висота рослин ріжю коливається у межах від 30 до 120 см.

Найбільший діаметр стебла серед зразків рослин ріжю мали сорти Руно (3,9 мм) та Перемога (3,8), найменший – ф. 5-ТФР (2,2 мм) (рис. 4. 2).

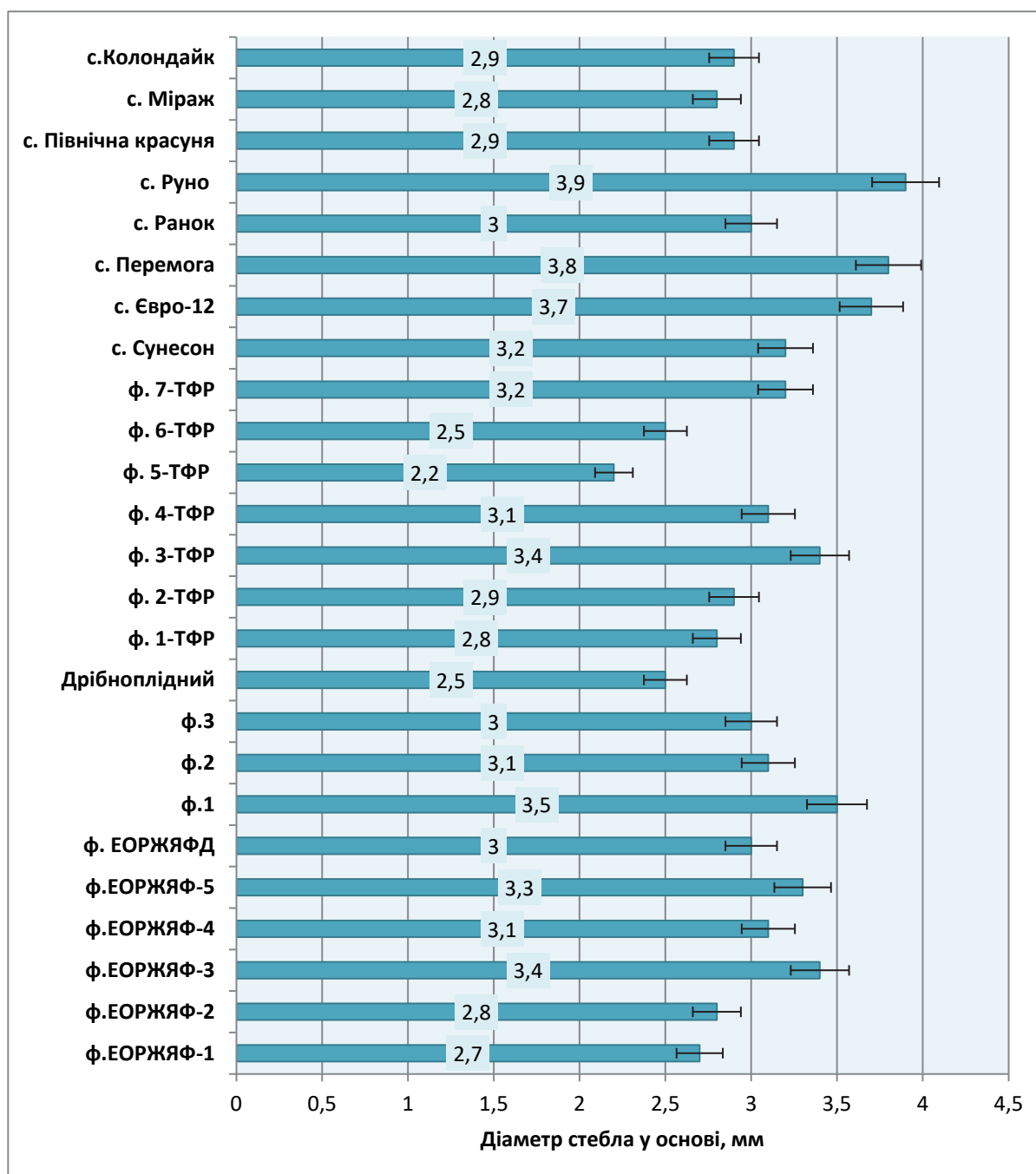


Рис. 4. 2. Діаметр стебла в основі різних генотипів ріжю посівного ярого у фазі плодоношення-дозрівання, мм

Кількість бічних пагонів на рослині становить від 3 до 12,6 (рис. 4.3). Найбільшою кількістю бічних пагонів вирізнялися р. дрібноплідний та ф. 4-ТФР, найменшою – с. Колондайк.

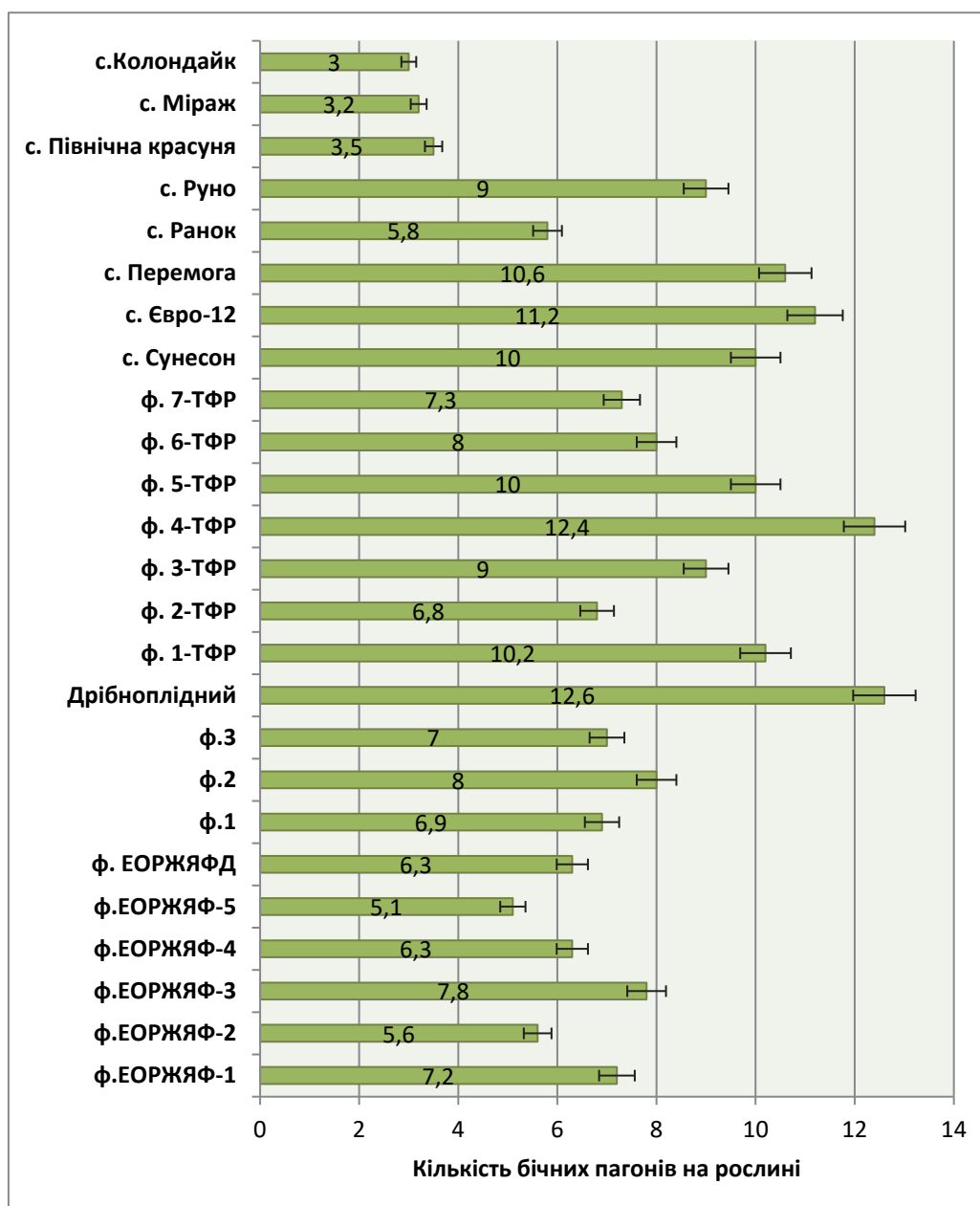
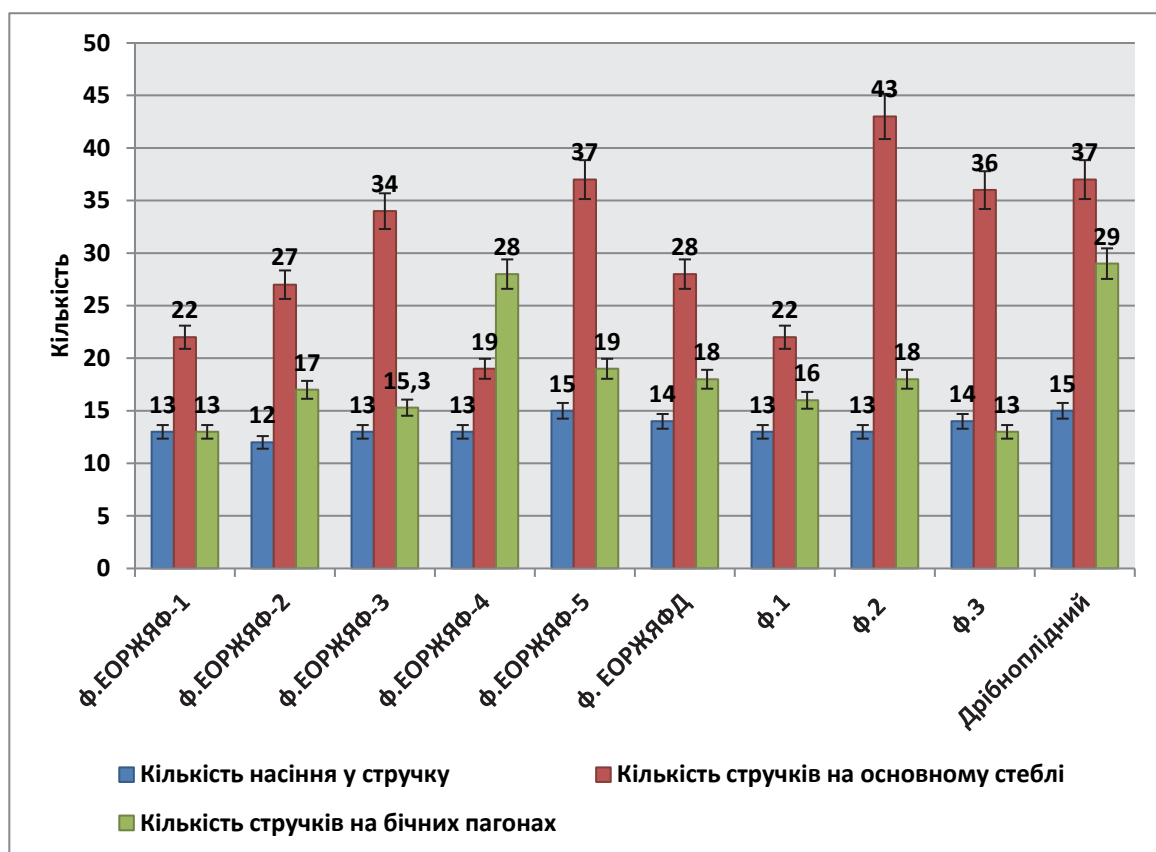
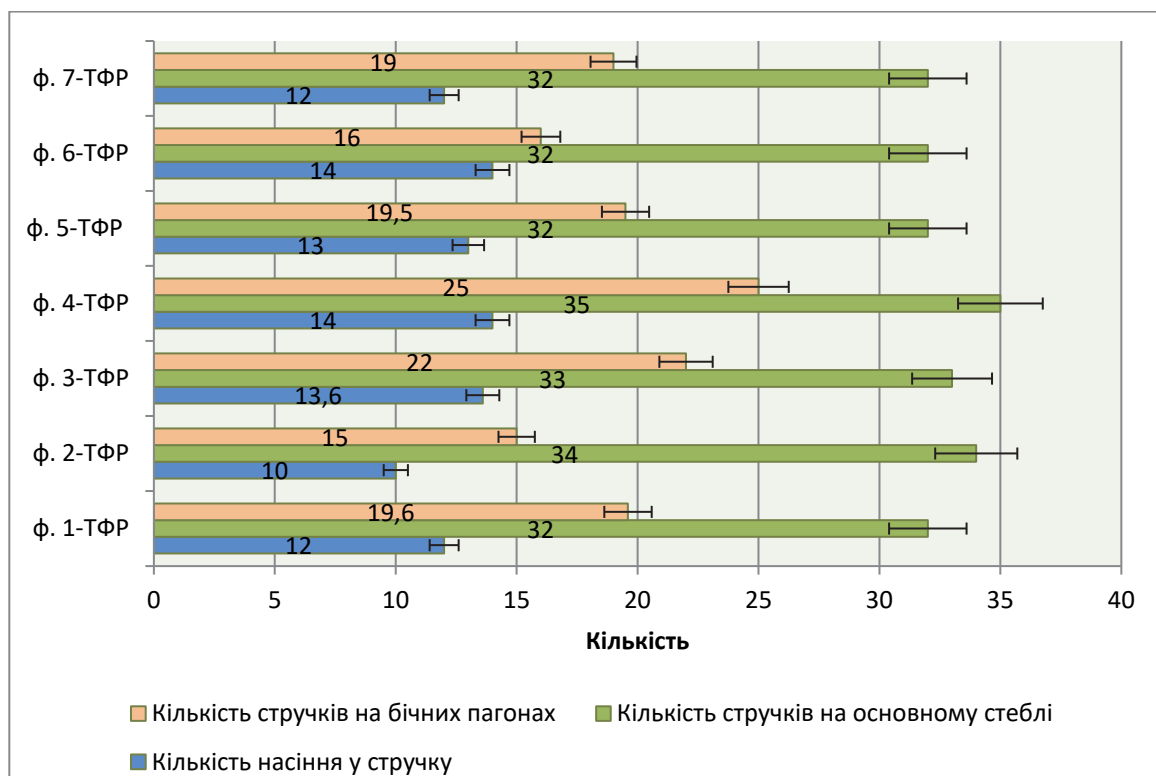


Рис. 4. 3. Кількість бічних пагонів на рослині різних генотипів рижію посівного ярого у фазі плодоношення-дозрівання

Кількість стручків на рослині та насіння у стручку генотипів рижію посівного ярого у фазі плодоношення-дозрівання була різною (рис. 4.4, А-В).



А



Б

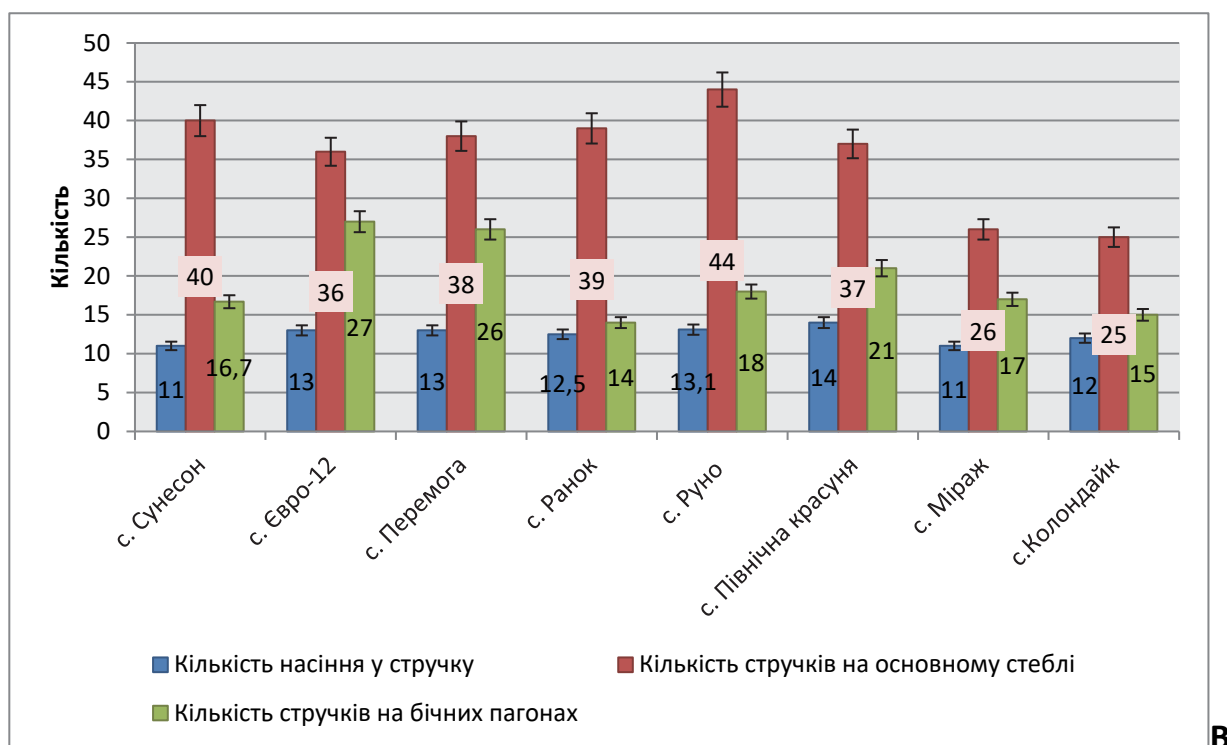


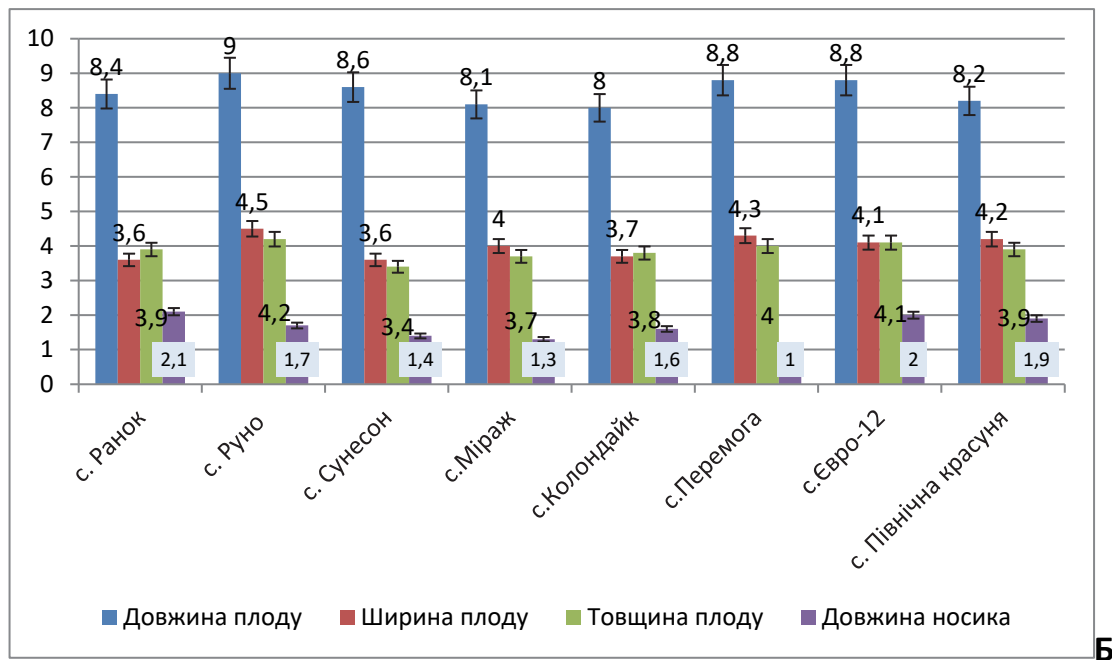
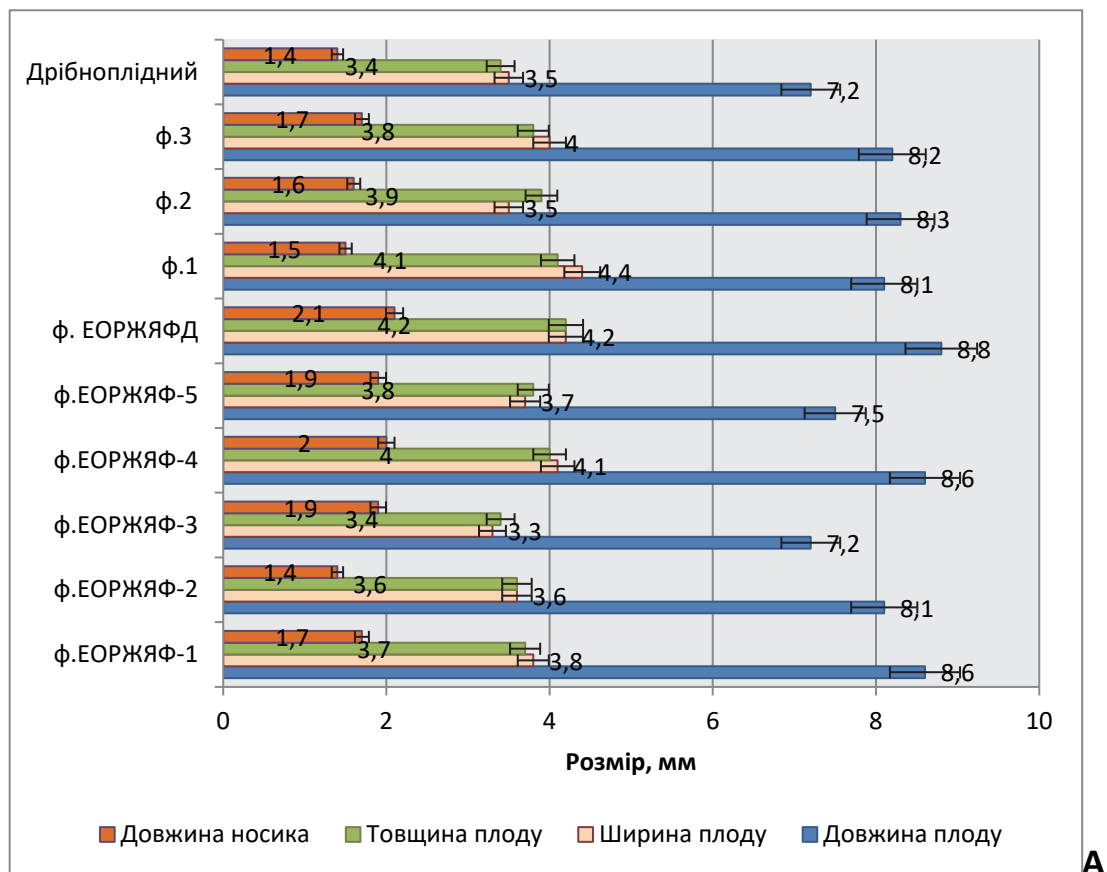
Рис. 4. 4. Кількість стручків на рослині та насіння у стручку різних генотипів ріжю посівного ярого у фазі плодоношення-дозрівання (А-В)

Кількість стручків на основному стеблі сягає від 22 до 44, на бічних пагонах – 13-29. Найбільшою їх кількістю вирізнялися рослини ріжю ф.2 і сорт Руно та р.дрібноплідний і ф. ЕОРЖЯФ-4 відповідно.

Кількість насіння у стручку різних генотипів ріжю посівного ярого у фазі плодоношення-дозрівання сягала від 10 до 15 шт. Найбільшу кількість мали ф. ЕОРЖЯФ-5 і р.дрібноплідний, найменшу – ф. 2-ТФР.

Плід *Camelina sativa* – стручечок, обернено яйцеподібної форми. Носик плода апікальний, має шилоподібну форму. Насіння дрібне, червоно-коричневе (руде), видовжено-овальне. За результатами багаторічних досліджень визначено, що довжина насіння змінюється у межах від 1,71 до 2,10, ширина – 0,85-1,11 мм.

Морфометричні показники плодів різних генотипів ріжю посівного ярого суттєво вирізнялися (рис. 4.5, А-В).



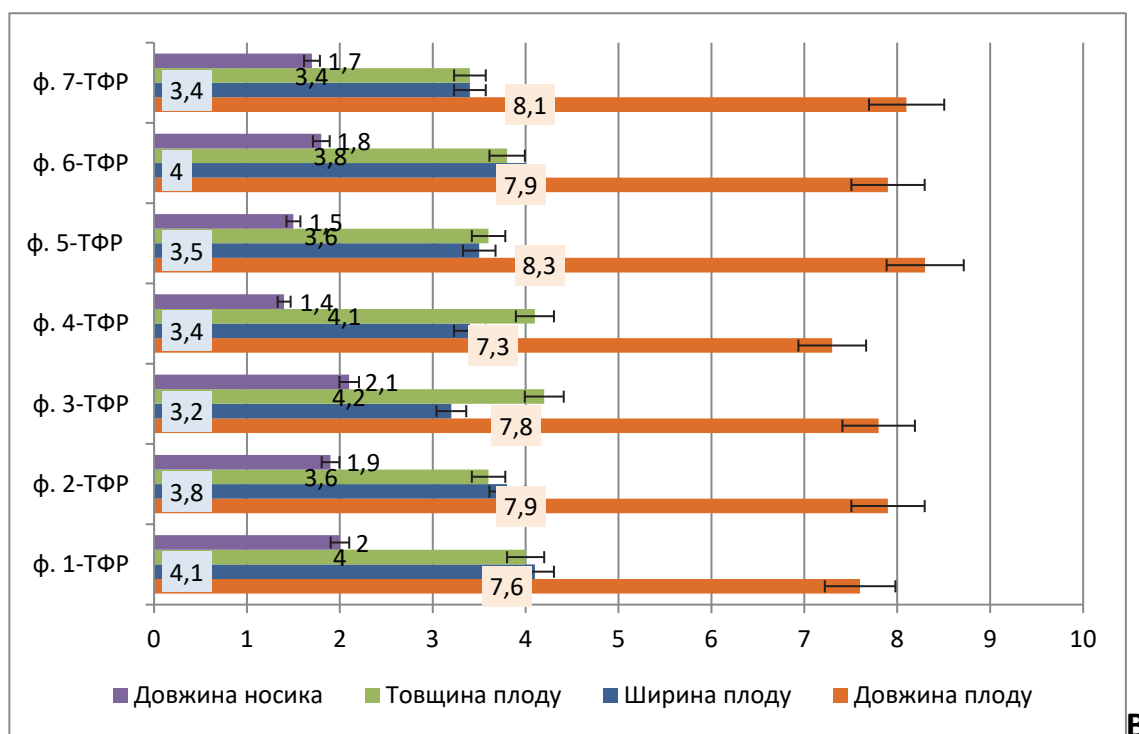


Рис. 4. 5. Морфометричні показники плодів різних генотипів ріжю посівного ярого, мм (А-В)

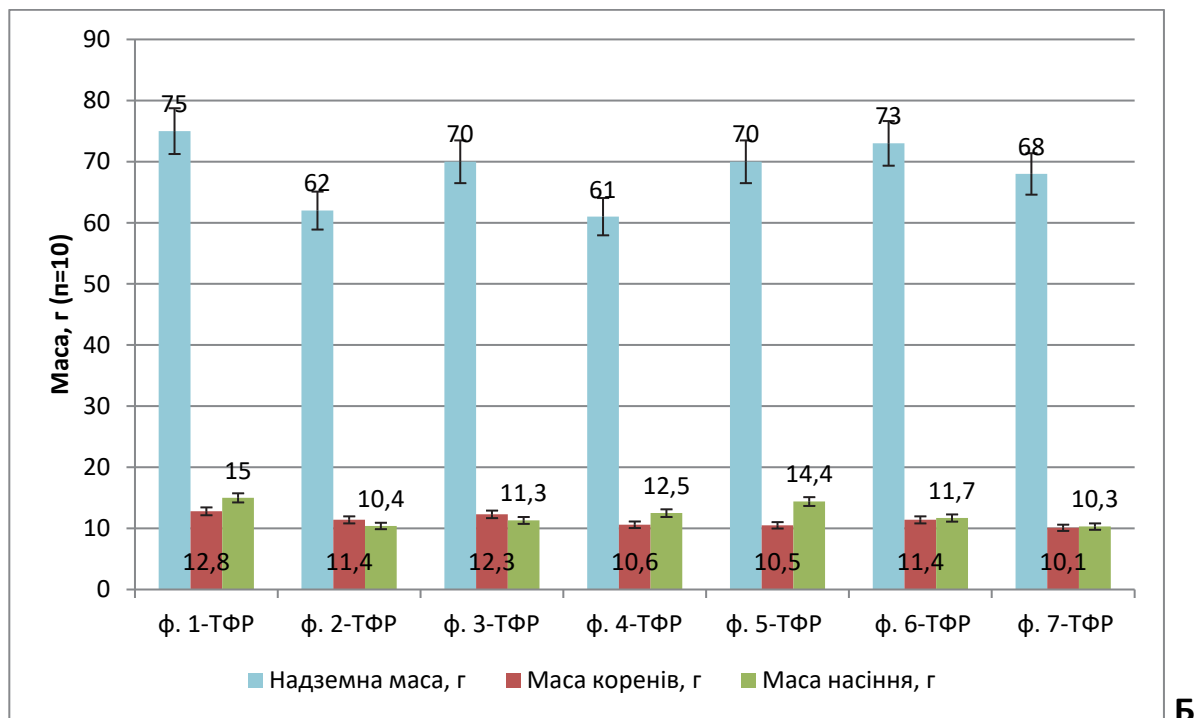
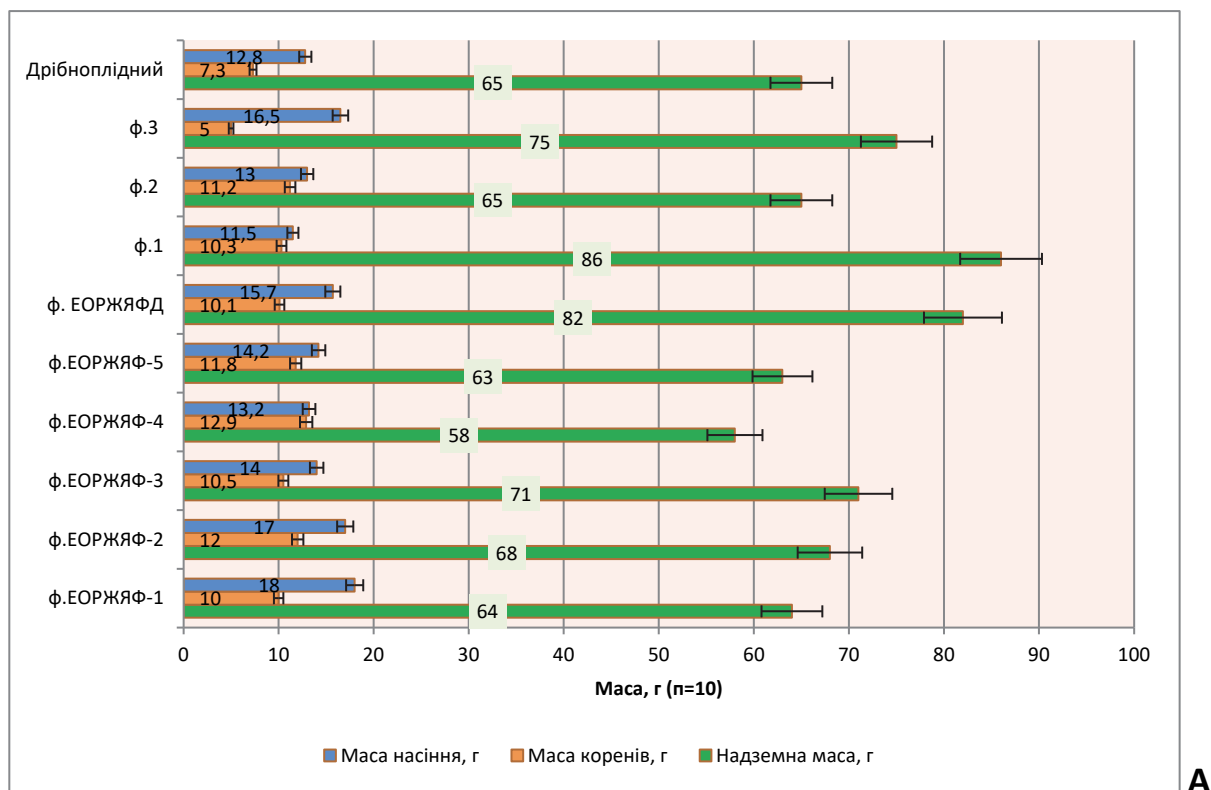
Довжина плоду становила від 7,2 до 9,0 мм. Найдовші плоди були характерні для сортів Руно, Перемога та Євро-12, найкоротші – у форми ЕОРЖЯФ-3, ріжю дрібноплідного та форми 4-ТФР.

Ширина плоду різних генотипів ріжю змінювалася від 3, 2 до 4,5 мм і була найбільшою у сорту Руно та ф. 1, найменшою – у ф. 3-ТФР та ф. ЕОРЖЯФ-3.

Товщина плоду становила від 3,4 до 4,2 мм. Найтовщими були плоди у ф. 3-ТФР та сорту Руно, найтоншими – у ф. 7-ТФР та с. Сунесон. Довжина носика плоду була різною і сягала від 1,0 до 2,1 мм. Найдовшим він був у ф. 3-ТФР та с. Ранок, найкоротшим – у с. Перемога та с. Міраж.

Таким чином, у період технічної стиглості висота рослин залежно від формових особливостей рослин змінюється від 62,5 до 94 см. Кількість бічних пагонів на рослині становить 3-12,6. Кількість стручків на основному стеблі сягає 22-44, на бічних пагонах – 13-29. За основними морфометричними параметрами встановлена суттєва перевага сортів Ранок і Руно.

Маса надземної частини, насіння та коренів була різною – залежно від генотипів рижую посівного ярого (рис. 4. 6, А-В).



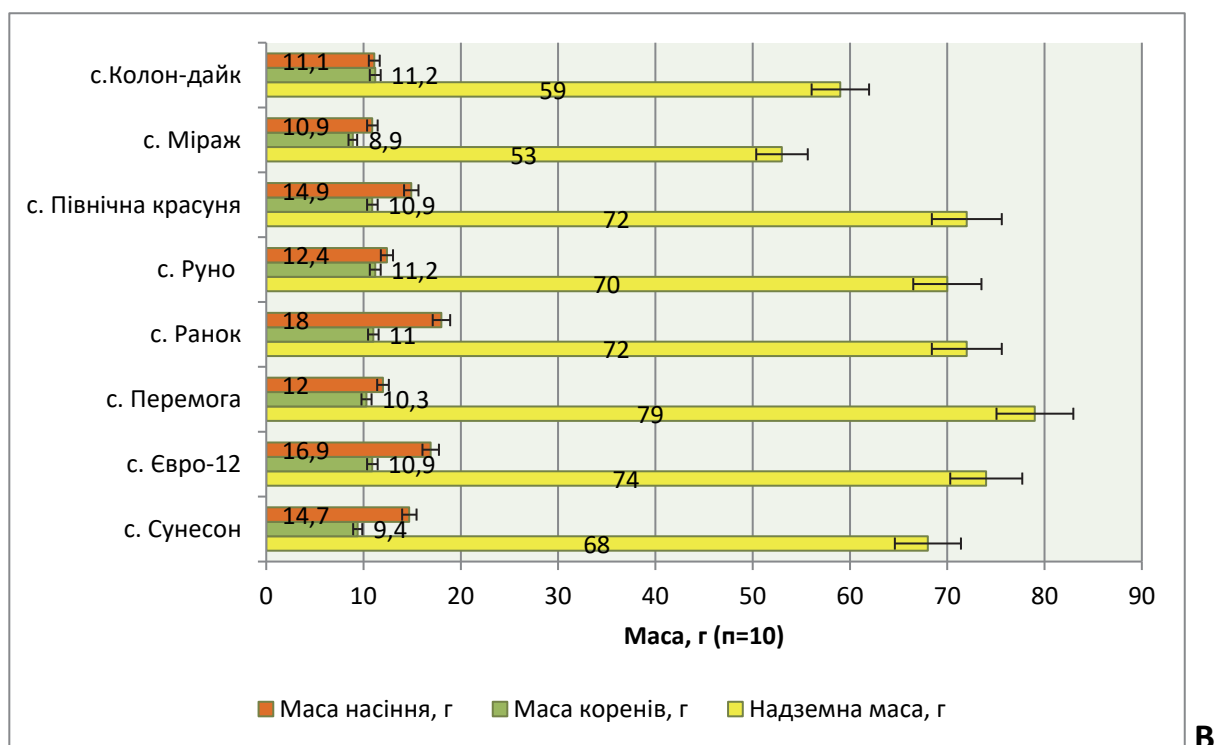


Рис. 4. 6 Маса надземної частини, насіння та коренів різних генотипів рижію посівного ярого у фазі плодоношення-дозрівання (А-В)

Надземна маса у різних генотипів рижію становила від 53 до 86 г на 10 рослин. Найбільшу фітомасу мали ф. 1 та ф. ЕОРЖЯФД, найменшу – с. Міраж.

Урожайність насіння рижію залежить від умов зростання, сорту, форми. Високі показники урожайності були отримані в Австрії (Lošák et al., 2011), на півдні Ефіопії (Manore, Yohanns, 2019). Низький рівень урожайності насіння рижію були зафіксовані в дослідженнях, проведених у Канзасі, Неваді, США (Obeng et al., 2019; Neupane et al., 2018; 2019).

В наших дослідженнях маса насіння сягала від 10,3 до 18,0 г з десяти рослин. Найбільшу масу насіння мали с. Ранок і ф. ЕОРЖЯФ-1, найменшу – ф. 7-ТФР.

Маса коренів у генотипів змінювалася від 5 до 12,9 г. Форма ЕОРЖЯФ-4 та ф. 7-ТФР вирізнялися найбільшою масою коренів, а ф. 3 – найменшою.

Насіння рижію дрібне. За літературними даними, маса 1000 насінин становить від 0,6 до 2,2 г залежно від сорту та умов вирощування (Obour et al., 2015; Vollmann et al., 2007).

В умовах досліджень залежно від формових і сортових особливостей рижію маса 1000 насінин було різною (рис. 4. 7).

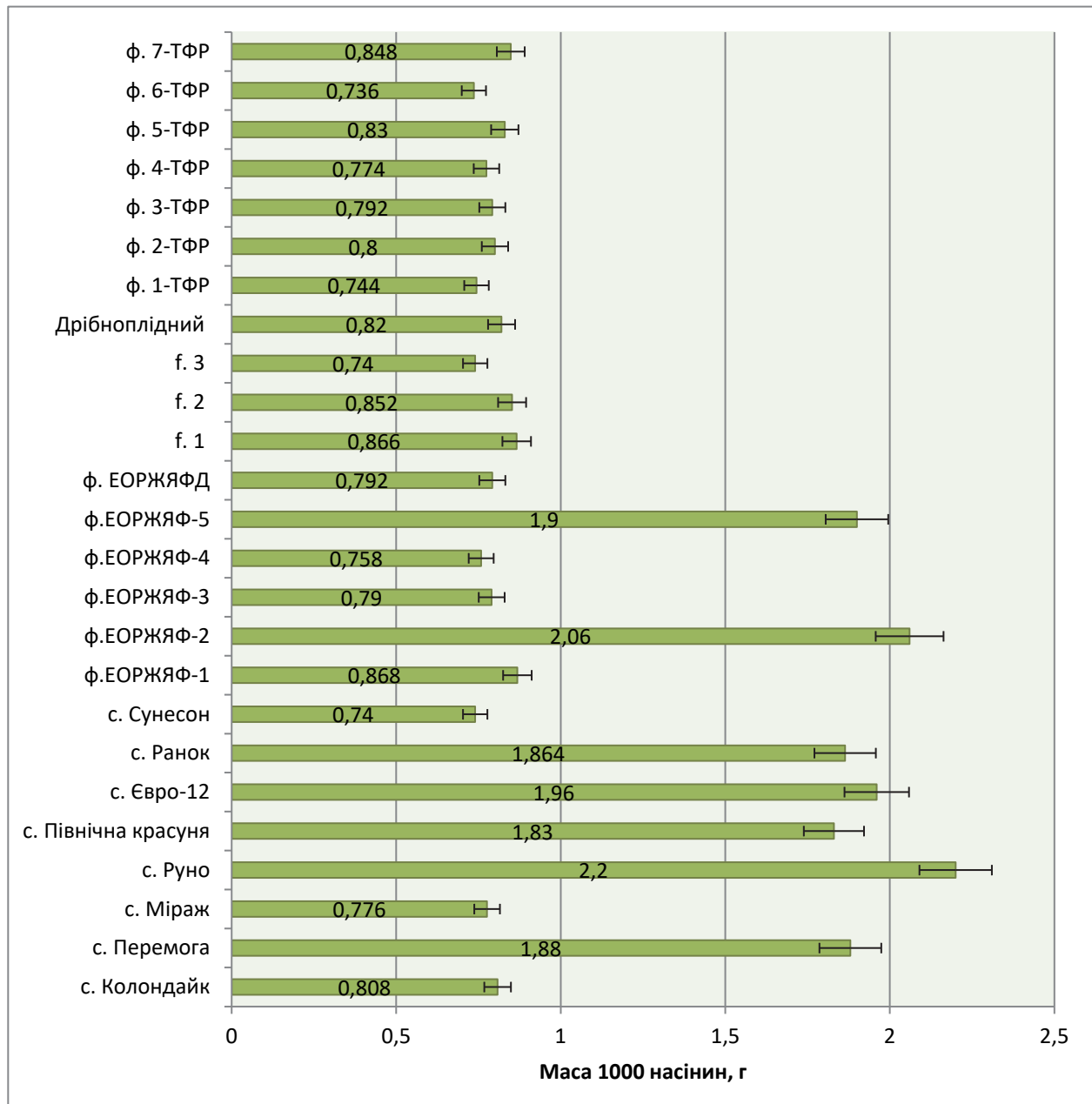


Рис. 4.7. Маса 1000 насінин різних генотипів рижію

В цілому, маса 1000 насінин різних генотипів рижію змінювалася від 0,74 до 2,2 г. Найбільша маса 1000 насінин була у сорта Руно та ф. ЕОРЖЯФ-2, найменша – у с. Сунесон і ф.3.

Зважаючи на велику різницю між генотипами за масою 1000 насінин необхідно виділити п'ять груп: перша група включає насіння з найменшою масою до 0,70 г, друга – меншою – 0,71-1,10, третя – середньою – 1,20-1,60, четверта – великою – 1,61-2,00, п'ята група – включає насіння з дуже великою масою – понад 2,10 г.

4. 2. Морфолого-біологічні особливості плодів та насіння рослин різних генотипів *Camelina sativa*

Вивчення морфолого-біологічних особливостей плодів та насіння рослин будь-якого виду, роду, або навіть родини дає можливість не лише простежити гетерогенність ознак різних генотипів, а також може бути додатковою інформацією в оцінці стійкості рослин до умов довкілля. Кількість, розміри, маса плодів та насіння з одного боку може виступати як критерій оцінки врожайності, з іншого боку – свідчити про здатність до самовідновлення у тих чи інших умовах інтродукції. Тому дослідження цих показників є важливим фактором у комплексі інших досліджень. З огляду на це було досліджено морфологічні особливості плодів та насіння різних генотипів рослин *Camelina sativa* інтродукованих з різних екологічних центрів, а також відібраних форм та створених сортів на базі відділу культурної флори НБС імені М.М. Гришка НАН України. Відомо, що плід у рослин *Camelina sativa* – стручок, утворений із двох плодолистиків, між якими утворюється плівчаста поздовжня перетинка матового забарвлення. Плоди світлого кольору мають жовтуватий відтінок, за формою оберненояйцеподібні (рис. 4. 8).

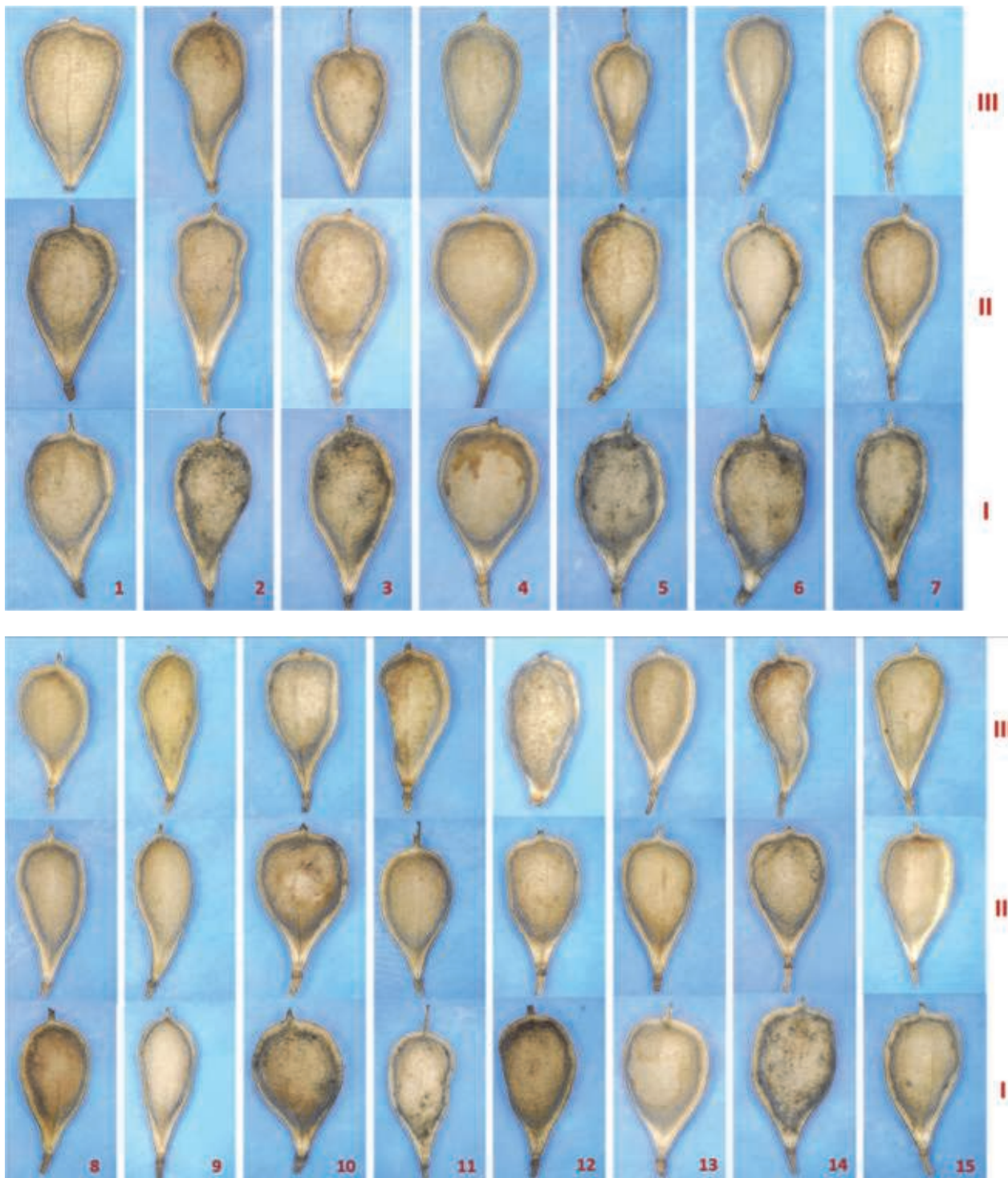


Рис. 4. 8. Морфологічні особливості плодів рослин *Camelina sativa* залежно від генотипових особливостей: I – базальна, II – латеральна, III – апікальна частини стебла; 1 – ф.1, 2 – ф. 2, 3 – ф. 3, 4 – с. Північна красуня, 5 – ф. ЕОРЖЯФЧ, 6 – ф. ЕОРЖЯФ-1, 7 – ф. ЕОРЖЯФ-2, 8 – ф. ЕОРЖЯФ-3, 9 – ф. ЕОРЖЯФ-4, 10 – ф. ЕОРЖЯФ-5, 11 – ф. ЕОРЖЯФД, 12 – с. Колондайк, 13 – с. Євро-12, 14 – с. Міраж, 15 – с. Перемога.

Детальний аналіз плодів рослин зокрема дослідження крупності та кількості насінин в одному з двох частин стручка дозволив виявити ряд

відмінностей і здійснити розподіл інтродуцентів на такі групи: крупнонасінні: ф. 1, с.з. Північна красуня, ф. ЕОРЖЯФ-1, ф. ЕОРЖЯФ-3 та ф. ЕОРЖЯФ-5; рослини із середньою крупністю насінин: ф.2, ф.3, ф. ЕОРЖЯФЧ, ф. ЕОРЖЯФ-2, с. Колондайк, с. Євро-12, с. Міраж, с. Перемога; дрібнонасінні: ЕОРЖЯФ-4 і ЕОРЖЯФД. Варто зазначити, що переважна більшість генотипів характеризуються досить численним вмістом насінин у стручку. Відмічено, що у рослин генотипів ф.1 та с. Євро-12, вирощених у вегетаційний період 2023 року, малонасінними виявилися плоди апікальної частини стебла, що скоріш за все було викликано низьким рівнем вологозабезпечення та високим рівнем температури повітря у період зав'язування насіння (рис. 4. 9).



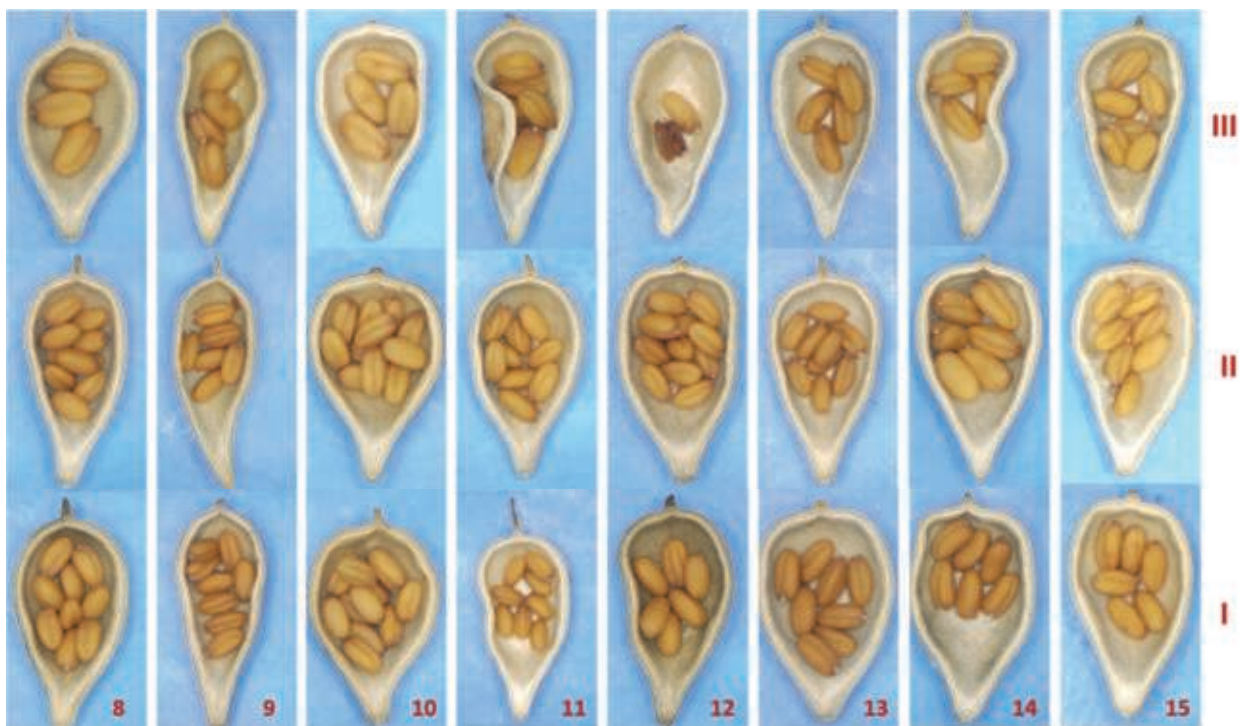
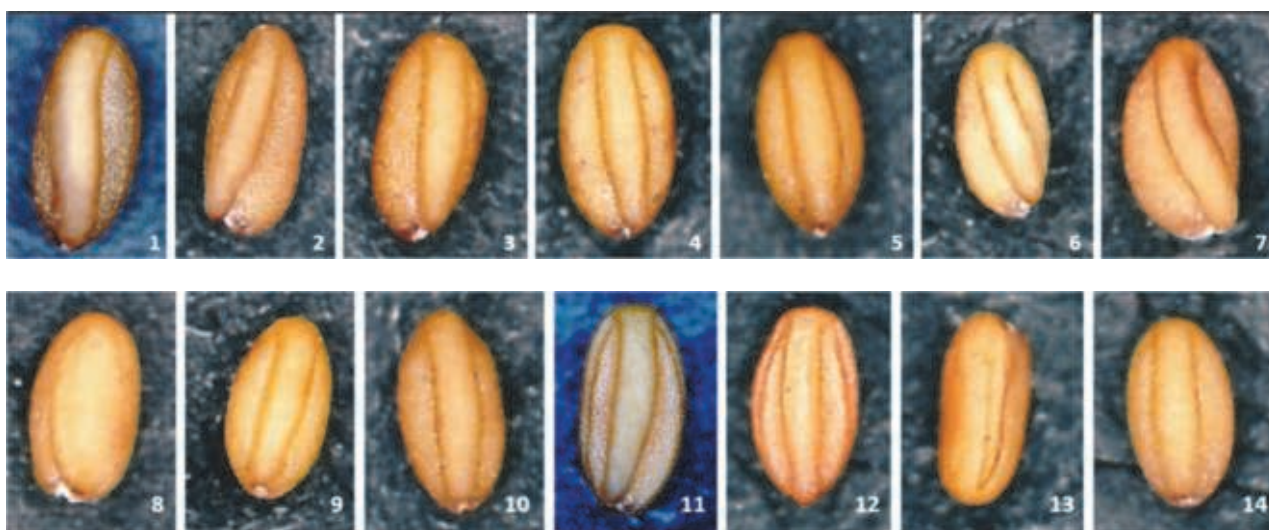


Рис. 4. 9. Наповненість насінням частини плоду рослин *Camelina sativa* залежно від генотипових особливостей: I – базальна, II – латеральна, III – апікальна частини стебла.

1 – ф.1, 2 – ф. 2, 3 – ф. 3, 4 – с. Північна красуня, 5 – ф. ЕОРЖЯФЧ, 6 – ЕОРЖЯФ-1, 7 – ЕОРЖЯФ-2, 8 – ЕОРЖЯФ-3, 9 – ЕОРЖЯФ-4, 10 – ЕОРЖЯФ-5, 11 – ЕОРЖЯФД, 12 – с. Колондайк, 13 – с. Євро-12, 14 – с. Міраж, 15 – с. Перемога.

Встановлено, що насіння характеризується відмінністю за формою, зокрема у рижію посівного ф. 2 (яра форма) на відміну від інших представників досить часто зустрічається насіння округлої форми (рис. 4. 10),



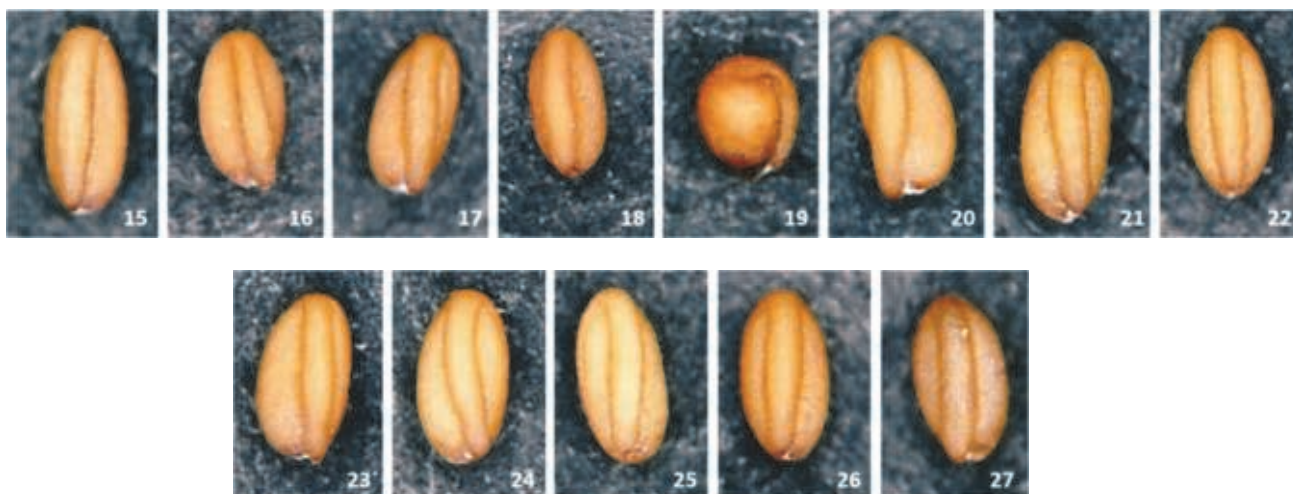


Рис. 4. 10. Морфологічні особливості насінини рослин *Camelina sativa* залежно від генотипів:

- 1 – дрібнонасінний (яра форма), 2 – крупнонасінний (яра форма), 3 – с.з. Євро-12 (озима форма), 4 – с.з. Богемський (озима форма), 5 – с.з. Перемога (озима форма), 6 – с. Євро-12 (яра форма), 7 – ф. 1-ТФР (яра форма), 8 – ф. 2-ТФР (яра форма), 9 – ф. 3-ТФР (яра форма), 10 – ф. 4-ТФР (яра форма), 11 – ф. 5-ТФР (яра форма), 12 – ф. 6-ТФР (яра форма), 13 – ф. 7-ТФР (яра форма), 14 – с. Колондайк (яра форма), 15 – с. Міраж (яра форма), 16 – с. Перемога (яра форма), 17 – с.з. Північна красуня (яра форма), 18 – ф. 1 (яра форма), 19 – ф. 2 (яра форма), 20 – ф. 3 (яра форма), 21 – ф. ЕОРЖЯФ-1 (яра форма), 22 – ф. ЕОРЖЯФ-2 (яра форма), 23 – ф. ЕОРЖЯФ-3 (яра форма), 24 – ф. ЕОРЖЯФ-4 (яра форма), 25 – ф. ЕОРЖЯФ-5 (яра форма), 26 – ф. ЕОРЖЯФД (яра форма), 27 – ф. ЕОРЖЯФЧ (яра форма).

у решти представників – еліптичної. Насінна ніжка щільно притиснута до насінини, вирівняна або її верхівка відведена в бік.

4. 3. Біохімічні особливості рослин різних генотипів *Camelina sativa*

Біохімічні показники, поряд з урожайними даними, є найважливішими під час оцінки якісних і кількісних характеристик рослин. Завдяки біохімічним критеріям можна встановити закономірності проходження продукційного процесу у рослин та накопичення вторинних метаболітів під час вегетування. Ці критерії дозволяють також оцінити стан рослин залежно від впливу біотичних та абіотичних факторів. Аналіз літератури і результати експериментальних досліджень свідчать про цінний біохімічний склад рослин, насіння та фітопродукції рижию.

З метою оцінки біохімічних показників рослин та насіння рижію і відбору найцінніших генотипів проведено дослідження з визначення вмісту основних органічних речовин у надземній фітомасі двадцяти п'яти різних біотипів у фазі плодоношення-дозрівання. На основі проведеного статистичного аналізу отриманих результатів виділено перспективні групи рослин за рівнем вмісту структурно-функціональних і біологічно активних сполук.

Виявлено, що усі генотипи *C. sativa* активно накопичують суху речовину, а це свідчить про сприятливість умов довкілля для проходження фізіолого-біохімічних процесів в організмі. У ході аналізу отриманих даних (рис. 4. 11) виділено наступні групи рослин щодо вмісту абсолютно сухої речовини: високий (понад 30%) – 14 генотипів; середній (від 27 до 30%) – 9 генотипів; низький (до 27%) – 2 генотипи. Найвищим вмістом абсолютно сухої речовини вирізнялась ф. ЕОРЖЯФ-1 – 34,57%, найменшим – с. Сунесон – 25,53%.

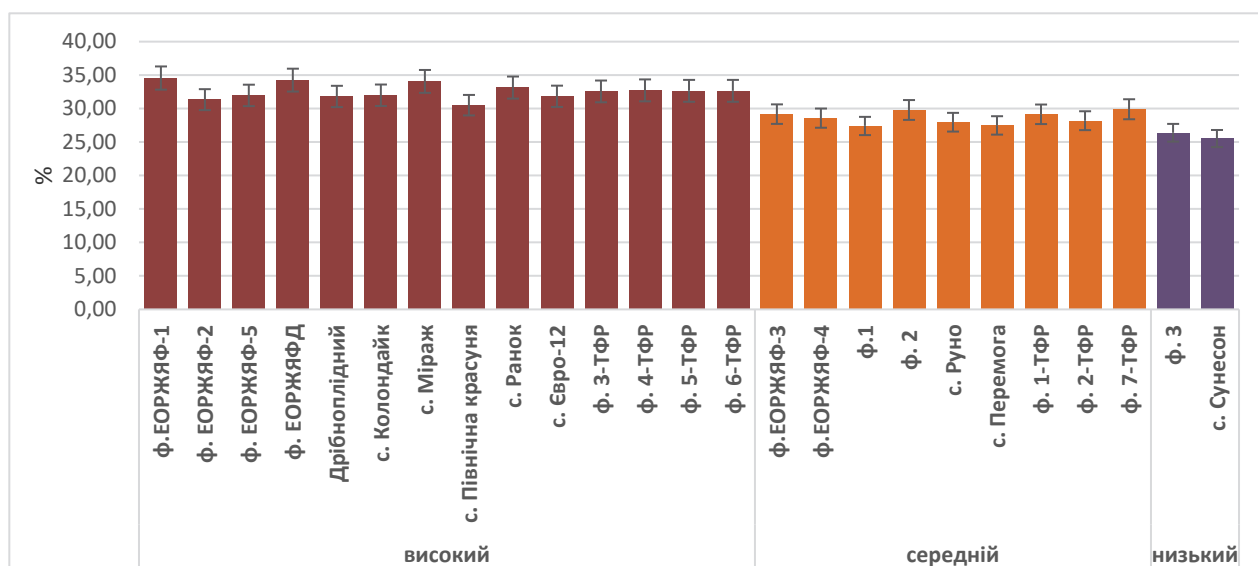


Рис. 4. 11. Вміст абсолютно сухої речовини у надземній фітомасі рослин різних генотипів *Camelina sativa* у фазі плодоношення-дозрівання

Аналіз вмісту загальних цукрів у надземній фітомасі рослин (рис. 4. 12) дозволив розподілити генотипи на наступні групи: дуже високий (понад 10 %) – 1 генотип; високий (від 8 до 10 %) – 5 генотипів; середній (від 4 до 8 %) – 16 генотипів; низький (до 4 %) – 3 генотипи.

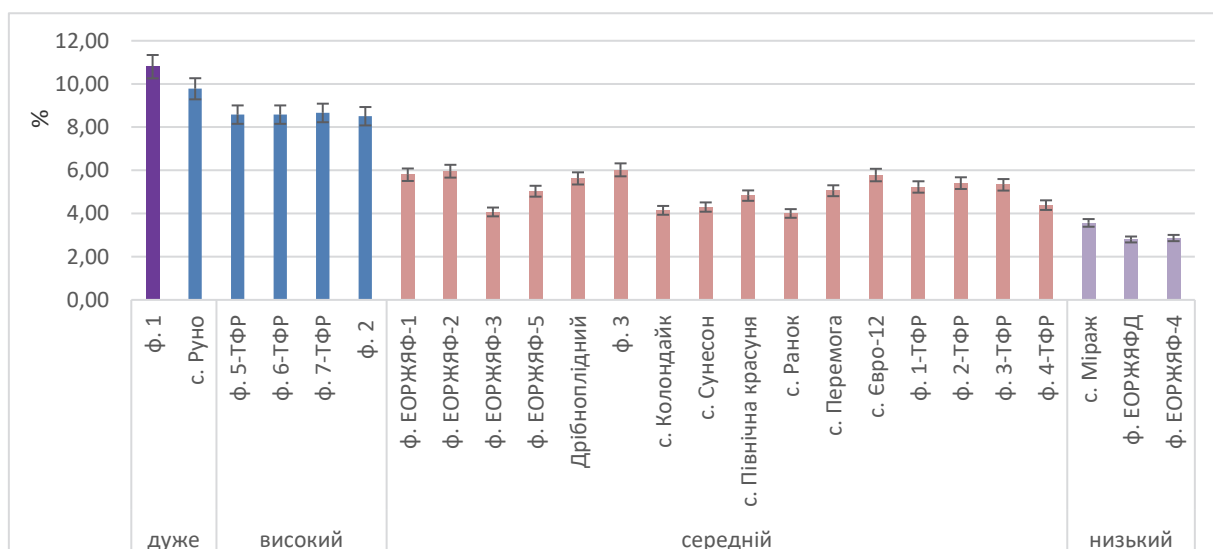


Рис. 4. 12. Загальний вміст цукрів у надземній фітомасі рослин різних генотипів *Camelina sativa* у фазі плодоношення-дозрівання

Найвищим вмістом вуглеводнів з-поміж усіх генотипів виявилась форма 1 – 10,80%, найменшим форма ЕОРЖЯФД – 2,80%.

Поряд із загальними цукрами вивчено вміст моноцукрів (рис. 4. 13), який дозволив розподілити досліджувані генотипи на наступні групи: дуже високий (понад 6 %) – 2 генотипи; високий (від 4,5 до 6 %) – 5 генотипів; середній (від 3 до 4,5 %) – 10 генотипів; низький (до 3 %) – 8 генотипів. Серед досліджуваних рослин найвищий вміст моноцукрів встановлено у ф. 2 – 6,66 %, найменший у с. Сунесон – 2,46 %.

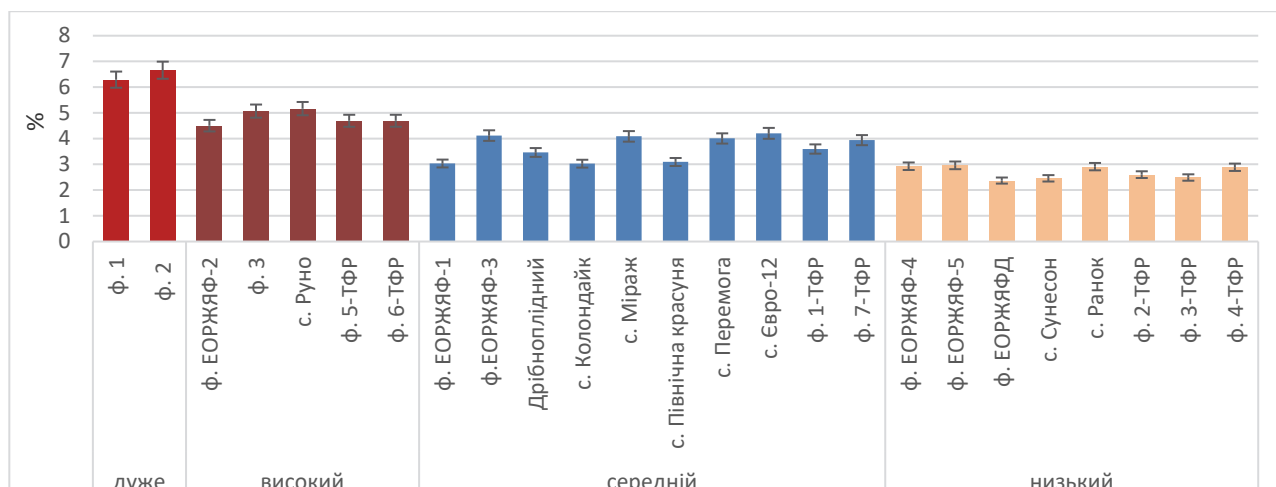


Рис. 4. 13. Вміст моноцукрів у надземній фітомасі рослин різних генотипів *Camelina sativa* у фазі плодоношення-дозрівання

Дослідження вмісту аскорбінової кислоти також продемонстрував відмінність динаміки її накопичення у рослин (рис. 4. 14) і дозволив виокремити наступні їх групи: генотипи з високим вмістом (понад 100 мг%) – 5 форм та 1 сорт; середнім (від 70 до 100 мг%) – 3 сорти та 5 форм; низький (до 70 мг%) – 8 форм і 4 сорти. Найвищий вміст вітаміну С зафіксовано у ф. 7-ТФР – 123,84 мг%, найменший – у ф. ЕОРЖЯФ-1 – 38,51 мг%.

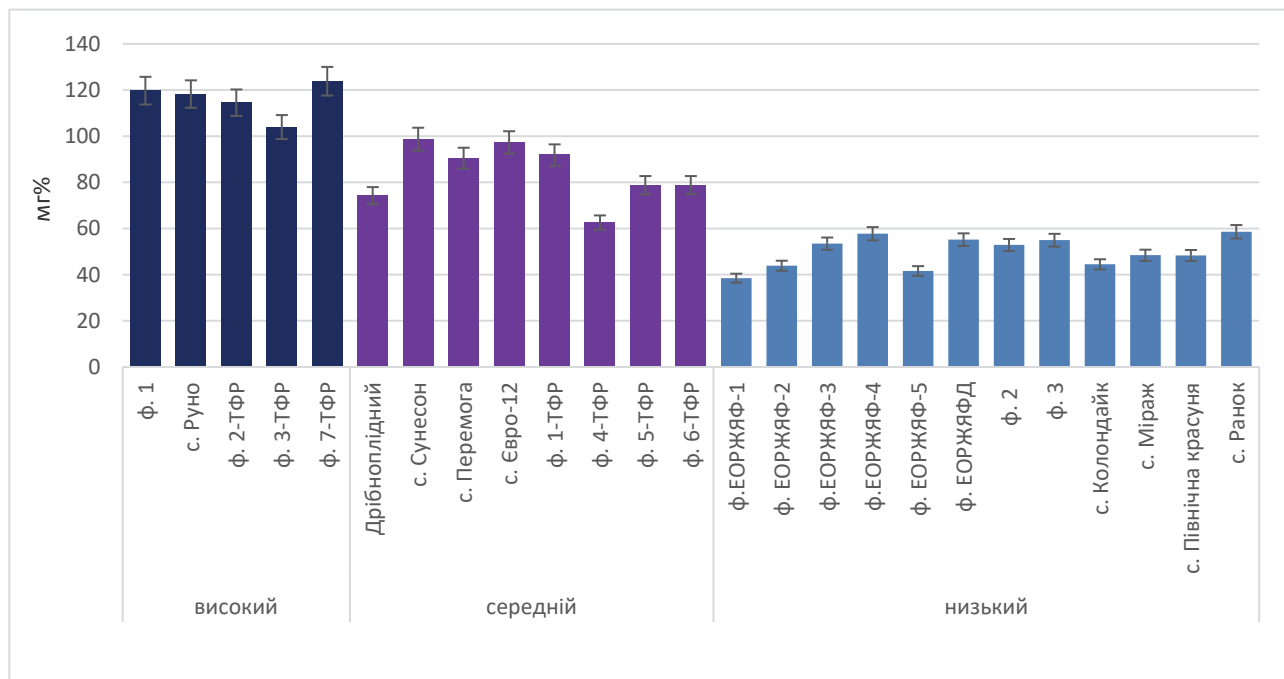


Рис. 4. 14. Вміст аскорбінової кислоти у надземній фітомасі рослин різних генотипів *Camelina sativa* у фазі плодоношення-дозрівання

Варто зазначити, що значна кількість генотипів *C. sativa* активно накопичують дубильні речовини (рис. 4. 15). Біохімічні дослідження надземної фітомаси дозволили простежити динаміку їх акумулювання і розподілити інтродуценти на наступні групи щодо вмісту дубильних речовин: високий (понад 2 %) – 10 форм та 6 сортів; середній (від 1 до 2 %) – 6 форм та 2 сорти; низький (до 1 %) – 1 форма. Найвищим вмістом дубильних речовин характеризувалась ф. 2-ТФР – 3,92 %, найменшим – ф. 2 – 0,98 %.

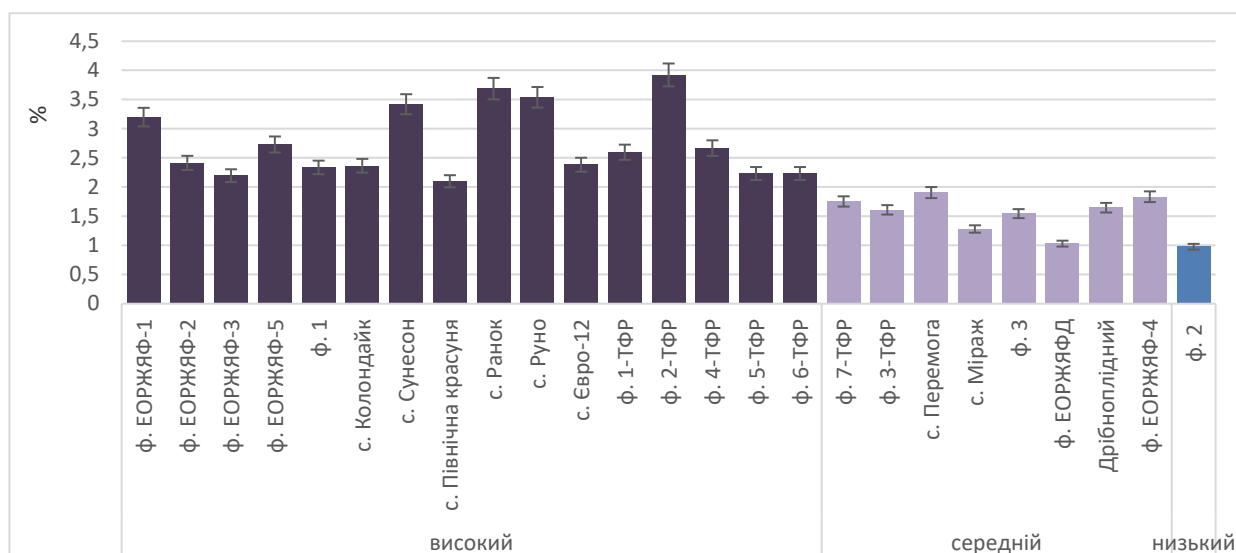


Рис. 4. 15. Вміст дубильних речовин у надземній фітомасі рослин різних генотипів *Camelina sativa* у фазі плодоношення-дозрівання

Установлено, що усі досліджувані інтродуценти *C. sativa* майже однаково накопичують у надземній частині вільний азот. Статистичний аналіз отриманих даних дозволив виявити відмінності у накопиченні вільного азоту в цих генотипів та розподілити їх на дві групи: рослини з високим вмістом (понад 2 %) – 23 таксони; середнім вмістом (від 1 до 2 %) – дві форми. Найвищий вміст азоту зафіксовано у рослин с. Міраж – 2,90 %, найменший – у ф. ЕОРЖЯФ-2 – 1,98 % (рис. 4. 16).

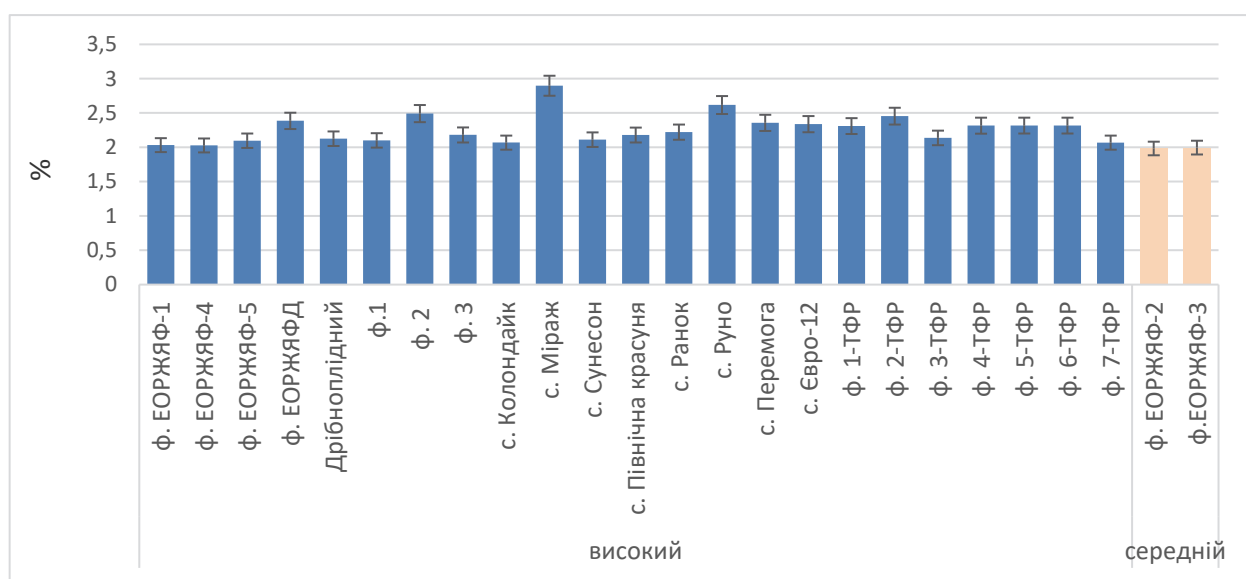


Рис. 4. 16. Вміст вільного азоту в надземній фітомасі рослин різних генотипів *Camelina sativa* у фазі плодоношення-дозрівання

Вивчено титровану кислотність рослинної сировини та вміст мінеральних речовин на основі чого встановлено, що рослини майже не відрізняються за динамікою їхнього накопичення (рис. 4. 17). За титрованою кислотністю найвищим вмістом виділявся с. Колондайк (2,05%), золи – рижий дрібноплідний (8,06 %), кальцію – с. Сунесон (2,33 %), фосфору – ф. ЕОРЖЯФ-1 (1,89 %).

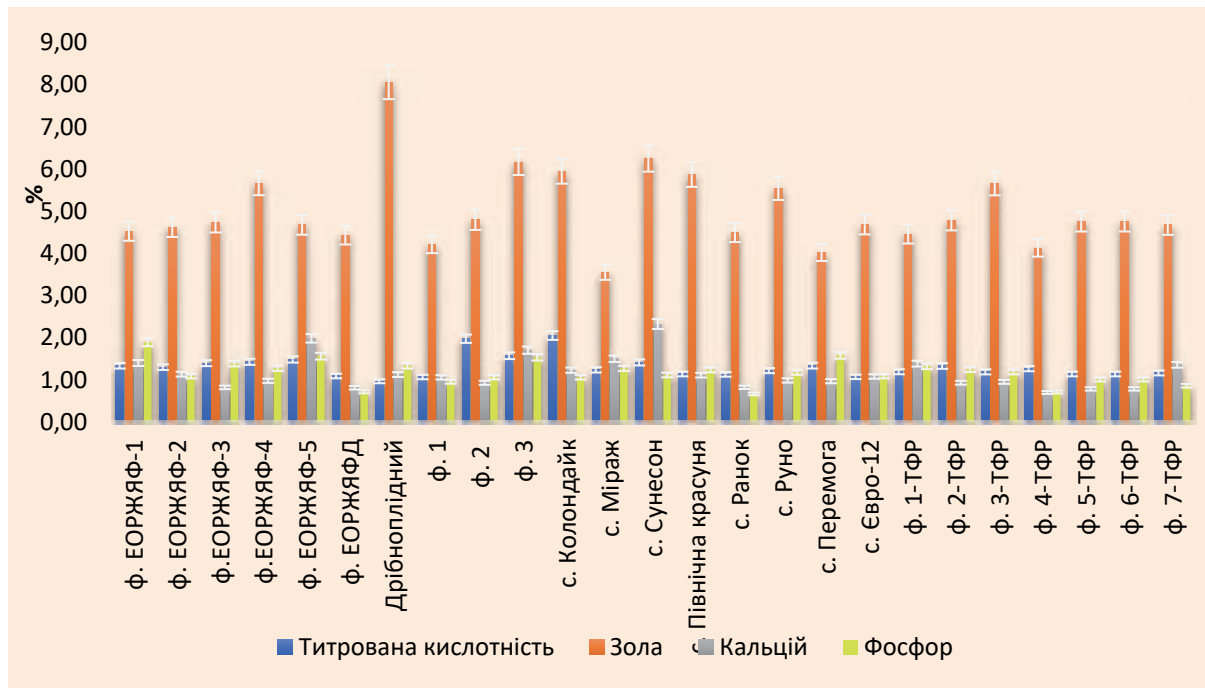


Рис. 4. 17. Титрована кислотність і вміст мінеральних речовин у надземній фітомасі рослин різних генотипів *Camelina sativa* у фазі плодоношення-дозрівання

Важливим для будь-якої олійної культури є визначення вмісту ліпідів, що дозволяє виокремити найбільш перспективні генотипи для їх широкого впровадження у виробництво. Проведено оцінку олійності надземної фітомаси найбільш перспективних генотипів *C. sativa*, в ході чого виокремлено наступні групи за олійністю рослин: високий (понад 10 %) – с. Колондайк і с. Міраж; середній (від 7 до 10 %) – ф. ЕОРЖЯФ-4 та ф. ЕОРЖЯФ-1; низький (до 7 %) – ф. ЕОРЖЯФ-3 й ф. 2. Найвищий вміст ліпідів фіксували у с. Колондайк – 12,51 %, найменший – у ф. ЕОРЖЯФ-3 – 6,51 % (рис. 4. 18).

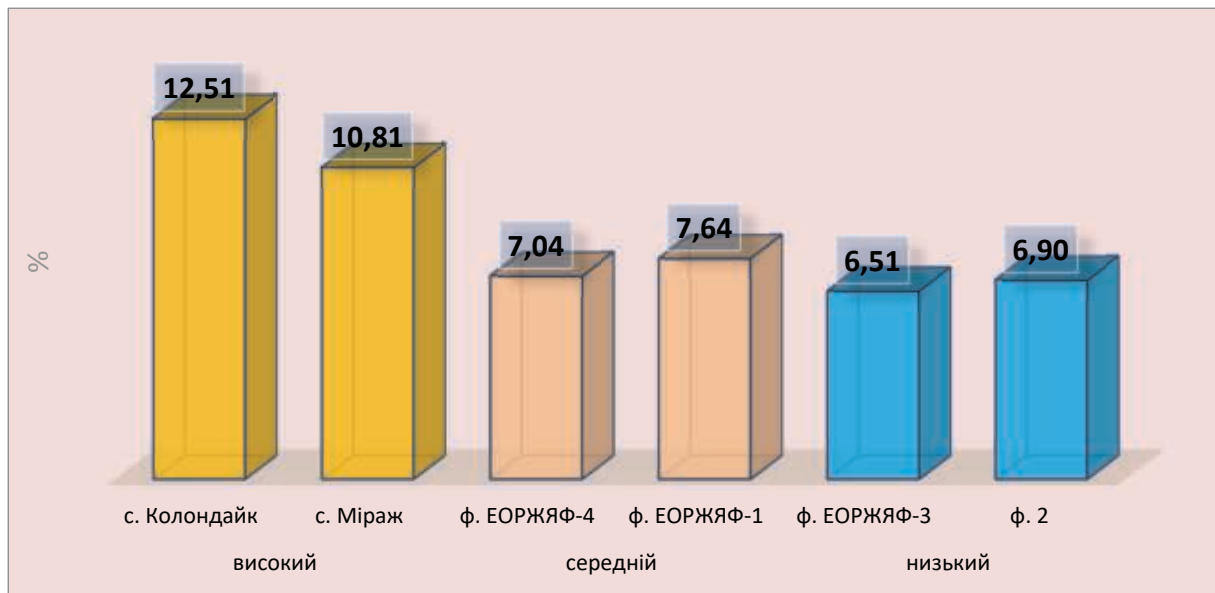


Рис. 4. 18. Вміст ліпідів у надземній фітомасі рослин різних генотипів *Camelina sativa* у фазу плодоношення-дозрівання

Одним із найважливіших показників продуктивності олійної культури є виробництво олії з одиниці маси та з урожаю. В насінні рижю вміст олії широко варіювався під час досліджень у різних частинах світу, при цьому загальний середній вміст олії становив близько 36 %. Найвищий вміст олії у насінні було встановлено у межах 39,8–45,7 % у Чилі (Berti et al., 2011), 45 % в Арізоні, США (Hunsaker et al., 2012) і 38–43 %, на заході Канади (Gugel et al., 2006). Низький вміст олії у насінні рижю відзначено в Неваді, США – від 25,7 до 31,8 % (Lohaus et al., 2020).

Результати багаторічних досліджень свідчать про те, що вміст олії у насінні залежить від генотипових, сортових особливостей рослин, але суттєво змінюється від місця проведення досліджень, типу ґрунтів, умов вегетації за роками, агробіотехнологій та використання біологічно активних стимуляторів росту, мікробіологічних препаратів тощо. Серед численних генотипів відібрано форми з найвищим вмістом ліпідів (36,04-43,89 %) у насінні та з великим виходом урожаю (до 1000 кг/га).

За результатами досліджень, проведених за вегетаційний період 2023 року, найвищий вміст олії у насінні становив 39,48 % (с. Руно), а найнижчий (24,09 %) – у форми 6-ТФР (рис. 4. 19).

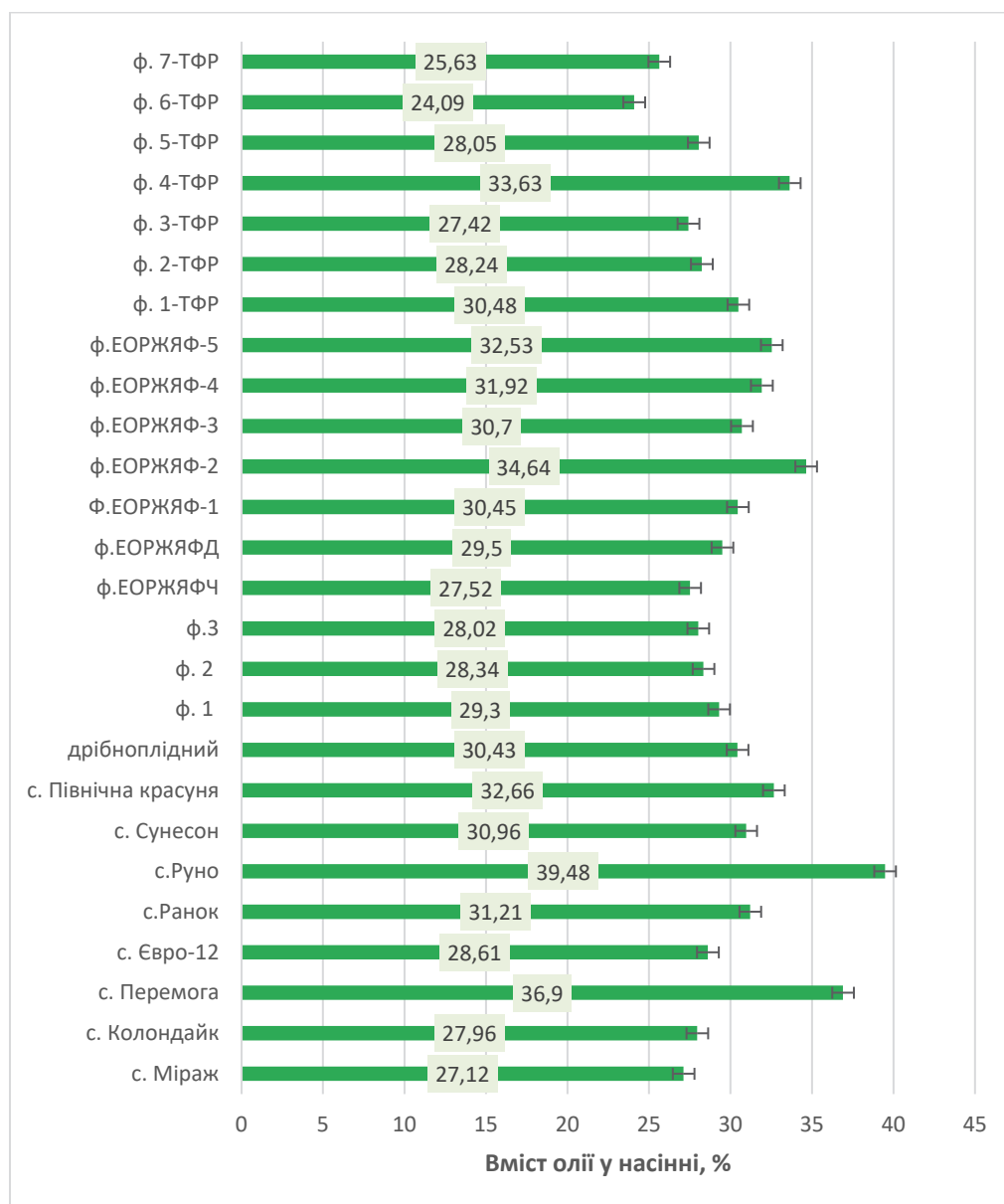


Рис. 4. 19. Вміст олії у насінні різних генотипів *Camelina sativa*

Зважаючи на результати проведених досліджень із визначення олійності насіння рижію у різні періоди, запропоновано розподіл генотипів на наступні групи: 1) дуже низький (вміст олії до 24 %); низький (25-29 %), середній (30-35 %), високий (36-40 %), дуже високий (понад 41 %).

4. 4. Біохімічний склад олії рижю посівного та гірчиці ефіопської

Підвищення продуктивності економічно важливих олійних культур родини *Brassicaceae* сприятиме створенню збалансованих харчових продуктів, цінних лікарських засобів на основі їх ліпідів та олій технічного призначення.

На сьогодні актуальним є запровадження у сільськогосподарське виробництво нетрадиційних та нових високопродуктивних олійних рослин, здатних не лише конкурувати з ріпаком, але й переважати його за важливими характеристиками як джерела якісної харчової олії. До таких перспективних олійних культур можна віднести рижю посівну (*Camelina sativa*) та гірчицю ефіопську (*Brassica carinata*) родини *Brassicaceae*.

За результатами досліджень проведено аналіз олії генетично різноманітних сортів і селекційних ліній рижю – 26 зразків, а також гірчиці ефіопської – 8 зразків.

Проведено скринінг літературних та інформаційних джерел, підібрано й опрацьовано методики. Відомо, що найбільш достовірними показниками, які характеризують якість і автентичність олії та олійно-жирової сировини є жирнокислотний та ацилгліцериновий склади, а також параметри стеринової фракції, які визначають хроматографічними і спектрометричними методами.

Методика визначення жирнокислотного складу рослинних олій. Для проведення аналізу жирно-кислотного складу рослинних олій взято за основу методичні підходи в аналізі молочного жиру та його сумішей із чужорідними рослинними оліями за вмістом транс-ізомерів ненасичених жирних кислот і CLA.

Використано іноземні наукові праці та чинний НД щодо аналізу чистих рослинних олій і жирів, адже у вітчизняних чинних НД розділення ізомерів жирних кислот не враховано (Animal and vegetable ..., 1988, 2014, 2015, 2017, 2018; Dionisi et al., 2002; Жир молочний. Виявлення ..., 2002; Жири та олії ..., 2003; Рудаков, 2004; Anhydrous milk ..., 2006; Destailats et al., 2007; Draft

International Standart ..., 2008; Жири тваринні ..., 2010; Milk fat ..., 2010; Жир молочний. Метод ..., 2011; Milk fat – Determination ..., 2013; Жирнокислотний, стеринний ..., 2020).

Методика проведення аналізу жирнокислотного складу рослинних олій із розділенням ізомерів ненасичених жирних кислот включає такі етапи:

- аналіз проб зразків методом капілярної газової хроматографії;
- ідентифікація жирних кислот.

Зразок рослинної олії (у віалі) піддавали хроматографічному аналізу. Аналізували на газовому хроматографі HP 6890 фірми HEWLETT PACKARD з автоматичним інжектором з діленням потоку (*split*), оснащеному термостатом колонки з програмуванням температури, полум'яно-іонізаційним детектором і комп'ютерною системою зі спеціальним програмним забезпеченням для автоматичного інтегрування та ідентифікації піків ChemStation Ver.A.06.03.

Для газохроматографічного розділення підібрано такі оптимальні умови:

Програма термостата колонки: 60°C (7,5хв), 4°C/хв→150°C (10хв), 3°C/хв→180°C (5хв), 3°C/хв→190°C (2хв), 3°C/хв→230°C (2хв), 4°C/хв→245°C (6,59хв).

Інжекційна система з діленням потоку (*split*): початкова температура – 280°C; тиск – 33,41 psi; коефіцієнт ділення потоку (*split ratio*) – 100:1; потік ділення – 119,9 мл/хв; загальний потік – 123,9 мл/хв.

Газ-носії – гелій; потік газу-носія – 1,2 мл/хв.

Капілярна колонка SP-2560 з високополярною нерухомою фазою – біс-цианопропілполісилоксаном (незв'язаним): довжина 100 м, діаметр 0,25 мм, товщина плівки 0,2 мкм, з максимальною робочою температурою 250°C.

Детектор полум'яно-іонізаційний (ПІД): температура – 290°C; потік водню – 30 мл/хв; потік повітря – 300 мл/хв; допоміжний потік – 20 мл/хв; допоміжний газ – азот.

Об'єм введеної проби – 1,0 мкл.

Концентрація проби – 20,0 мг/мл.

Загальний час аналізу – 86,01 хв.

Жирні кислоти ідентифікували за часом утримання відповідно до часу утримання стандартної (еталонної) суміші (метод порівняння). Кількісний склад суміші визначили методом внутрішньої нормалізації, коли сума площ всіх піків приймається за 100% і концентрація будь-якого компонента проби розраховується як відносна площа піка

$$C_i (\%) = (S_i K_i / \sum S_i K_i) 100,$$

де, S_i – площа відповідного піка;

K_i (або R_f) – калібрувальний коефіцієнт;

$\sum S_i K_i$ – сума добутків площ піків на відносні поправочні коефіцієнти для усіх піків хроматограми.

Оптимальні умови розділення жирних кислот, у тому числі і їхніх ізомерів, було підтверджено за допомогою калібрування колонки стандартною сумішшю метилових ефірів жирних кислот, шляхом визначення абсолютного та відносного R_f і відгуку (чутливості) ПІД для кожного компонента стандартної суміші, що виражається значенням FID-factor за формулою

$$FID = M / (n_x - 1) (AW_c) (FID_{16:0}),$$

де, M – молекулярна маса метилових ефірів жирних кислот;

$(n_x - 1)$ – число атомів С в жирній кислоті;

AW_c – молекулярна маса карбону (12,01);

$FID_{16:0}$ – коефіцієнт кореляції для пальмітинової кислоти(16:0), що дорівнює 1,407.

Абсолютний R_f визначається за формулою:

$$R_f = S_1 M R_2 / S_2 M R_1,$$

де, S_1 і S_2 – площі піків двох розділених компонентів;

$M R_1$ і $M R_2$ – їхні відносні масові частки.

Відносний R_f визначається відносно піку.

Результати досліджень та їх обговорення. Важливу роль у визначенні напряму використання олії відіграє її жирно-кислотний склад. Проведено біохімічні дослідження з визначення жирно-кислотного складу рослинних олій. Біохімічному аналізу підлягали зразки жирної олії представників родини *Brassicaceae*. Ми дослідили жирнокислотний склад олій з насіння різних форм *Camelina sativa* і *Brassica carinata*, внаслідок чого проаналізовано 26 зразків олії ріжю (Додаток Б) та 8 зразків жирної олії гірчиці ефіопської (Додаток В). Для їхньої ідентифікації використано дані моніторингу, отриманих шляхом наукових досліджень олії ріжю з різних регіонів України (табл. 4.1). Для ідентифікації олії гірчиці використано дані моніторингу за стандартизованим методом (табл. 4. 2). Встановлено, що отримані дані не перевищують діапазони коливань вмісту жирних кислот.

Таблица 4. 1

Жирнокислотний склад олії ріжю (*Camelina sativa*)

Найменування та позначення кислоти	Відносна масова частка жирних кислот, % від загальної суми		
	Ттипий вміст	ожливі коливання	
		від	до
1	2	3	4
Міристинова (C14:0)	0,06	0	0,1
Пальмітинова (C16:0)	5,7	5,0	7,3
Пальмітолеїнова (C16:1)	0,1	0,1	1,6
Стеаринова (C18:0)	2,4	2,0	3,9
Олеїнова (C18:1)	16,9	12,0	19,3
Лінолева (C 18:2)	19,3	15,5	21,0
Ліноленова (C18:3)	33,9	22,8	33,9
Арахінова (C 20:0)	1,3	1,2	2,5
Гондоїнова (C 20:1)	14,1	13,3	16,0
Ейкозадієнова (C20:2)	1,8	1,7	2,9
Ейкозатрієнова (C20:3)	1,2	0,4	1,6
Бегенова (C 22:0)	0,3	0,2	1,1
Ерукова (C22:1)	2,7	1,5	3,0
Насичені	9,8	9,0	14,9
Мононенасичені	33,8	30,0	36,6
Поліненасичені	56,1	42,9	56,1

Таблиця 4. 2

Жирнокислотний склад олії гірчиної за ДСТУ 4598

Найменування та позначення кислоти	Відносна масова частка жирних кислот, % від загальної суми			
	Типовий вміст		Можливі коливання	
	з білої гірчиці	з чорної гірчиці	від	до
Міристинова (C14:0)	0,06	0,07	0,0	1,0
Пальмітинова (C16:0)	2,73	3,26	0,5	4,5
Пальмітолеїнова (C16:1)	0,12	0,18	0,0	0,5
Стеаринова (C18:0)	0,90	1,44	0,5	2,0
Олеїнова (C18:1)	19,65	21,7	8,0	23,0
Лінолева (C 18:2)	8,70	21,7	10,0	24,0
Ліноленова (C18:3)	11,10	12,2	6,0	18,0
Арахінова (C 20:0)	0,63	0,95	0,0	1,5
Гондоїнова (C 20:1)	9,24	12,05	5,0	13,0
Ейкозадієнова (C20:2)	0,30	0,99	0,0	1,0
Бегенова (C 22:0)	0,54	0,5	0,2	2,5
Ерукова (C22:1)	42,39	22,53	22,0	50,0
Докозадієнова (C22:2)	0,30	0,39	0,0	1,0
Лігноцеринова (C 24:0)	0,34	0,32	0,0	0,5
Нервонова (C24:1)	2,68	1,19	0,5	2,5
Насичені	5,2	6,5	1,2	12,0
Мононенасичені	74,1	57,7	35,5	89,0
Поліненасичені	20,4	35,3	16,0	44,0

Найбільш достовірними показниками, які характеризують якість і автентичність олії й олійно-жирової сировини є жирнокислотний і ацилгліцериновий склади, а також параметри стеаринової фракції, які визначають хроматографічними та спектрометричними методами.

Як свідчать результати порівняльного аналізу за різні періоди досліджень для всіх форм рослин *Camelina sativa* характерним є високий вміст лінолевої (від 31,4 до 35,6 %), лінолевої (від 19,8 до 24,6 %), олеїнової (від 11,9 до 18,5 %), гондоїнової (11-ейкозенової) (від 9,5 до 12,9 %), пальмітинової (9,5-11,4 %) жирних кислот.

Поліненасичена ліноленова кислота, що належить до ω -3, у

досліджуваних форм і сортів міститься у значній кількості, найбільший показник яких наближався до 36 % від суми жирних кислот.

Лінолева кислота відносена до так званих незамінних жирних кислот, необхідних для нормальної життєдіяльності організму. У людини вона засвоюється з тригліцеридів та фосфатидів. Найбільший її вміст становив 24,7 %. Важливу функцію має також пальмітинова кислота – це основна насичена жирна кислота, що міститься в грудному молоці та дитячих сумішах (до 45-50 %). У досліджуваних нами оліях найбільший її вміст виявлено на рівні 11,4%.

РОЗДІЛ 5.

БІОЛОГО-МОРФОЛОГІЧНІ, БІОХІМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА ПРОДУКТИВНІСТЬ МОБІЛІЗОВАНИХ І СТВОРЕНИХ ГЕНОТИПІВ РОСЛИН *BRASSICA CARINATA* A. BRAUN В УМОВАХ ІНТРОДУКЦІЇ У ПРАВОБЕРЕЖНОМУ ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ

5.1. Ростові особливості та продуктивність мобілізованих і створених генотипів рослин *Brassica carinata*

Внаслідок проведених інтродукційних, генетико-селекційних і біотехнологічних досліджень зібрано цінну генофондову колекцію капусти кількоподібної або гірчиці ефіопської (*Brassica carinata*) – близько 30 зразків.

За період виконання роботи з мобілізованого та створеного генофонду *Brassica carinata* ми відібрали 17 перспективних зразків для проведення подальших комплексних досліджень і визначення ростового, фотосинтетичного та біопродуктивного потенціалу рослин. Протягом багаторічного періоду у відділі культурної флори Національного ботанічного саду імені М.М. Гришка НАН України створена унікальна за якісним і кількісним складом колекція олійних рослин, яка включає понад 200 таксонів. У цьому колекційному фонді є генотипова колекція *Camelina sativa*, яка нараховує близько 40 зразків. На основі цього вихідного матеріалу різними селекційними методами виведено понад 10 ярих та 5 озимих форм рослин. Слід зазначити, що у 2024 році до Державної служби з сортовипробування вперше було передано сорт Новинка капусти кількоподібної (номер заяви № 2025686001) та Лідер рижію посівного озимої форми (№ 23043001 від 23.01.2024).

У ході досліджень були виявлені морфолого-біологічні особливості різних генотипів рослин відібраних форм капусти кількоподібної або гірчиці ефіопської (*Brassica carinata*). Встановлено, що рослини проходять усі етапи органогенезу за один вегетаційний період (сходи, перший справжній листок,

розетка, стеблуння, бутонізація, квітування, плодоношення та дозрівання) (рис. 5. 1-5. 4). Тривалість вегетаційного періоду становить від 115 до 123 діб залежно від генотипу.



Рис. 5. 1. Фаза росту і розвитку рослин *Brassica carinata*: розетка листків



Рис. 5. 2. Фаза росту і розвитку рослин *Brassica carinata*: початок формування генеративних пагонів



Рис. 5. 3. Фаза росту і розвитку рослин *Brassica carinata*: початок масового квітування



Рис. 5. 4. Фаза росту і розвитку рослин *Brassica carinata*: дозрівання насіння

При невчасному збиранні насіння рослин *Brassica carinata* частина його осипається і дружно проростає: у вересні-жовтні утворюється суцільний травостій (рис. 5. 5.). Проте пізніше, з настанням морозів, рослини повністю гинуть.



Рис. 5. 5. Самосів насіння рослин *Brassica carinata* після збирання врожаю (вересень-жовтень)

Вивчення біометричних показників на початкових етапах онтогенезу рослин дозволяє встановити темпи росту надземних та підземних вегетативних органів. У зв'язку з цим були досліджені лінійні розміри пагонів та кореня восьми природних форм рослин *Brassica carinata* і дев'яти відібраних селекційно-генетичних зразків у різні фази розвитку рослин. За результатами аналізу отриманих даних щодо лінійних розмірів рослин у фазі стеблуння (рис. 5.6, 5.7) встановлено, що різниця між інтенсивністю наростання надземної частини досліджуваних генотипів є значною, що дозволяє поділити їх на три групи: високорослі (понад 51 см) до них належать: BC SCF-9, BC SCF-7, BC SCF-3, BC SCF-2, BC SCF-4 (представлені зразками лише селекційно-генетичних рослин); середньорослі (від 31 см до 50 см): BC NPF-4, BC NPF-2, BC NPF-1, BC NPF-3, BC SCF-1, BC SCF-5, BC SCF-8, BC SCF-6; низькорослі (до 30 см): BC NPF-7, BC NPF-6, BC NPF-5, BC NPF-8 (представлені виключно рослинами природного походження).

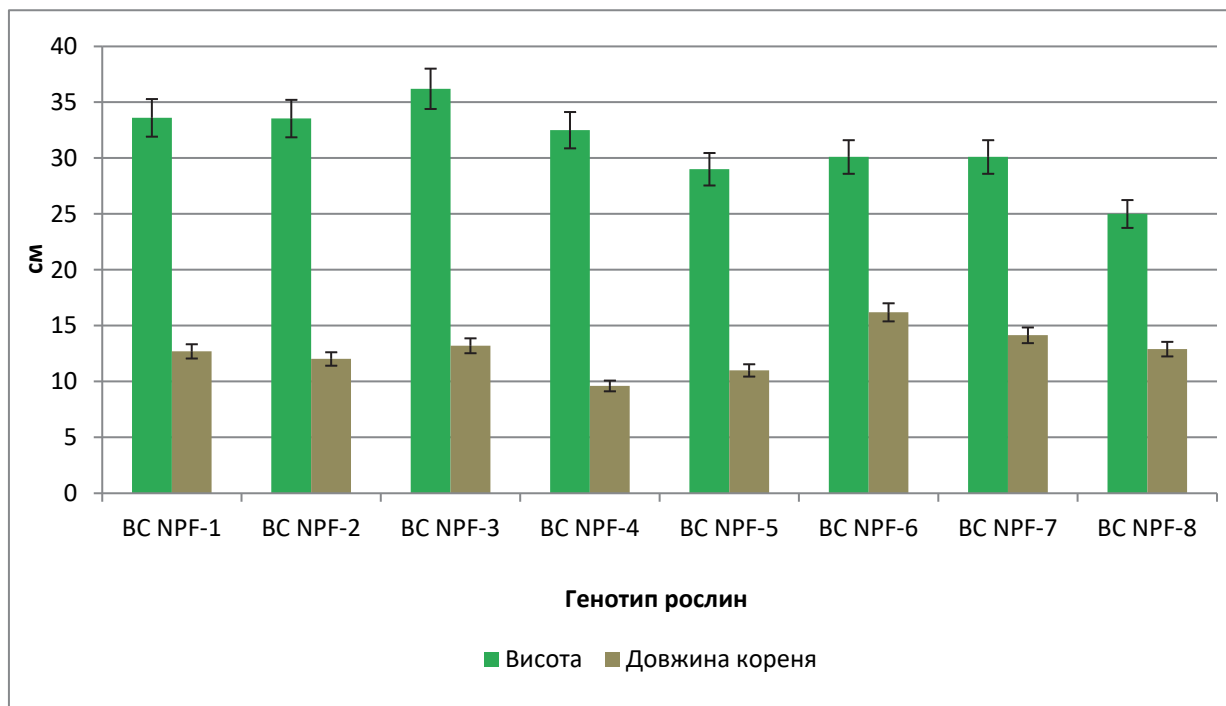


Рис. 5. 6. Лінійні розміри надземної та підземної частин різних генотипів рослин *Brassica carinata* природного походження у фазі стеблуння

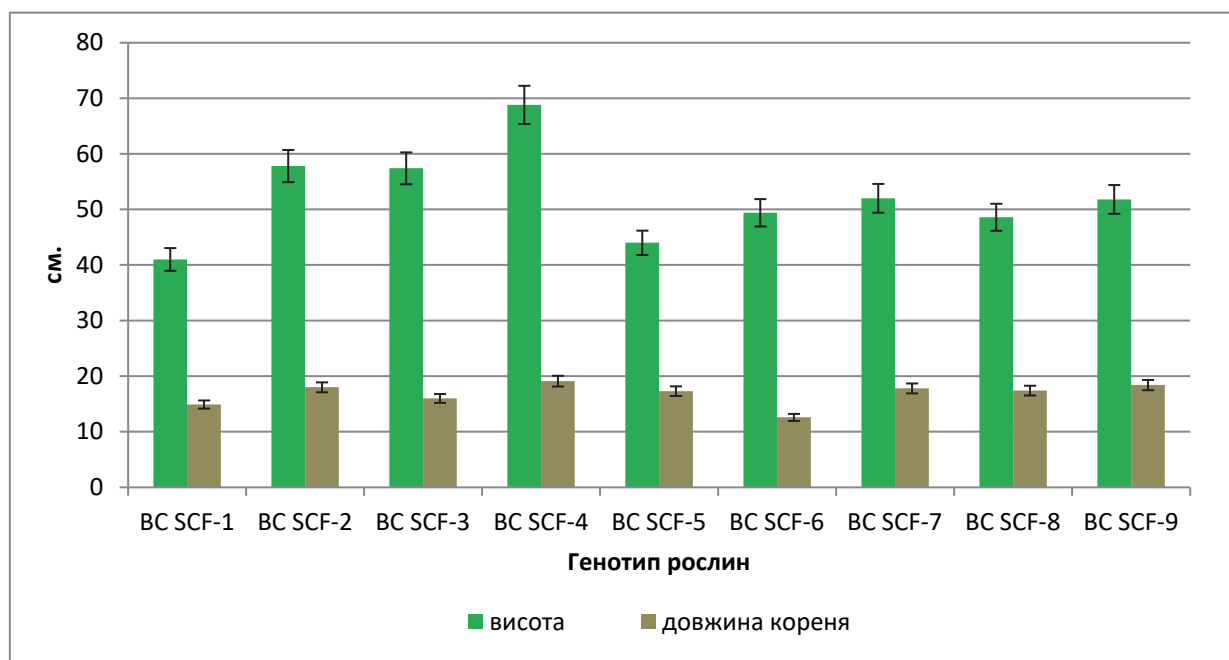


Рис. 5. 7. Лінійні розміри надземної та підземної частини селекційно-генетичних форм рослин *Brassica carinata* у фазі стеблуння

Щодо інтенсивності наростання головного кореня також відмічені відмінності та здійснений розподіл досліджуваних форм за довжиною на наступні групи: найдовші (понад 17,1 см) – BC SCF-5, BC SCF-8, BC SCF-7, BC

SCF-2, BC SCF-9, BC SCF-4 (виключно рослини селекційно-генетичного походження); середньої довжини (від 13,1 см до 17 см) – BC NPF-3, BC NPF-7, BC SCF-1, BC SCF-3, BC NPF-6; найкоротші (до 13 см) – BC NPF-4, BC NPF-5, BC NPF-2, BC SCF-6, BC NPF-1, BC NPF-8.

Виявлено, що генотип рослин, котрий має найвищі показники росту як стебла, так і кореня є BC SCF-4. Найнижчі показники забезпечували генотипи BC NPF-8 за ростом стебла та BC NPF-4 – за розміром кореня. Різниця між найбільшим і найменшим значеннями росту складає: стебла – 43,8 см (63,66%), кореня – 9,5 см (49,73 %).

Середній показник лінійного росту рослин селекційно-генетичних зразків складає 52,3 см, що значно переважає (на 20,42 см або на 39 %) цей же показник у природних форм рослин, який становить 31,88 см. Так само і середній розмір лінійного росту кореня селекційно-генетичних форм рослин, який досягає 16,83 см, перевищує (на 6,11 см або на 36 %) відповідний показник рослин природного походження, який дорівнює 10,72 см. Відомо, що в умовах Ефіопії середній розмір кореня на 20 добу вегетації досягає 6,11 см (Husen, Iqbal, Aref, 2014).

Таким чином, можна зробити висновок, що рослини, створені селекційно-генетичним шляхом забезпечують значно кращі результати росту як надземної частини так і кореневої системи у фазі стеблуння. Також варто зазначити, що даних із дослідження інтенсивності наростання лінійних розмірів стебла та кореня у наявній науковій літературі не знайдено.

Окрім лінійних розмірів пагонів та кореня важливе значення має утворення листків, які формують основну площу фотосинтетичної поверхні рослини і, як наслідок, забезпечують її продуктивність (рис. 5. 8, 5. 9).

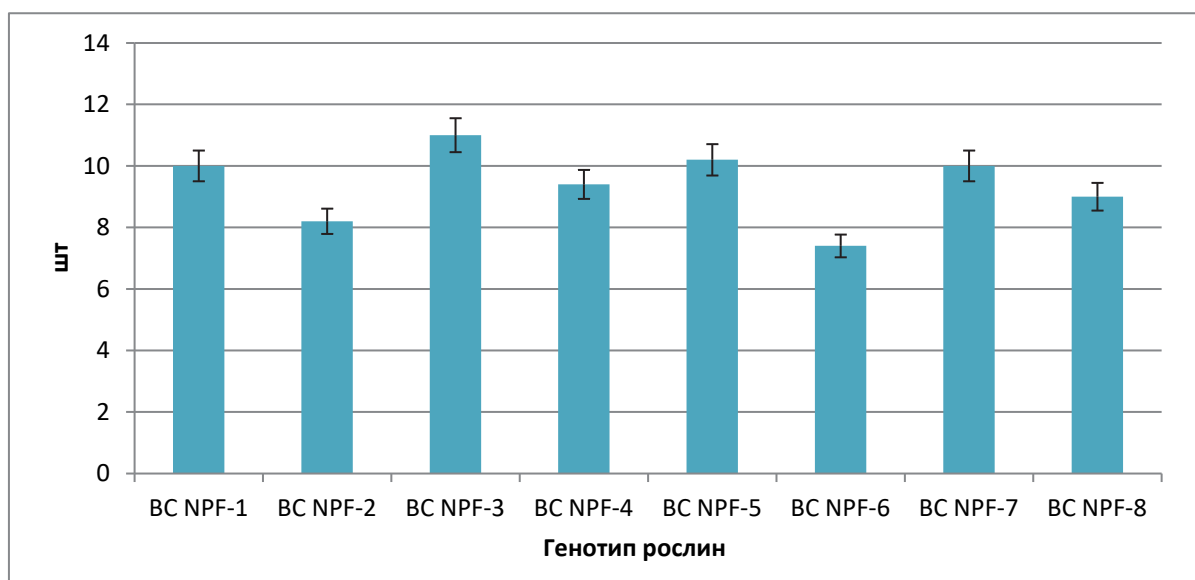


Рис. 5. 8. Кількість листків різних генотипів рослин *Brassica carinata* природного походження у фазі стеблуння

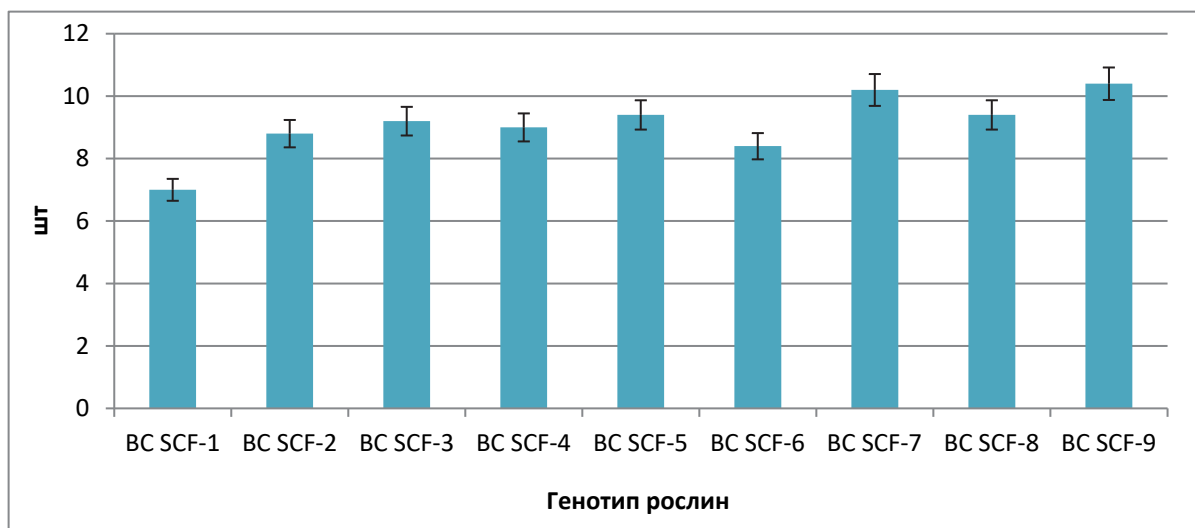


Рис. 5. 9. Кількість листків у селекційно-генетичних форм рослин *Brassica carinata* у фазі стеблуння

Аналізуючи отримані дані варто зазначити, що різниця у кількості листків у фазі стеблуння була незначною (між найбільшим і найменшим значеннями складає 4 шт., що становить 36 %), проте більшість значень знаходяться ближче до середнього показника. Середні значення кількості листків на селекційно-генетичних формах рослин та рослинах природного походження є майже ідентичними; ці значення становлять відповідно 9,1 та 9,4 шт./рослину, а різниця між ними складає 3,2 %.

З огляду на це нами здійснено розподіл (медіаною вибірки) природних та селекційно-генетичних форм рослин *Brassica carinata* A. Braun на дві групи: представники з більшою кількістю листків (> 9,4 листки): BC SCF-5, BC SCF-8, BC NPF-4, BC NPF-1, BC NPF-7 BC SCF-7, BC NPF-5 BC SCF-9, BC NPF-3; з меншою кількістю листків (менше 9,4 листки): BC SCF-1, BC NPF-6, BC NPF-2, BC SCF-6, BC SCF-2 BC SCF-4, BC NPF-8, BC SCF-3.

Аналізуючи ці дві групи, слід зазначити, що рослини природного та селекційно-генетичного походження розподілені рівномірно і не мають явної переваги в цьому показнику. Порівнюючи отримані результати з даними, отриманими Husen, Iqbal, Aref, (2014) в Ефіопії, варто відмітити те, що в умовах України середній показник листкоутворення вищий (майже на 15 %).

Досліджено морфометричні показники листків природних та селекційно-генетичних форм рослин *Brassica carinata* (рис. 5. 10, 5. 11), що дозволило встановити ряд відмінностей і здійснити їхній розподіл за шириною листків на три групи: широколисті (понад 7 см) – BC NPF-6, BC SCF-1, BC NPF-1, BC SCF-8, BC NPF-4; середньої ширини (від 6,1 до 7 см) – BC NPF-7, BC SCF-2, BC SCF-5, BC NPF-3, BC NPF-5, BC SCF-4, BC NPF-2, BC SCF-3; вузьколисті (до 6 см) – BC SCF-9, BC NPF-8, BC SCF-7, BC SCF-6.

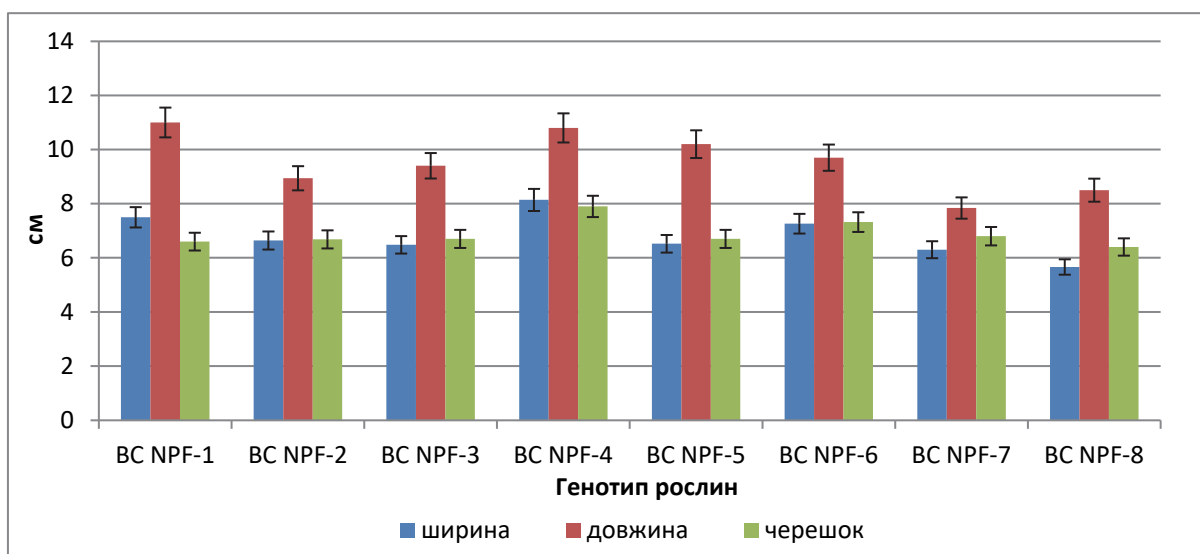


Рис. 5. 10. Морфометричні показники листків різних генотипів рослин *Brassica carinata* природного походження у фазі стеблуння

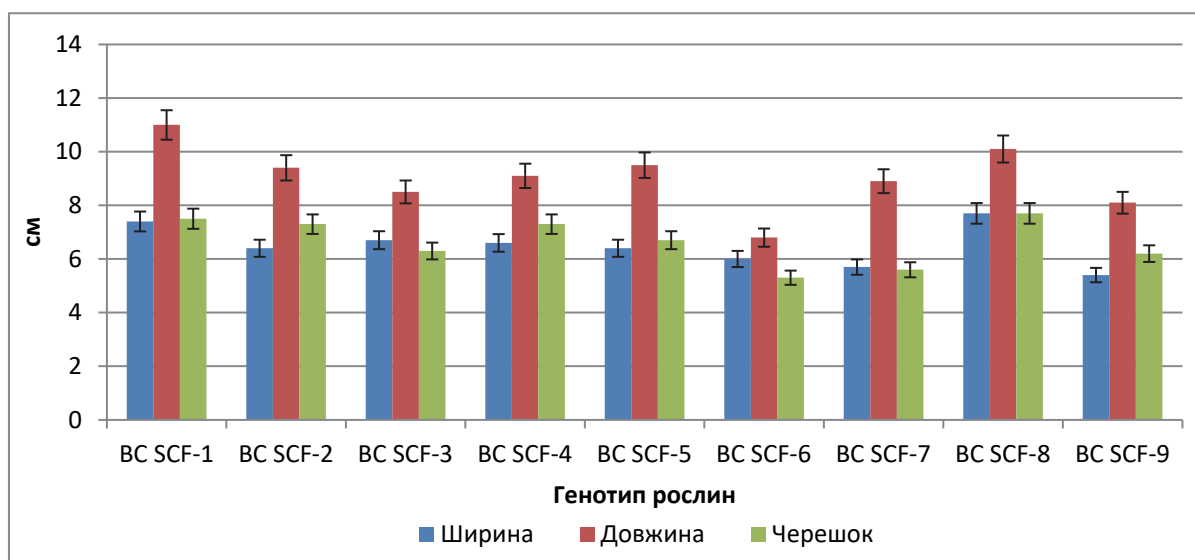


Рис. 5. 11. Морфометричні показники листків у селекційно-генетичних форм рослин *Brassica carinata* у фазі стеблуння

Детальний аналіз цих груп рослин дозволив виявити, що за показником ширини листка рослини різного походження розподілені досить рівномірно, хоча варто зазначити, що природні генотипи рослин більш схильні формувати широкі листки.

За довжиною листової пластинки розподілено рослини на три групи: довголисті (понад 10 см) – BC SCF-8, BC NPF-5, BC NPF-4, BC SCF-1, BC NPF-1; листки середньої довжини (від 8,1 до 10 см) – BC SCF-4, BC SCF-2, BC NPF-3, BC SCF-5, BC NPF-6, BC SCF-9, BC NPF-8, BC SCF-3, BC SCF-7, BC NPF-2; коротколисті (до 8 см) – BC SCF-6, BC NPF-7.

При аналізі цих груп було помічено, що за показником довжини листка тенденції дисперсії рослин різного походження подібні до ширини листка, варто зазначити, що довжина та ширина листка корелюється між собою, а рослини з короткими листками також мають і вузькі листки.

Лінійні розміри черешка листків різних генотипів були близькі, але мали незначні відмінності, у зв'язку з чим було виділено три групи рослин: з довгим черешком (понад 7,5 см) – BC SCF-2, BC SCF-4, BC NPF-6, BC SCF-1, BC SCF-8, BC NPF-4; з черешком середньої довжини (від 6,0 до 7,5 см):

BC NPF 1, BC NPF-2, BC SCF-5, BC NPF-3, BC NPF-5, BC NPF-7, BC SCF-9, BC SCF-3, BC NPF-8; з коротким черешком (до 6,0 см): BC SCF-6, BC SCF-7.

Дослідження біометричних показників рослин у процесі подальшого розвитку показало, що у більшості ростові параметри у фазі квітування є стабільними, оскільки уповільнюється активний ріст і усі процеси спрямовуються на формування генеративних органів (рис. 5. 12, 5. 13).

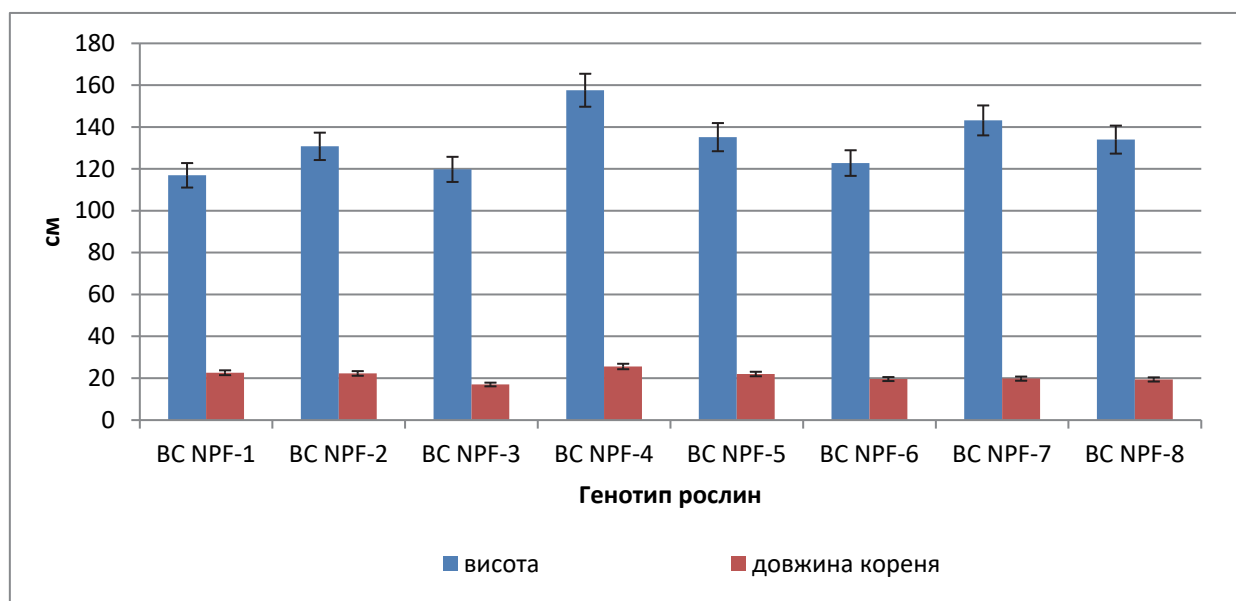


Рис. 5. 12. Висота і довжина кореня різних генотипів рослин *Brassica carinata* природного походження у фазі квітування

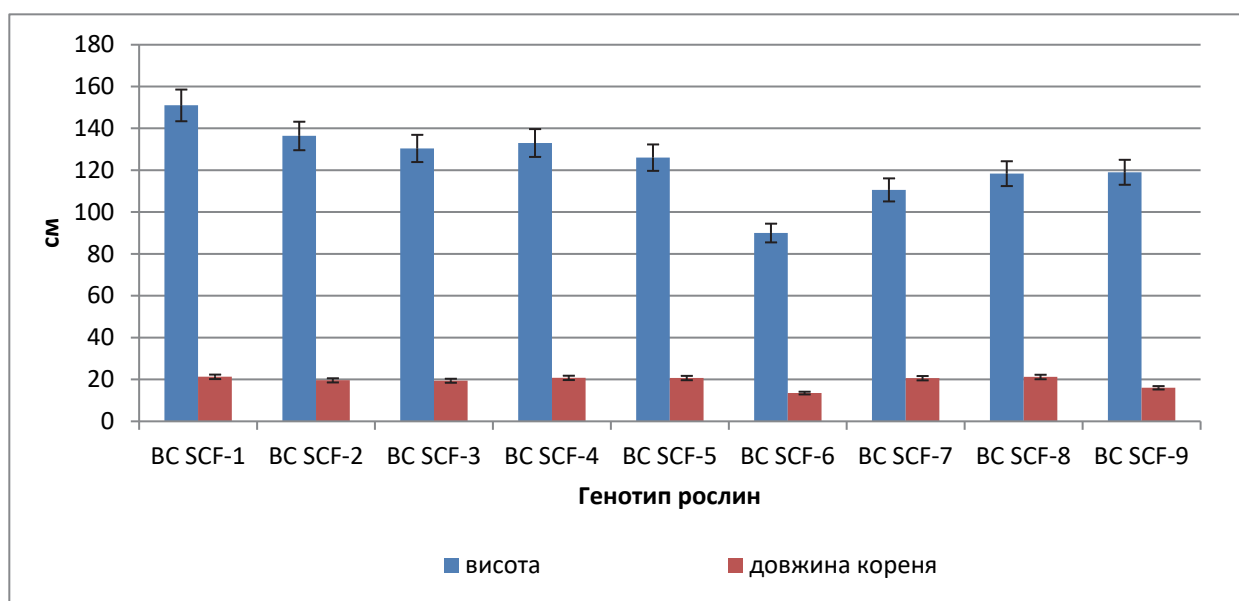


Рис. 5.13. Висота і довжина кореня селекційно-генетичних форм рослин *Brassica carinata* у фазі квітування

Виявлено, що різниця за висотою різних генотипів є досить значною. За цим же показником визначено три групи рослин: високорослі (понад 135 см) – BC NPF-5, BC SCF-2, BC NPF-7, BC SCF-1, BC NPF-4; середньорослі (від 121 до 135 см) – BC NPF-6, BC SCF-5, BC SCF-3, BC NPF-2 BC SCF-4, BC NPF-8; низькорослі (до 120 см) – BC SCF-6, BC SCF-7, BC NPF-1, BC SCF-8, BC SCF-9, BC NPF-3.

Варто зазначити, що селекційно-генетичні форми рослин зосереджені переважно в низькорослій та середньорослій групі. Висота рослин є частково обернено-пропорційною до темпів росту, де рослини селекційно-гібридного походження однозначно показували набагато вищі результати, ніж рослини природного походження. Також варто зазначити, що генотип BC SCF-2 показує прямо-пропорційну залежність як високорослості так і швидкорослості.

Порівнюючи отримані результати за висотою рослин із аналогічними даними, отриманими в дослідженнях Seerpaul et al. (2021), виявлено, що в умовах НБС імені М.М. Гришка НАН України рослини *Brassica carinata* забезпечують вищі ростові показники (понад 8,6%).

За довжиною кореня, у фазі квітування, рослини також розподілено на три групи: з довгим коренем (понад 21 см) – BC SCF-8, BC SCF-1, BC NPF-5, BC NPF-2, BC NPF-1 BC NPF-4; із середньою довжиною кореня (від 18 до 21 см) – BC NPF-6, BC SCF-2, BC NPF-7, BC SCF-7, BC SCF-5, BC SCF-4, BC SCF-3, BC NPF-8; з коротким коренем (до 18 см): BC SCF-6, BC SCF-9, BC NPF-3. Даний розподіл демонструє, що серед рослин із найдовшим коренем переважають рослини природного походження, що є майже протилежним відносно показника темпу росту кореня.

Генотипом рослин, що має найбільшу висоту і довжину кореня виявився BC NPF-4, а найнижчу – BC SCF-6. Різниця між найбільшим та найменшим значенням висоти складає 67,6 см (42,89 %), а розмірів кореня – 12,1 см (47,27 %).

Середній показник висоти селекційно-генетичних форм рослин складає 123,87 см, що менше за ідентичний показник у природних рослин (на 8,68 см чи 6,56 %), який досягає 132,55 см.

Аналогічна ситуація з середнім показником довжини кореня селекційно-генетичних форм рослин, який складає 19,23 см і є меншим за відповідний показник рослин природного походження, який становить 21,04 см (на 1,8 см чи на 8,6 % більше).

Дослідження інтенсивності наростання стебла, а особливо його діаметру при основі є важливим показником для оцінки стійкості культур до полягання, що дозволить у майбутніх селекційних відборах зосередити увагу на найбільш перспективних генотипах (Мазур, 2020). Таким чином, у фазі квітування було досліджено показники діаметру стебла (рис. 5. 14, 5. 15) рослин і здійснено розподіл на наступні групи: рослини з великим діаметром (понад 7 мм) – BC NPF-4, BC NPF-3, BC NPF-6, BC NPF-5, BC NPF-8 (група представлена лише рослинами природного походження); з середнім діаметром (від 6,1 мм до 7 мм) – BC NPF-2, BC NPF-7, BC SCF-6, BC NPF-1, BC SCF-2, BC SCF-1; з малим діаметром (до 6 мм) – BC SCF-9, BC SCF-4, BC SCF-5, BC SCF-8, BC SCF-7, BC SCF-3 (група представлена лише рослинами селекційно-генетичного походження).

Різниця між найбільшим показником (у генотипі BC NPF-8) – 8,34 мм та найменшим (у BC SCF-9) – 5,4 мм складає 35,25 %. Відмінність середніх значень за діаметром стебла між рослинами природного та селекційно-генетичного походження становить 18,24 %.

З'ясовано, що рослини природного походження мають товстіше і потужніше стебло, у порівнянні з селекційно-генетичними рослинами.

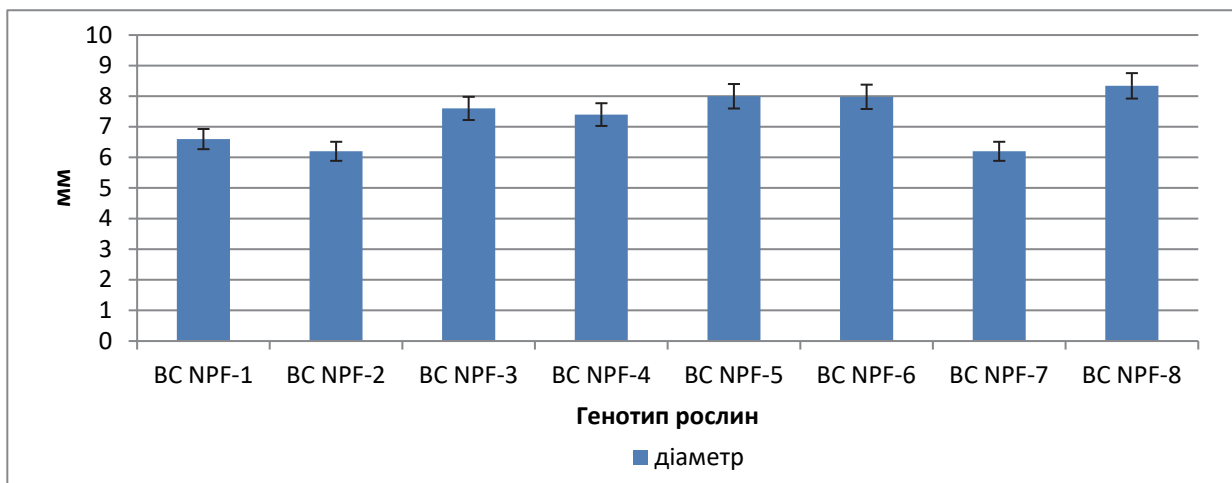


Рис. 5. 14. Діаметр стебла різних генотипів рослин *Brassica carinata* природного походження у фазі квітування

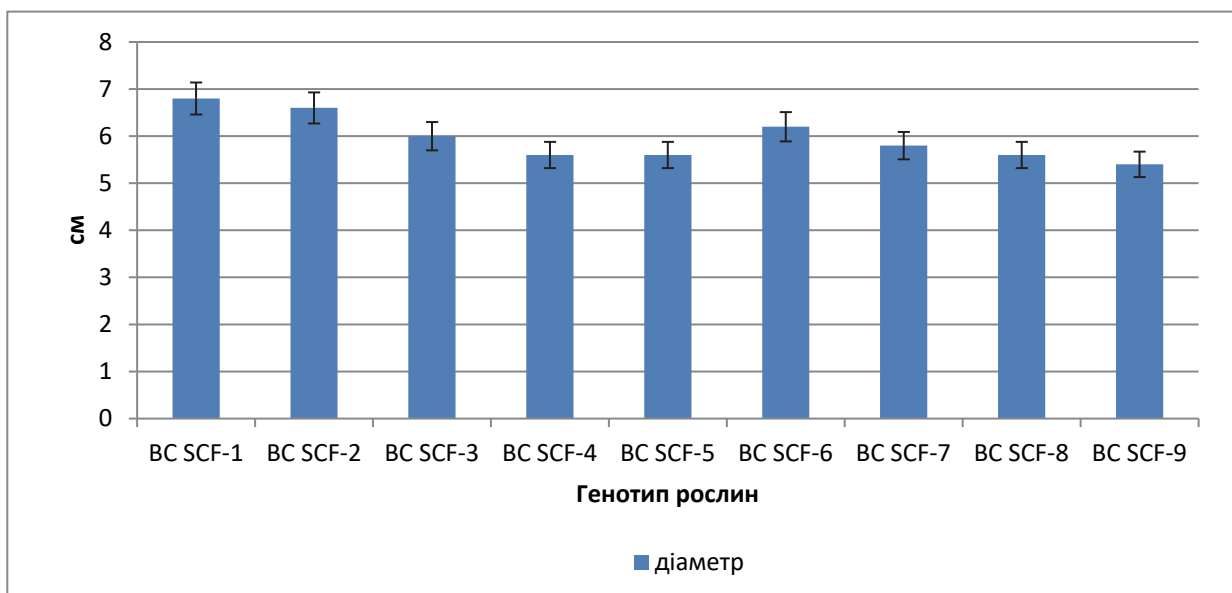


Рис. 5. 15. Діаметр стебла селекційно-генетичних форм рослин *Brassica carinata* у фазі квітування

Також попри очікування найвищі рослини не завжди мають найтовстіші корені, хоча певна кореляція показників висоти і діаметру стебла присутня. Більш чітко прослідковується зв'язок між довжиною кореня та діаметром стебла, хоча не скрізь ці показники взаємопов'язані.

У фазі квітування проведено аналіз біометричних параметрів листків рослин *Brassica carinata* (рис. 5. 16, 5. 17).

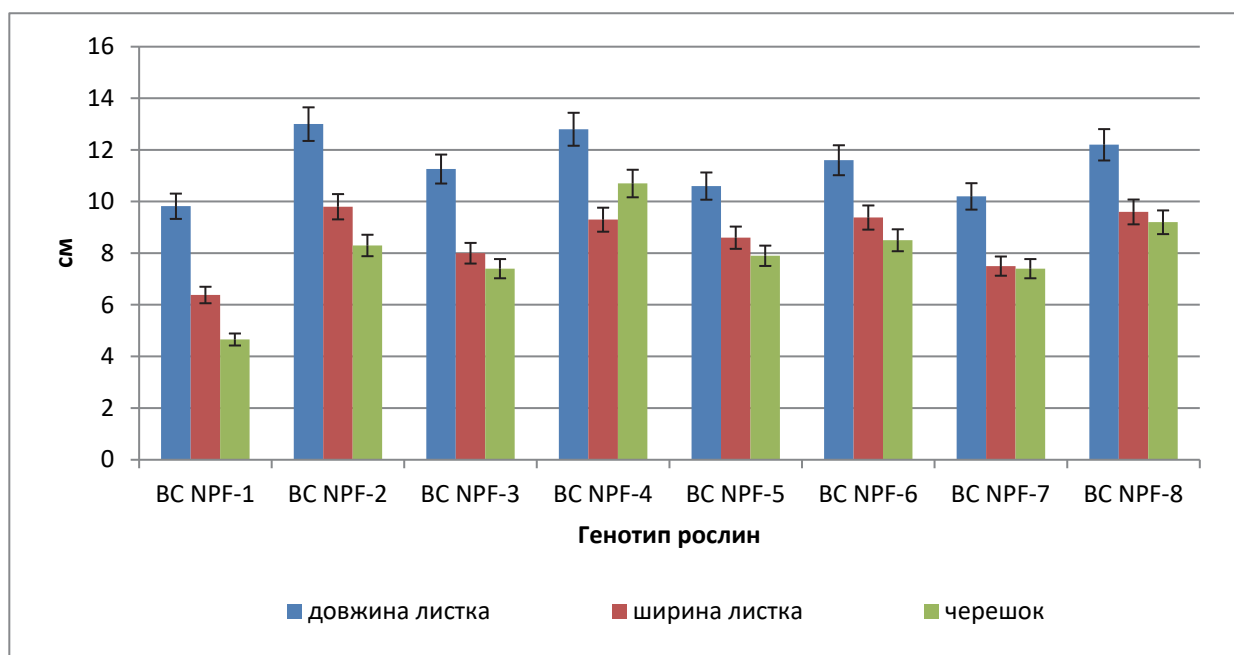


Рис. 5. 16. Морфометричні показники різних генотипів рослин *Brassica carinata* природного походження у фазі квітання

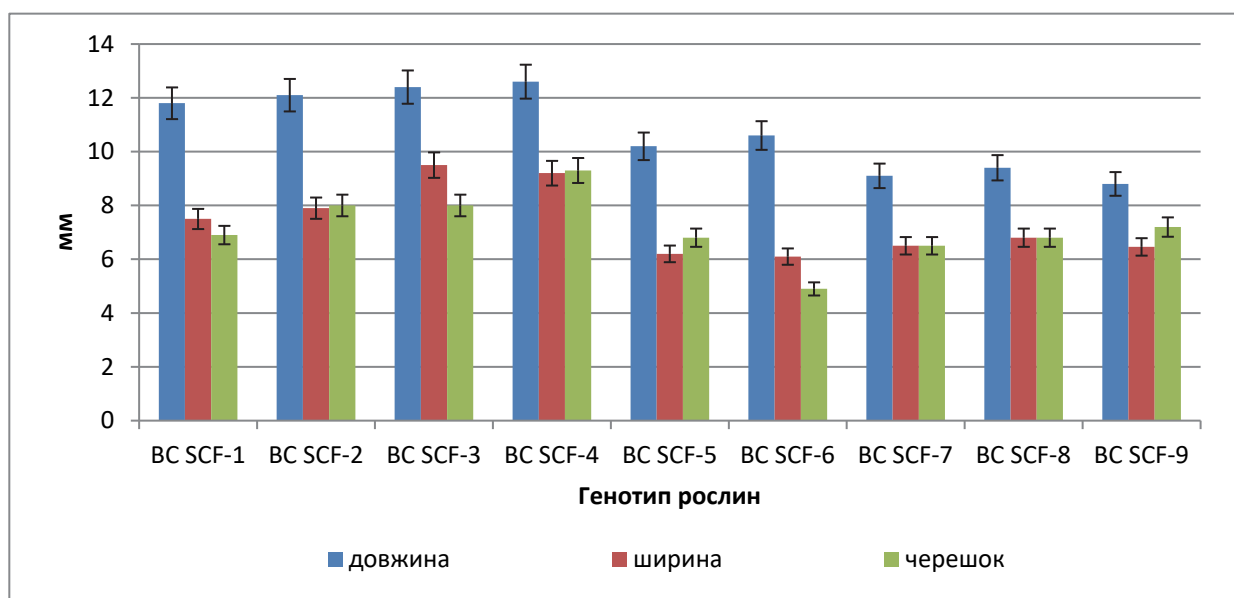


Рис. 5. 17. Морфометричні показники листків селекційно-генетичних форм рослин *Brassica carinata* у фазі квітання

За результатами оцінки довжини листової пластинки було виявлено ряд закономірностей, які дозволили розподілити досліджувані генотипи на такі групи: рослини з довгими листками (понад 12 см) – BC SCF-2, BC NPF-8, BC SCF-3, BC SCF-4, BC NPF-4, BC NPF-2; рослини із середньою довжиною листків (від 10,6 см до 12 см) – BC SCF-6, BC NPF-5, BC NPF-3, BC NPF-6, BC SCF-

1; коротколисті (до 10,5 см) – BC SCF-9, BC SCF-7, BC SCF-8, BC NPF-1 , BC SCF-5, BC NPF-7.

Аналіз рослин дозволив виявити, що за довжиною листка рослини різного походження розподілені досить рівномірно, хоча варто зазначити, що генотипи природного походження схильні до більшої довжини листків.

Різниця між найбільшою довжиною листка (BC NPF-2 – 13 см) і найменшою (BC SCF-9 – 8,8 см) становить 4,2 см (32,31 %).

Отримані дані щодо оцінки ширини листків дозволили розподілити рослини на три групи: широколисті (понад 9 см) – BC SCF-4, BC NPF-4, BC NPF-6, BC SCF-3, BC NPF-8, BC NPF-2; середньої ширини (від 6,6 см до 9 см) – BC SCF-8, BC NPF-7, BC SCF-1, BC SCF-2, BC NPF-3, BC NPF-5; вузьколисті (до 6,5 см) – BC SCF-6, BC SCF-5, BC NPF-1, BC SCF-9, BC SCF-7.

Аналіз отриманих даних дозволив встановити, що показники як ширини листків так і довжини розподілені доволі рівномірно, з невеликою перевагою у рослин природного походження. Найширші листки забезпечував генотип BC NPF-2 (9,8 см). Варто зазначити, що цей генотип також має і найдовше листя. Найвужче листя у генотипа BC SCF-6 (6,1 см), різниця за крайніми розмірами становить 3,7 см (37,76 %).

Також варто зазначити, що, як і в період стеблуння, довжина та ширина листя корелюється між собою, а рослини з коротким листям також мають і вузькі листки, та навпаки.

З огляду на досить велику різницю між максимальною і мінімальною довжиною черешка, яка становить 56,45 %, рослини за цим показником розподілено на три групи: з довгим черешком (понад 8 см) – BC NPF-2, BC NPF-6, BC NPF-8, BC SCF-4, BC NPF-4; з черешком середньої довжини (від 6,5 до 8 см) – BC SCF-9, BC NPF-7, BC NPF-3, BC NPF-5, BC SCF-2, BC SCF-3, BC SCF-7, BC SCF-5, BC SCF-8, BC SCF-1 (група представлена виключно

рослинами селекційного-генетичного походження); з коротким черешком (до 6,4 см): BC NPF-1, BC SCF-6.

Досліджено кількісні показники листків та суцвіть у фазі квітування (рис. 5. 18, 5.1 9). Аналізуючи отримані дані варто зазначити, що різниця кількості листків у фазі квітування є досить значною та складає 62,5 %.

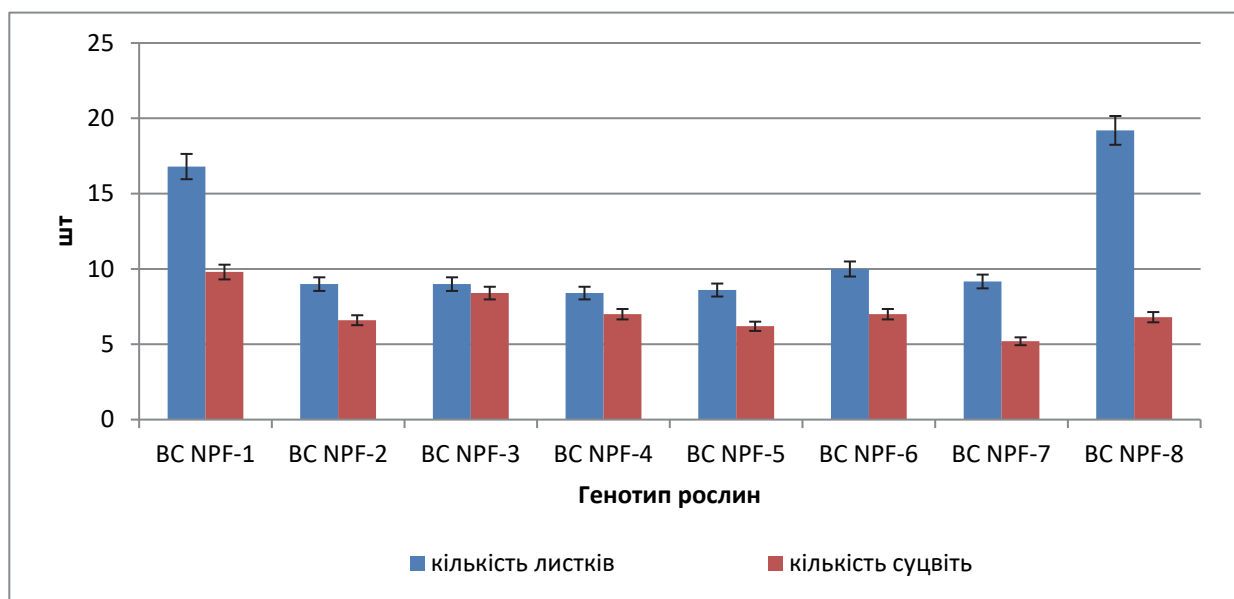


Рис. 5. 18. Кількість листків та суцвіть різних генотипів рослин *Brassica carinata* природного походження у фазі квітування

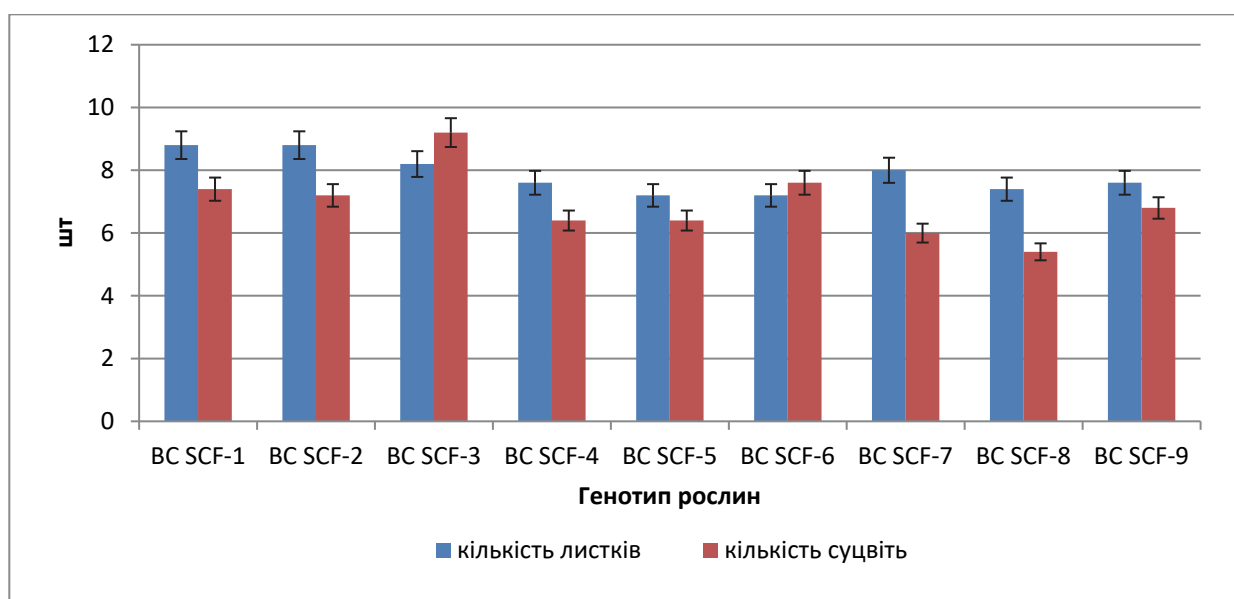


Рис. 5. 19. Кількість листків та суцвіть селекційно-генетичних форм рослин *Brassica carinata* у фазі квітування

Проте варто зазначити, що така різниця мінімального і максимального значення зумовлена наявністю двох генотипів природного походження зі значно більшою кількістю листків, ніж у всіх інших генотипів. Тому за кількістю листків генотипи було розподілено на наступні групи: рослини з великою кількістю листків (понад 10 шт.) – BC NPF-1, BC NPF-8 (група представлена лише рослинами природного походження); із середньою кількістю листків (9–10 шт.) – BC NPF-2, BC NPF-3, BC NPF-7, BC NPF-6, BC SCF-3, BC NPF-4, BC NPF-5, BC SCF-2, BC SCF-1; з малою кількістю листків (до 8 штук) – BC SCF-5, BC SCF-6, BC SCF-8, BC SCF-4, BC SCF-9, BC SCF-7 (група представлена рослинами селекційно-генетичного походження).

Таким чином, рослини природного походження в цілому мають більшу кількість листків у фазі квітання, порівняно із селекційно-генетичними формами.

Дослідження кількості суцвіть дозволило здійснити розподіл генотипів на три групи: з великою кількістю суцвіть (понад 7,5 шт.) – BC SCF-6, BC NPF-3, BC SCF-3, BC NPF-1; з середньою кількістю суцвіть (від 5,5 до 7,5 шт.) – BC NPF-2, BC SCF-9, BC NPF-8, BC NPF-4, BC NPF-6, BC SCF-2, BC SCF-1, BC SCF-7, BC NPF-5, BC SCF-5, BC SCF-4; з малою кількістю суцвіть (до 5,5 штук) – BC NPF-7, BC SCF-8.

За кількістю суцвіть рослини розподілені відносно рівномірно. Також варто зазначити, що кореляція між кількістю суцвіть і кількістю листків майже відсутня, проте генотип BC NPF-1, який має найбільше суцвіть, також виділяється дуже великою кількістю листків, у той же час рослини генотипу BC NPF-8, у якого найбільша кількість листя, має посередню кількість суцвіть.

Середнє значення за кількістю суцвіть у рослин природного походження становить 7,13, а для рослин селекційно-генетичних форм – 6,93, що становить незначну (2,8 %) різницю.

Здійснено аналіз масової частки різних органів рослин *Brassica carinata*. Встановлено, що у фазі стеблуння – початок бутонізації маса селекційних форм рослин переважно є більшою за природні форми (рис. 5. 20, 5. 21).

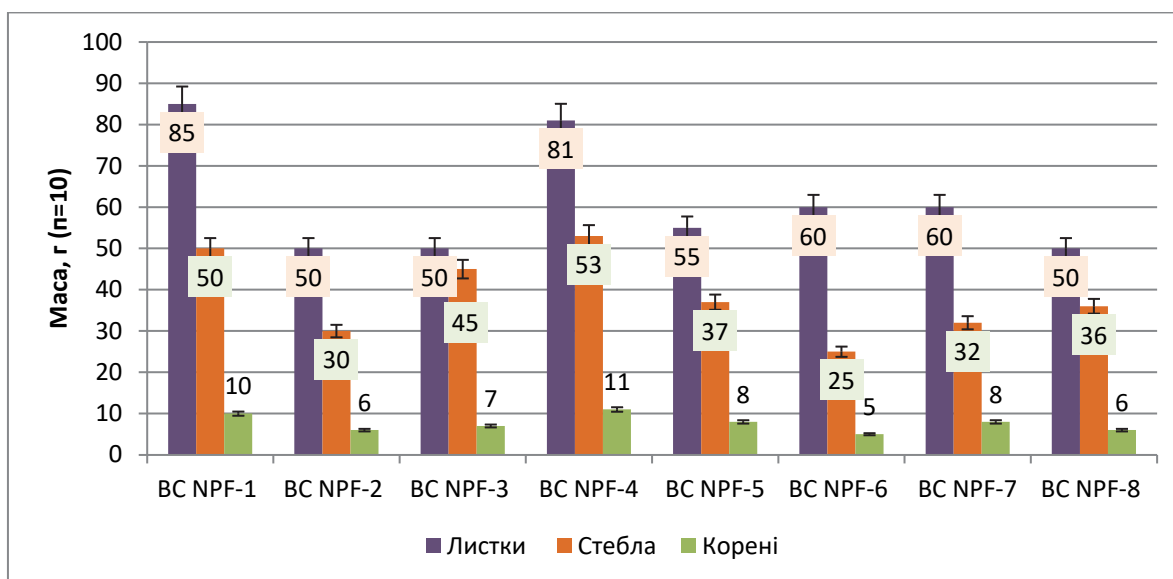


Рис. 5. 20. Масова частка різних органів рослин інтродукованих популяцій *Brassica carinata* у період стеблуння-початок бутонізації

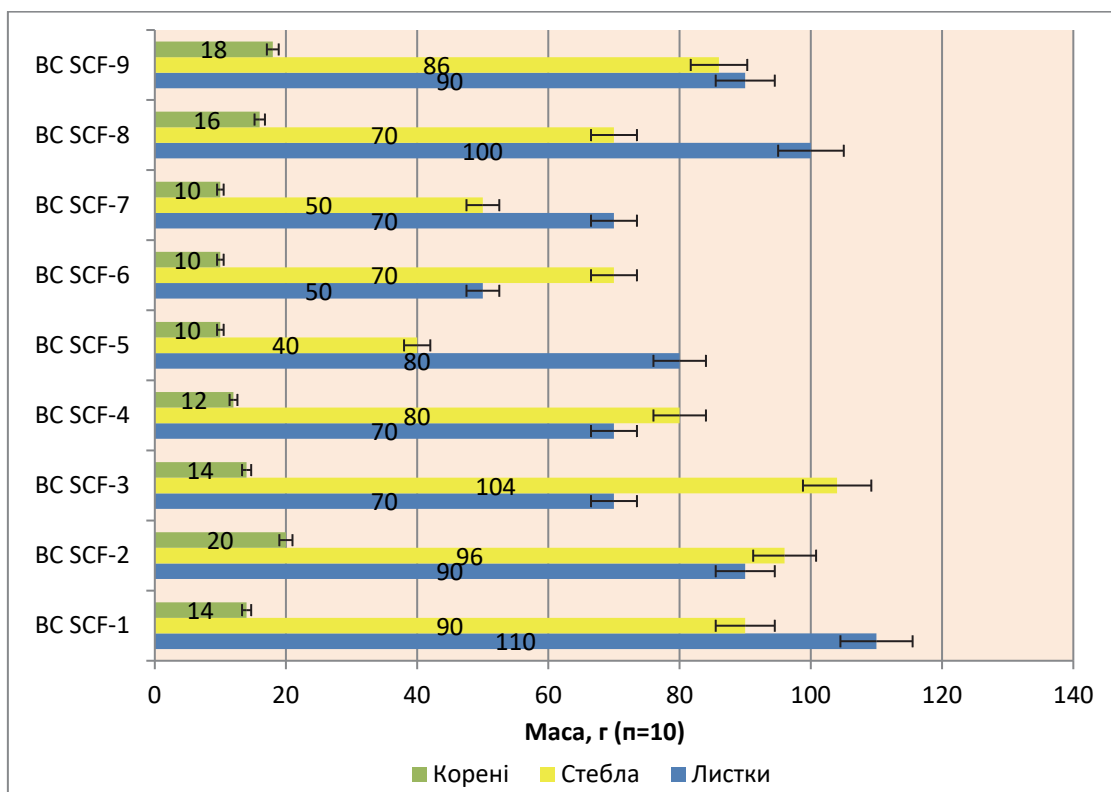


Рис. 5. 21. Масова частка різних органів селекційно-генетичних форм рослин *Brassica carinata* у період стеблуння-початок бутонізації

Так, аналізуючи масу листків досліджуваних генотипів було виділено три групи рослин: з малою масою (до 55 г) – BC NPF-8, BC NPF-2, BC NPF-3, BC SCF-6, BC NPF-5; з середньою масою (від 56 до 80 г) – BC NPF-6, BC NPF-7, BC SCF-7, BC SCF-4, BC SCF-3, BC SCF-5; з великою масою (понад 80 г) – BC NPF-4, BC NPF-1, BC SCF-9, BC SCF-2, BC SCF-8, BC SCF-1.

Аналіз отриманих даних дозволив виявити, що в усіх групах є представники рослин різного походження. Проте рослини селекційно-генетичного походження переважають у групі з великою масою.

За масою стебла генотипи доцільніше розподілити на чотири групи рослин: з малою масою (до 40 г) – BC NPF-6, BC NPF-2, BC NPF-7, BC NPF-8, BC NPF-5, BC SCF-5; із середньою масою (від 41 до 55 г) – BC NPF-3, BC SCF-7, BC NPF-1, BC NPF-4; з великою масою (від 56 до 85 г) – BC SCF-6, BC SCF-8, BC SCF-4 (виключно рослини селекційно-генетичного походження); з дуже великою масою (понад 85 г) – BC SCF-9, BC SCF-1, BC SCF-2, BC SCF-3 (виключно рослини селекційно-генетичного походження).

У даних групах наочно видно перевагу генетично-селекційних рослин над природними, адже дві групи з найбільшою масою представлено виключно рослинами селекційно-генетичного походження. Також у групах із середньою та низькою масою є лише по одному представнику зразків рослин селекційно-генетичного походження.

За масою коренів рослини також було поділено на чотири групи, адже різниця між максимальним та мінімальним значеннями складає 75 %. Групи були сформовані наступним чином: рослини з малою масою коренів (до 8 г) – BC NPF-6, BC NPF-8, BC NPF-2 BC NPF-3, BC NPF-7, BC NPF-5 (виключно рослини природного походження); із середньою масою (від 9 до 11 г) – BC SCF-5, BC SCF-7, BC NPF-1, BC SCF-6, BC NPF-4; з великою масою (від 12 до 15 г) – BC SCF-4, BC SCF-1, BC SCF-3 (виключно рослини селекційно-генетичного

походження); з дуже великою масою коріння (понад 15 г) – BC SCF-8, BC SCF-9, BC SCF-2 (також рослини селекційно-генетичного походження).

За масою коренів зберігається тенденція переваги рослин селекційно-генетичного походження, так само як і за показником надземної маси. У даному випадку рослини з малою масою коренів представлені лише зразками природного походження.

Загалом, аналізуючи всі три показники, варто зазначити, що рослини селекційно-генетичного походження в цілому характеризуються кращими продуктивними параметрами у період стеблуння-початок бутонізації.

Для більш глибокого й об'єктивного дослідження інтродукованих генотипів було продовжено вивчення масової частки різних органів рослин у період квітання і квітання-плодоношення (рис. 5. 22, 5. 23).

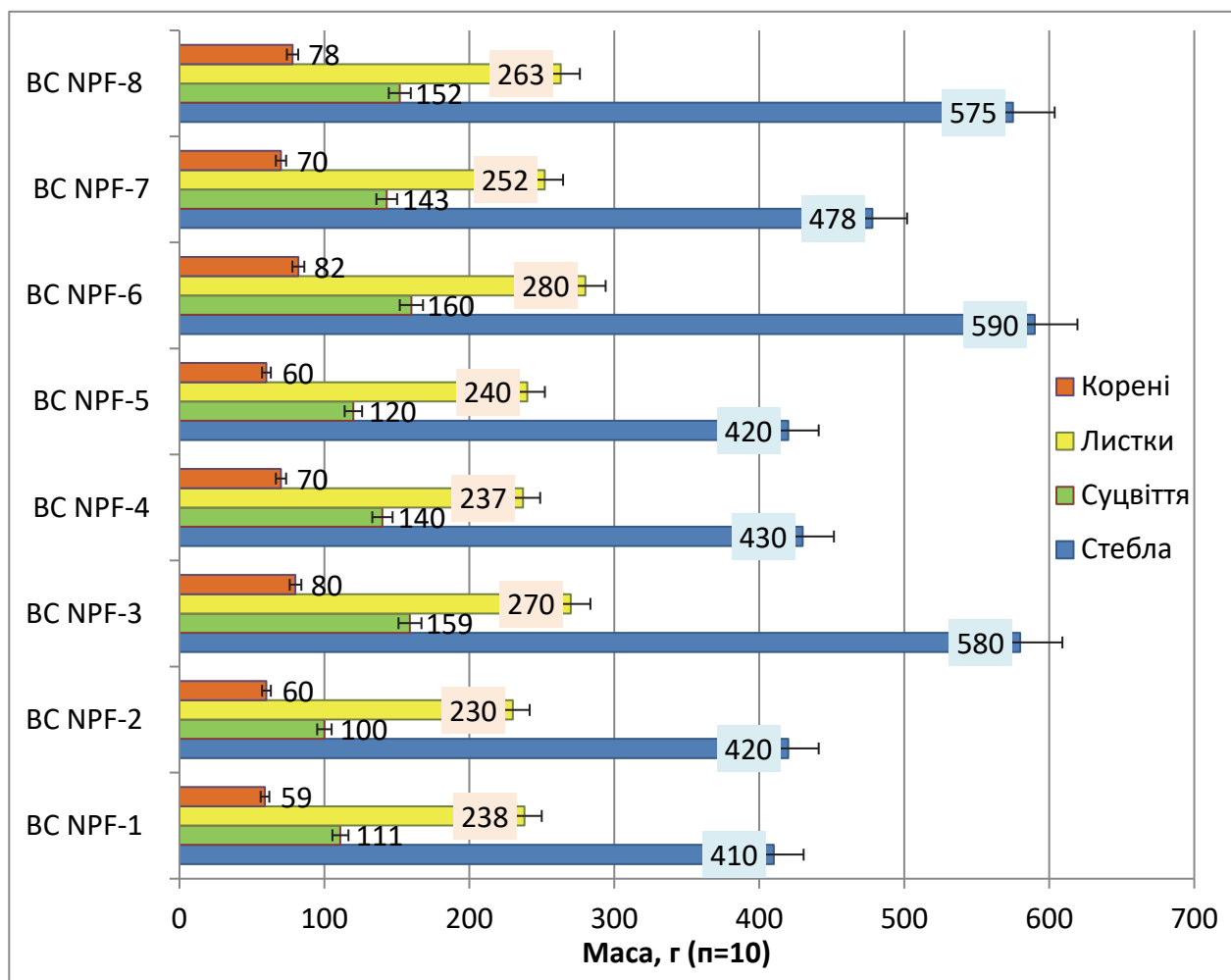


Рис. 5.22. Масова частка різних органів рослин інтродукованих популяцій *Brassica carinata* у період квітання-початок плодоношення

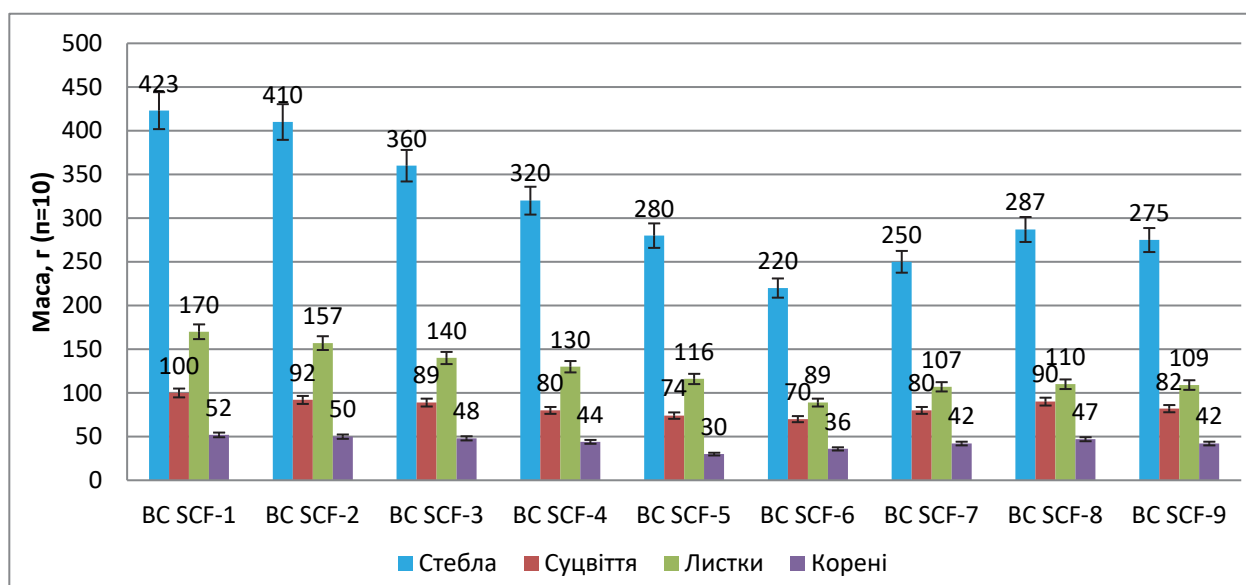


Рис. 5. 23. Масова частка різних органів селекційно-генетичних форм рослин *Brassica carinata* у фазі квітання

Зважаючи на велику різницю в масі листків, а саме 191 г (68,21 %), рослини було доцільно поділити на чотири наступні групи: з малою масою (до 120 г) – BC SCF-6, BC SCF-7, BC SCF-9, BC SCF-8, BC SCF-5 (рослини селекційно-генетичного походження); із середньою масою (від 121 до 180 г) – BC SCF-4, BC SCF-3, BC SCF-2, BC SCF-1 (рослини селекційно-генетичного походження); з великою масою (від 181 до 240 г) – BC NPF-2, BC NPF-4, BC NPF-1, BC NPF-5 (рослини природного походження); з дуже великою масою (понад 240 г) – BC NPF-7, BC NPF-8, BC NPF-3, BC NPF-6 (рослини природного походження).

Аналіз отриманих груп дозволив встановити, що у фазі квітання, на відміну від стеблуння, безумовну перевагу за масою мають рослини природного походження.

За масою стебла рослини також було розподілено на чотири групи: з малою масою (до 300 г) – BC SCF-6, BC SCF-7, BC SCF-9, BC SCF-5, BC SCF-8 (рослини селекційно-генетичного походження); із середньою масою (від 300 до 411 г) – BC SCF-4, BC SCF-3, BC SCF-2, BC NPF-1; з великою масою (від 411 до 500 г) – BC NPF-2, BC NPF-5, BC SCF-1, BC NPF-4, BC NPF-7; з дуже великою

масою (понад 500 г) – ВС NPF-8, ВС NPF-3, ВС NPF-66 (рослини виключно природного походження). Помічено, що за масою стебла зберігається тенденція переважання рослин природного походження упродовж фази квітування, попри зворотну ситуацію у фазі стеблуння.

За масою кореня рослини, аналогічно до попередніх показників, були розділена на три наступні групи: з малою масою (до 45 г) – ВС SCF-5, ВС SCF-6, ВС SCF-7, ВС SCF-9, ВС SCF-4; із середньою масою (від 46 до 65 г) – ВС SCF-8, ВС SCF-3, ВС SCF-2, ВС SCF-1, ВС NPF-1, ВС NPF-2, ВС NPF-5; з великою масою (понад 65 г) – ВС NPF-4, ВС NPF-7, ВС NPF-8, ВС NPF-3, ВС NPF-6. За масою кореня ситуація майже аналогічна до попереднього показника, тобто рослини природного походження дещо переважали серед інших зразків.

За масою суцвіть рослини доцільно поділити на три групи, а саме: з малою масою (до 85 г) – ВС NPF-6, ВС SCF-6, ВС SCF-5, ВС SCF-7, ВС SCF-4, ВС SCF-9; з середньою масою (від 86 до 120 г) – ВС SCF-3, ВС SCF-8, ВС SCF-2, ВС SCF-1, ВС NPF-2, ВС NPF-1, ВС NPF-5; з великою масою (понад 120 г) – ВС NPF-4, ВС NPF-7, ВС NPF-8, ВС NPF-3.

За масою суцвіть зберігається аналогічна тенденція переважання рослин природного походження. Проте варто зазначити, що генотип ВС NPF - 6, який має найбільшу масу в усіх інших показниках, має найменшу масу суцвіть, тобто можна зробити висновок, що цей генотип витрачає більшість поживних речовин на продукування зеленої маси.

Також варто зазначити, що три інших генотипи з найбільшими показниками маси листків, стебла і кореня ВС NPF-3, ВС NPF-8, ВС NPF-7 мають також найкращі показники маси суцвіть, що робить ці зразки перспективними для використання у селекційному процесі та у виробництві.

У фазі дозрівання насіння також здійснено оцінку продуктивності надземної частини і масову частку їхніх вегетативних та генеративних органів (рис. 5. 24, 5. 25).

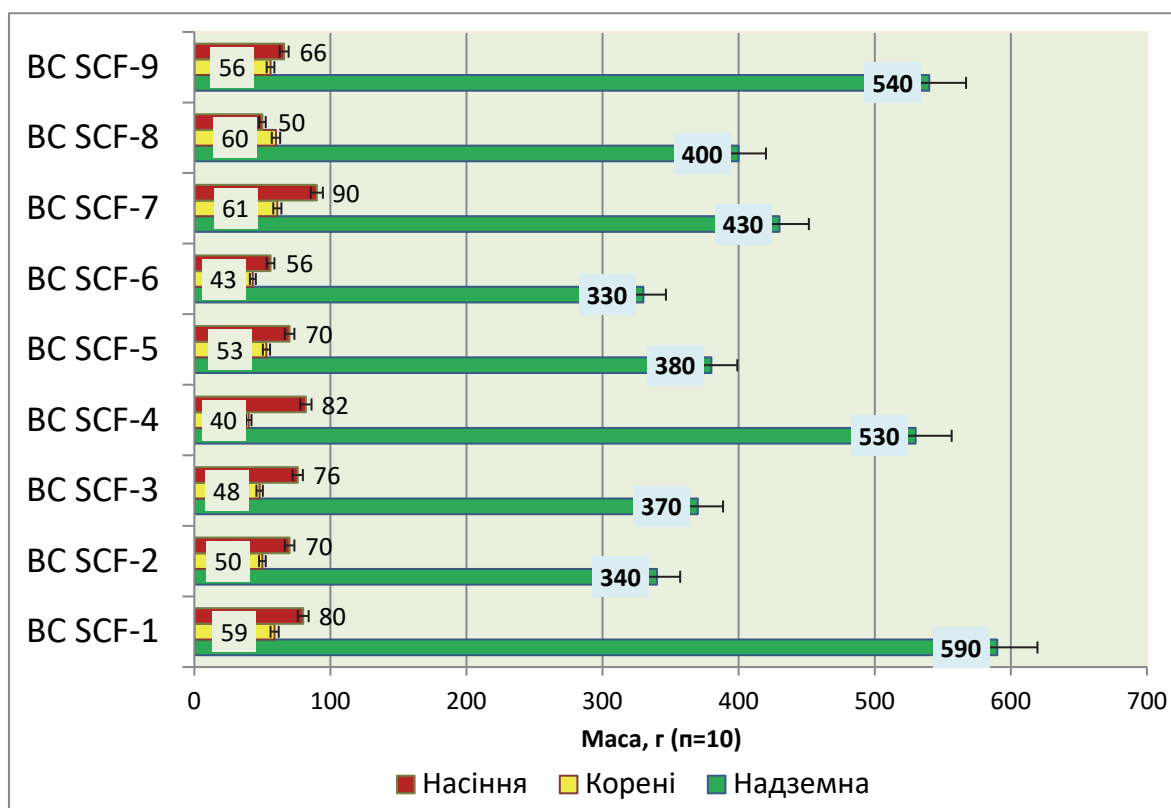


Рис. 5. 24. Масова частка різних органів селекційно-генетичних форм рослин *Brassica carinata* у фазі дозрівання насіння

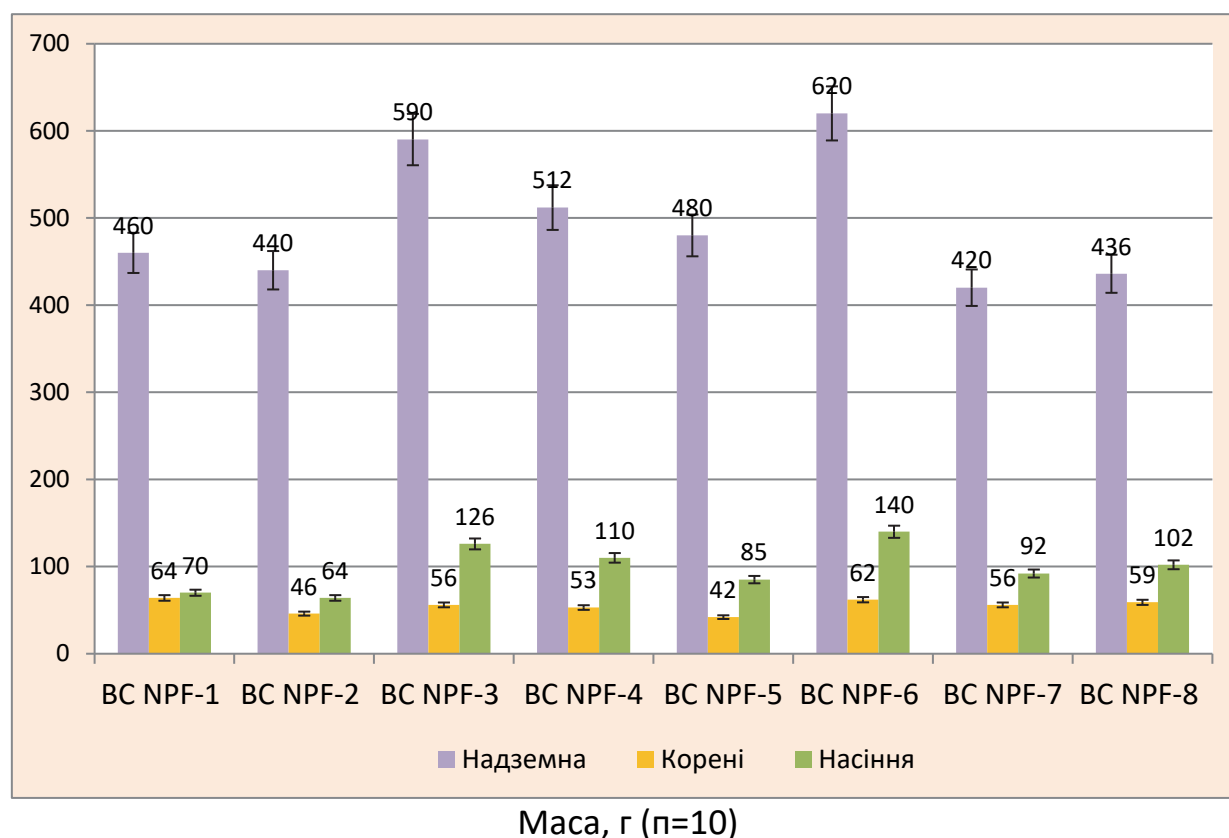


Рис. 5. 25. Масова частка різних органів рослин інтродукованих популяцій *Brassica carinata* у фазі дозрівання насіння

Внаслідок аналізу отриманих експериментальним шляхом даних за показником наземної маси, рослини у фазі дозрівання було поділено на три наступні групи: з малою масою (до 400 г) – BC SCF-4, BC SCF-8, BC SCF-7, BC SCF-5, BC SCF-2; з середньою масою (від 401 до 500 г) – BC NPF-7, BC SCF-3, BC NPF-8, BC NPF-2, BC NPF-1, BC NPF-5; з великою масою (понад 500 г) – BC NPF-4, BC SCF-6, BC SCF-1, BC SCF-9, BC NPF-3, BC NPF-6.

Порівнюючи з дослідженнями інших вчених, варто зазначити, що середня маса рослин, отриманих у наших дослідках (462,82 г), є близькою до результатів, отриманих в дослідженнях Catia Stamigna (500,6 г) (Stamigna et al., 2012), де різниця у масі становить 7,54 %.

За показниками маси кореня рослин також було здійснено розподіл генотипів на три групи: з малою масою (до 49 г) – BC SCF-6, BC NPF-5, BC SCF-4, BC NPF-2, BC SCF-7; із середньою масою (від 50 до 59 г) – BC SCF-8, BC SCF-5, BC NPF-4, BC NPF-7, BC SCF-1, BC NPF-3, BC NPF-8, BC SCF-9; з великою масою (понад 59 г) – BC SCF-2, BC SCF-3, BC NPF-6, BC NPF-1.

За показником, зазначеним вище, рослини розподілені рівномірно, з невеликою перевагою рослин природного походження, середня маса кореня яких складає 54,75 г проти 52,22 г у рослин селекційно-генетичного походження, різниця між якими становить всього 4,62 %.

Також варто зазначити, що рослини генотипів BC NPF-6 та BC NPF-1 мають найвищі показники маси кореня, що є подібним до аналогічного показника у фазі квітування.

За показником загальної маси насіння рослини були розподілені на чотири наступні групи: з малою масою (до 69 г) – BC SCF-2, BC SCF-4, BC NPF-2, BC SCF-1; із середньою масою (від 70 до 79 г) – BC NPF-1, BC SCF-5, BC SCF-8, BC SCF-7; з великою масою (від 80 до 89 г) – BC SCF-9, BC SCF-6, BC NPF-5; з дуже великою масою (понад 89 г) – BC SCF-3, BC NPF-7, BC NPF-8, BC NPF-4, BC NPF-3, BC NPF-6.

За середньою масою насіння є невелика перевага у зразків рослин природного походження, що становить 3,48 %. Окремі досліджувані зразки рослин переважають інші за масою насіння від 11,64 % до 35,71 %.

Також варто зазначити, що найбільша маса насіння визначена у генотипа BC NPF-6, незважаючи на найменшу масу суцвіть цього зразка. Виявлено, що цей генотип має найкращі показники маси інших частин рослин, що робить його найціннішим зразком для селекційного процесу і створення високопродуктивних сортів. Варто сказати про високі показники продуктивності у рослин генотипу BC NPF-3, який має значну урожайність надземної маси та насіння.

Важливим показником, який характеризує успішність інтродукційного процесу і урожайний потенціал рослин є маса насіння. Проаналізовано масу насінин (1000 штук) інтродукованих генотипів (рис. 5. 26), що у свою чергу також дозволило розподілити їх на дві групи: рослини з малою масою насіння (до 3,5 г/1000 шт) – BC NPF-1, BC NPF-8, BC NPF-7, BC NPF-6 і рослини з великою масою (понад 3,5 г/1000 шт) – BC NPF-5, BC NPF-4, BC NPF-3, BC NPF-2.

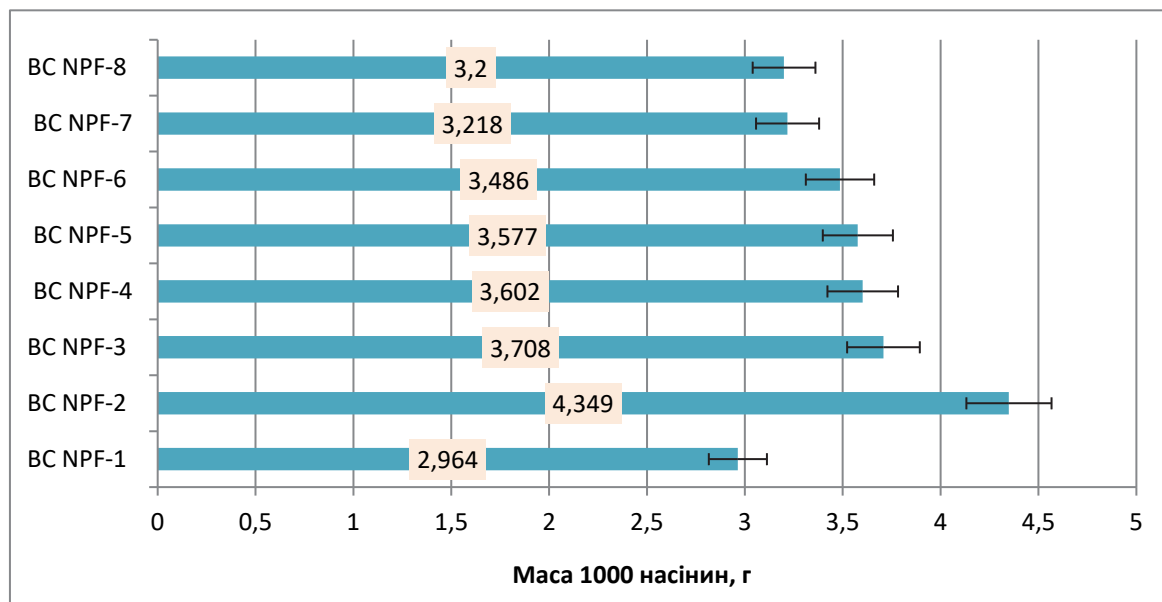


Рис. 5. 26. Маса 1000 насінин рослин інтродукованих популяцій *Brassica carinata*

Отримані дані свідчать про те, що рослини, які мали більшу загальну масу насіння, в цілому характеризуються низьким показником маси 1000 насінин. Проте, варто зауважити, що генотип BC NPF-3 демонструє високі результати – як за масою 1000 насінин, так і за загальною масою насіння з рослини.

Порівнюючи отримані нами результати щодо середньої маси 1000 насінин (3,513 г), з даними інших дослідників з'ясували, що вони були майже ідентичними до показників, отриманих у Північній Флориді (3,54 г) (Mulvaney et al., 2019) та в інших умовах (3,53 г) (Mohdaly et al., 2022).

Насіння в усіх представників округлої форми, тому крупність насіння можна визначати за діаметром самої насінини (рис. 5.27). Дослідження діаметру насінин *Brassica carinata* дозволили здійснити розподіл генотипів на дві групи: дрібнонасінні (з діаметром до 1,65 мм) – BC NPF-1, BC NPF-8, BC NPF-7, BC NPF-6 і крупнонасінні (з діаметром понад 1,65 мм) – BC NPF-5, BC NPF-4, BC NPF-3, BC NPF-2. Варто зазначити, що розподіл рослин за діаметром насінини корелює їхнім розподілом за масою 1000 насінин.

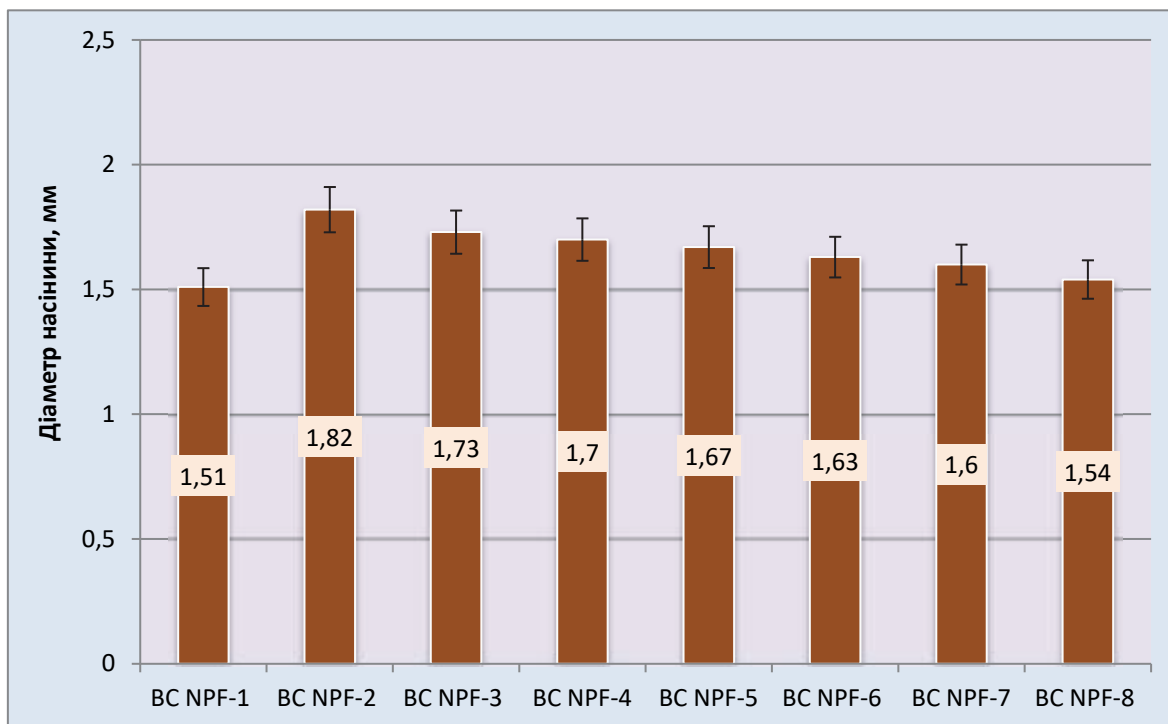


Рис. 5. 27. Діаметр насінини рослин інтродукованих популяцій *Brassica carinata*, мм

Встановлено, що за масою 1000 насінин існує суттєва різниця, залежно від генотипових особливостей селекційно-генетично створених форм рослин (рис. 5. 28). Аналіз отриманих даних дозволив розподілити відповідні генотипи на групи рослин з великою масою насіння (понад 3 г/1000 шт.) – BC SCF-3, BC SCF-4, BC SCF-5, BC SCF-6, BC SCF-8, BC SCF-9 і з малою масою насіння (до 3 г/1000 шт.) – BC SCF-1, BC SCF-2, BC SCF-7. За даними досліджень Ambaw et al. (2024) маса 1000 насінин рослин *Brassica carinata* варіює у межах 2,44–6,05 г залежно від сортових особливостей.

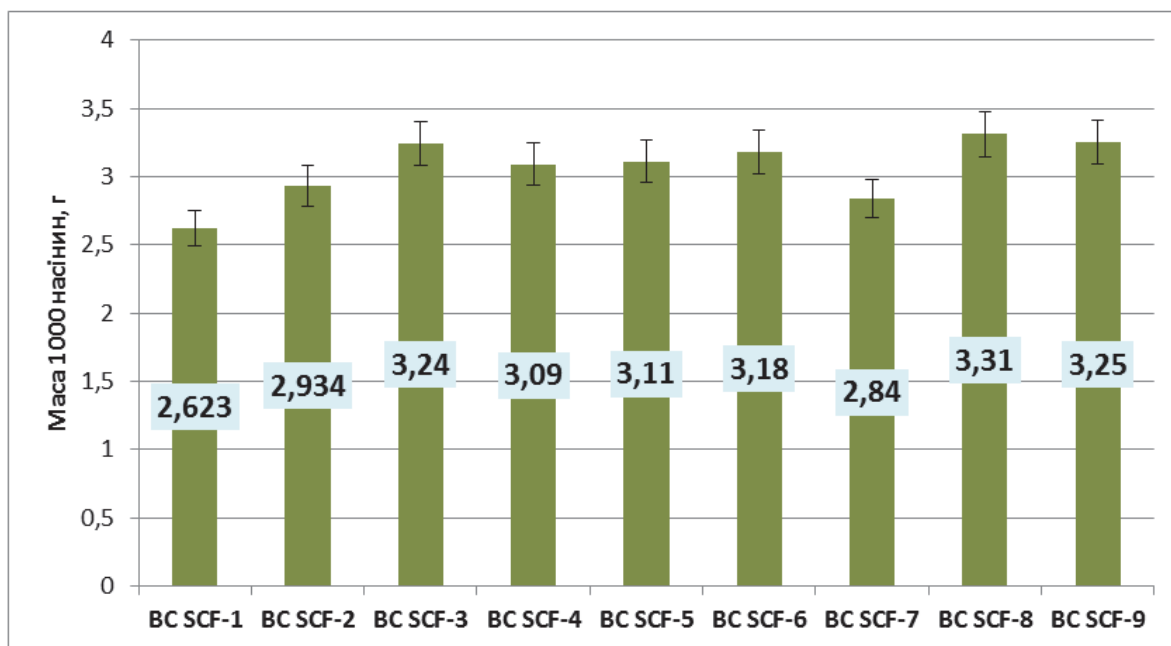


Рис. 5. 28. Маса 1000 насінин селекційно-генетичних форм рослин *Brassica carinata*

Виявлено, що лінійні розміри насінини тісно пов'язані із масою 1000 шт. Досліджені генотипи за діаметром насіння було розподілено на дві групи: з великим діаметром насінини ($> 1,55$ мм) – BC SCF-3, BC SCF-4, BC SCF-5, BC SCF-6, BC SCF-8, BC SCF-9; з малим діаметром насінини ($\leq 1,55$ мм) – BC SCF-1, BC SCF-2, BC SCF-7 (рис. 5.29).

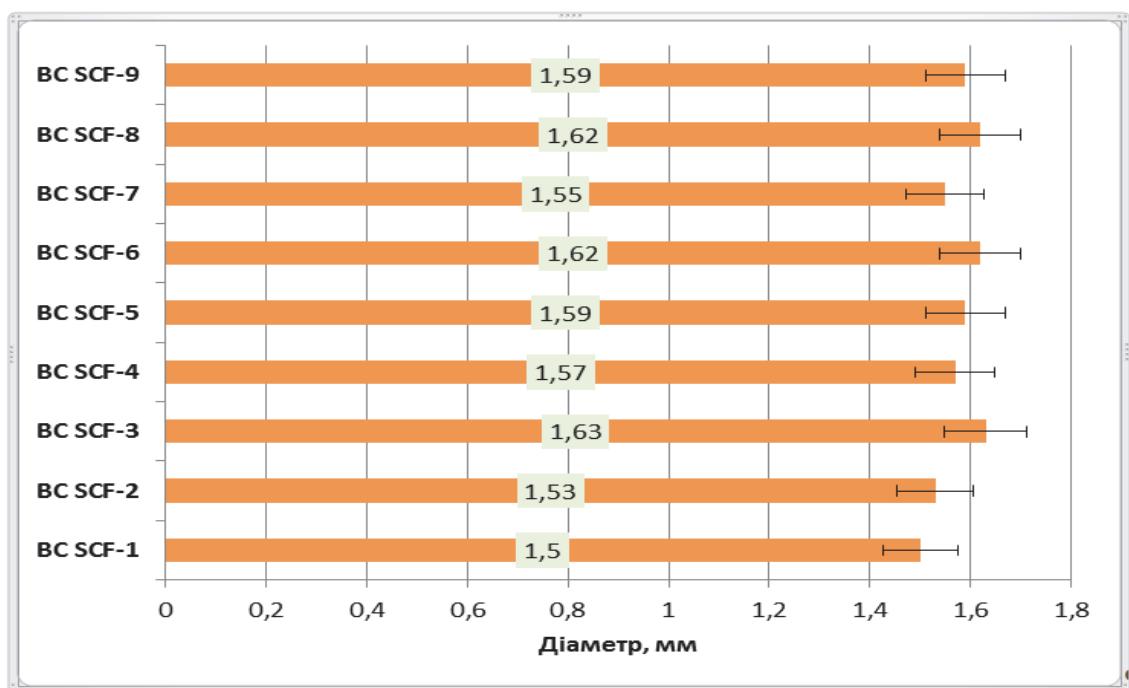


Рис. 5.29. Діаметр насінини селекційно-генетичних форм рослин *Brassica carinata*, мм

Варто зазначити, що у наявній науковій літературі дослідженню діаметру насіння рослин *Brassica carinata* не приділено уваги. Тому є перспектива розширення спектру генотипів для збору аналітичних даних і створення більш детальних груп за величиною насінин.

5.2. Фізіологічний стан рослин *Brassica carinata* в умовах інтродукції

В умовах сьогодення, як у регіональному, так і в світовому масштабі, важливим науковим питанням є пошук механізмів стійкості живих організмів до біотичних та абіотичних чинників довкілля. Рослини, які є одним із найважливіших компонентів у забезпеченні життєдіяльності біологічних систем на Землі, потребують значної уваги та взаємодії широкого кола фахівців (ботаніків, фізіологів, генетиків, екологів, біохіміків, біотехнологів, селекціонерів), що сприятиме ефективному збереженню і збагаченню фіторізноманіття.

Аналіз фізіологічно активних сполук різних генотипів рослин *Brassica carinata* за допомогою мультипигментного вимірювача MPM-100 (ADC BioScientific Ltd, UK) на розвинутих листках рослин дозволив виявити певні закономірності у динаміці їх накопичення упродовж вегетаційного періоду (рис. 5. 30).

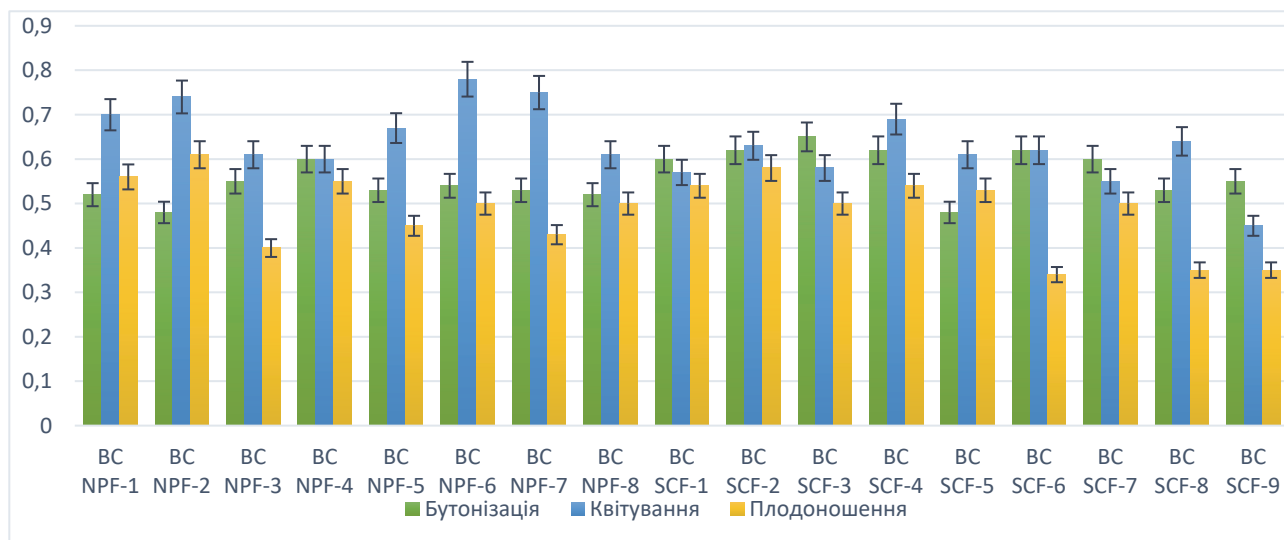


Рис. 5. 30. Динаміка накопичення хлорофілу у листках різних генотипів рослин *Brassica carinata* залежно від фази розвитку (n = 10)

Коливання хлорофілу (ChlM) головним чином пов'язують із набуттям генетичної стійкості рослин до впливу ультрафіолетового випромінювання (Jovanic et al., 2022). Встановлено, що майже у всіх досліджених зразках відбувається зростання рівня хлорофілу в листках, від бутонізації до квітування, та зменшення до фази плодоношення. Високий вміст хлорофілу свідчить про оптимізовану роботу фотосистеми II, що в свою чергу має позитивно відобразитися на продуктивних показниках рослин. За допомогою статистичної обробки даних виділено групи рослин щодо стійкості фотосинтетичного апарату до умов навколишнього середовища: високостійкі – BC NPF-1, BC NPF-2, BC NPF-4, BC NPF-6, BC NPF-7, BC SCF-1, BC SCF-2, BC SCF-3, BC SCF-4; стійкі – BC NPF-3, BC NPF-5, BC NPF-8, BC SCF-5, BC SCF-6, BC SCF-7, BC SCF-8, BC SCF-9.

Відомо, що зі зростанням рівня хлорофілу відбувається зменшення рівня іншої складової оптимізованої роботи фотосистеми II – флавонолу (Rea et al., 2022; Ali et al., 2023; Negussu et al., 2023). У нашому дослідженні в цілому спостерігали зменшення рівня флавонолу у листках рослин усіх генотипів залежно від фази розвитку (рис. 5. 31).

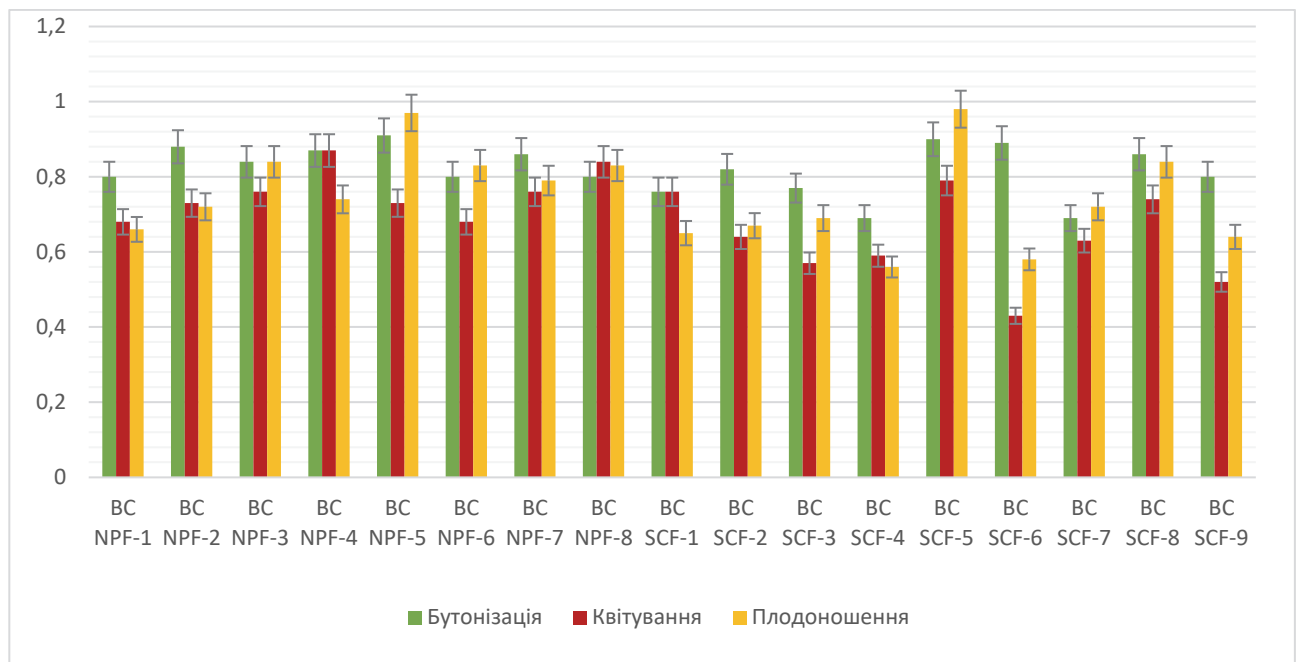


Рис. 5. 31. Динаміка накопичення флавонолу у листках різних генотипів рослин *Brassica carinata* залежно від фази розвитку (n = 10)

Але варто зазначити, що вміст флавонолів у листках досліджуваних генотипів *B. carinata* не завжди прямопропорційно зменшувався зі збільшенням хлорофілів і навпаки. Статистична обробка даних дозволила вичленити генотипи з найоптимальнішою роботою фотосистеми II – BC NPF-1, BC NPF-6, BC SCF-1, BC SCF-2, BC SCF-3, BC SCF-4.

На думку Ali et al. ще одним важливим показником оптимальної роботи фотосистеми II є азотно-флаваноловий індекс (NFI), адже його відносно високий рівень у листках у впродовж вегетаційного періоду забезпечує збалансованість фізіологічних процесів, що у свою чергу попереджує абортівність квіток рослин, формування повноцінних плодів та насіння (Ali et

al., 2023). В нашому дослідженні азотно-флаваноловий індекс варіював залежно від генотипу та фази розвитку (рис. 5.32).

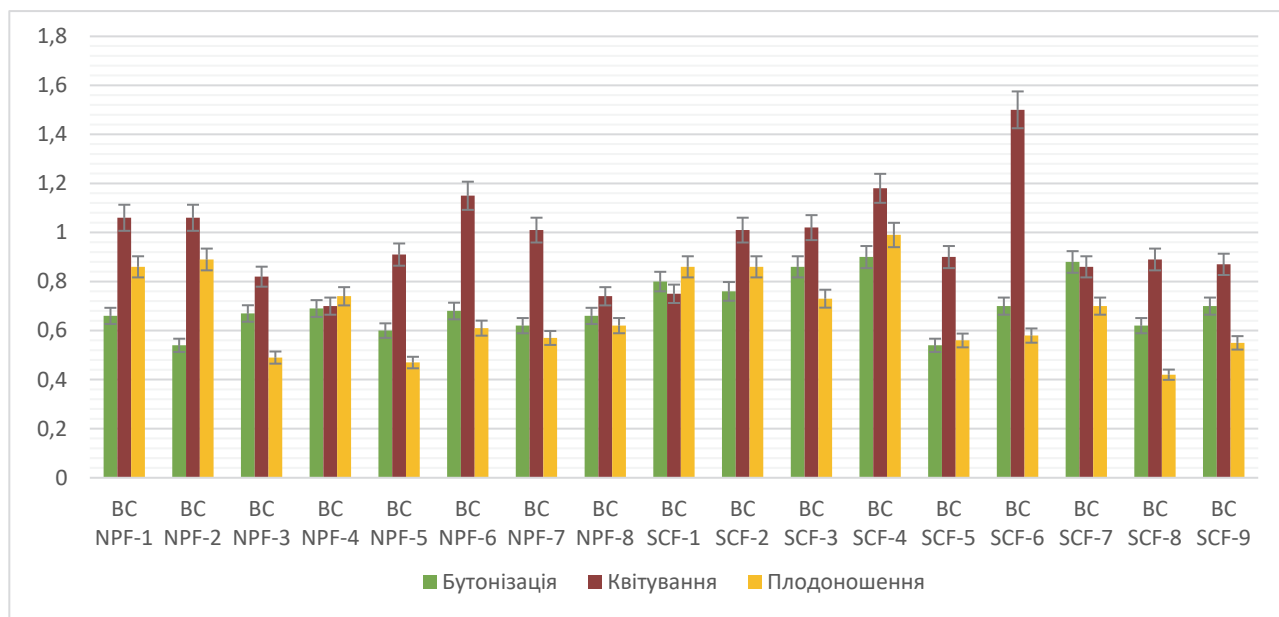


Рис. 5. 32. Азотно-флаваноловий індекс у листках різних генотипів рослин *Brassica carinata* залежно від фази розвитку (n = 10)

У результаті статистичної обробки виділено дві групи стійкості рослин: високостійкі – BC NPF-1, BC NPF-2, BC NPF-4, BC NPF-6, BC NPF-7, BC SCF-1, BC SCF-2, BC SCF-3, BC SCF-4; стійкі – BC NPF-3, BC NPF-5, BC NPF-8, BC SCF-5, BC SCF-6, BC SCF-7, BC SCF-8; BC SCF-9.

Отримані результати дозволяють оцінити фізіологічний стан рослин залежно від генотипових особливостей та періоду їх розвитку і визначити найбільш стійкі зразки.

Таким чином, скринінг хлорофілу, флаванолів і азотно-флаванолового індексу дав змогу з'ясувати роботу фотосистеми II досліджуваних генотипів та розподілити їх на дві групи стійкості – високостійкі і стійкі. З-поміж 9 високостійких зразків, створених селекційно-генетичним шляхом, варто виділити BC SCF-12, який за усіма показниками у період розвитку виявив кращий стан фізіологічних процесів та найвищий вміст фізіологічно-активних сполук. Щодо решти зразків варто зазначити, що дисбаланс речовин є тимчасовим явищем, оскільки після подальших селекційно-генетичних досліджень буде

досягнуто закріплення фізіологічних механізмів стійкості на генетичному рівні. Це дозволить відібрати генотипи рослин із підвищеною стійкістю до біотичних і абіотичних факторів, що сприятиме поліпшенню процесу акліматизації та селекції і відбору високоадаптивних та продуктивних генотипів для введення в культуру, а також – для різнопланового використання.

5.3. Біохімічні особливості рослин різних генотипів *Brassica carinata*

На тепер актуальним є запровадження у сільськогосподарське виробництво нових, нетрадиційних високопродуктивних олійних культур, здатних не тільки конкурувати з ріпаком, але і переважати його за важливими характеристиками як джерела якісної харчової та технічної олії. До таких перспективних олійних рослин можна віднести гірчицю ефіопську (*Brassica carinata*) родини *Brassicaceae*.

Brassica carinata – рослина багатофункціонального використання, котра насамперед забезпечує нехарчовою олійною сировиною з низьким вмістом вуглецю, характеризується непрямим впливом зміни землекористування. Вона вирощується для виробництва екологічно чистого біопалива, біопродуктів та борошна з насіння з високим вмістом білка (Bashyal et al., 2021). Вміст поліфенольних сполук сировини у деяких дослідженнях коливається від 43 до 131 мг/100 г (Mohdaly, 2022). Одним із важливих напрямів дослідження даної культури є селекція за вмістом ерукової кислоти, високим чи низьким, залежно від мети (Roslinsky et al., 2021).

З огляду на те, в яких умовах вирощуються рослини *B. carinata*, вони мають ряд агротехнічних переваг у порівнянні з іншими олійними культурами, що характеризуються подібними екологічними адаптаційними властивостями (Alemayehu, 2001). Урожайність насіння *B. carinata* та *B. napus*, в умовах Італії, значно відрізнялася від регіону походження рослин, різниця

між якими може сягнути 30 % з максимальним показником 4 т/га (Gatto et al., 2015). Урожайність насіння *B. carinata* без внесення добрив становило 1074 кг/га, а з внесенням азоту (179 кг/га) – збільшилась до 2783 кг/га (Bashyal et al., 2021). Це стосувалося також продуктивності олії та виходу ерукової кислоти: виявлено збільшення збору олії за внесення азоту (179 кг/га) до 1523 кг/га порівняно з контрольним варіантом (без азоту) – до 612 кг/га та ерукової кислоти від 259 л/га (без азоту) до 646 л/га за внесення азоту. Середня врожайність 11 генотипів в умовах Південно-Східної Америки становила від 2814 до 3401 кг/га, загальний вміст олії коливався від 42,0 до 52,4 %, а вміст ерукової кислоти (C22:1) від 40,7 до 42,9 % (Kumar et al., 2020).

Загальний вміст сухої речовини є важливою функціональною ознакою рослин (Vaieretti, 2007). Одним із найважливіших параметрів дослідження енергетичних культур є вміст сухої речовини, що тісно пов'язано з фотосинтетичною активністю та урожайністю рослин (Nagashide, 2022). Вміст сухої речовини, загальний вміст цукрів і моноцукрів представлений на рис. 5.33.

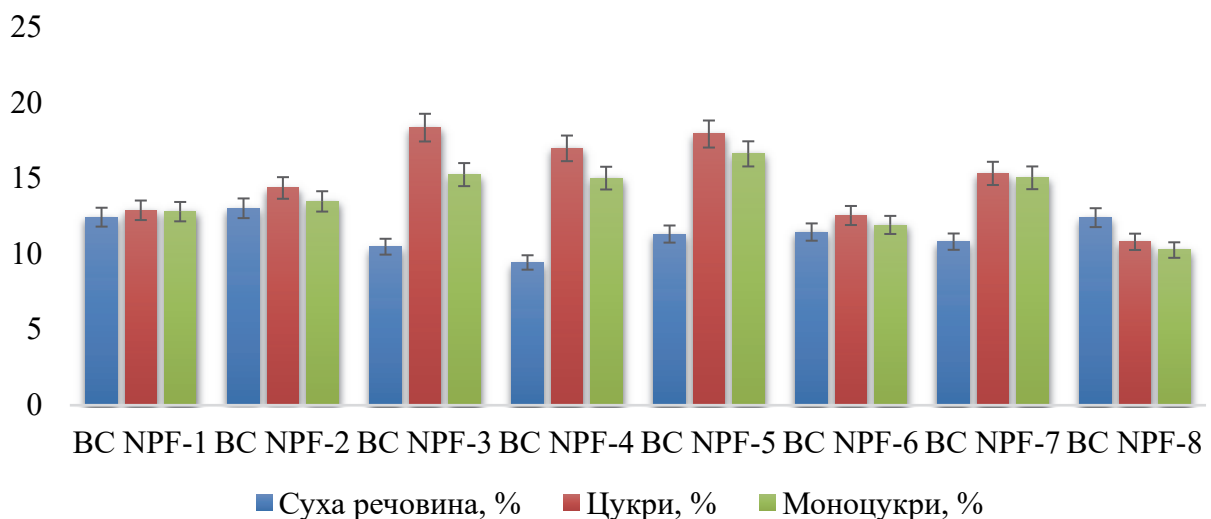


Рис. 5. 33. Вміст сухої речовини, загальний вміст цукрів та моноцукрів у надземній масі генотипів *Brassica carinata* у період стеблуння-початок бутонізації

У період стеблуння-початок бутонізації вміст сухої речовини у рослин *B. carinata* становив від 9,44 % (BC NPF-4) до 13,02 % (BC NPF-2) залежно від

генотипу. Завдяки регуляторній функції у рослинних тканинах, цукри впливають на всі фази життєвого циклу рослин, взаємодіючи з фітогормонами, контролюють ріст та розвиток (Jeandet et al., 2022). Загальний вміст цукрів у досліджуваних рослин становив від 10,80 % (BC NPF-8) до 18,35 % (BC NPF-3) залежно від генотипу. Загальний вміст моноцукрів у рослин *B. carinata* в період стеблування-початок бутонізації становив від 10,26 % (BC NPF-8) до 16,62 % (BC NPF-5) залежно від генотипу. Вміст моноцукрів у досліджуваних рослин був меншим за загальний вміст цукрів у межах 0,09–3,11 % залежно від генотипу.

Іншими дослідниками зазначається, що вміст сухої речовини та протеїну в шроті рослин *B. carinata* був більшим у порівнянні з ріпаком (Ban, 2017).

У період стеблування – початок бутонізації також визначено вміст дубильних речовин, аскорбінової кислоти і титровану кислотність водних екстрактів (рис. 5.34). Сумарний вміст вільних органічних кислот та дубильних речовин у досліджуваних екстрактах *B. carinata* становив 2,02–2,43 % та 0,16–0,48 % залежно від генотипу. Вміст аскорбінової кислоти у надземній частині рослин *B. carinata* становив від 256,35 мг/100 г (BC NPF-1) до 377,66 мг/100 г (BC NPF-4) залежно від генотипу.

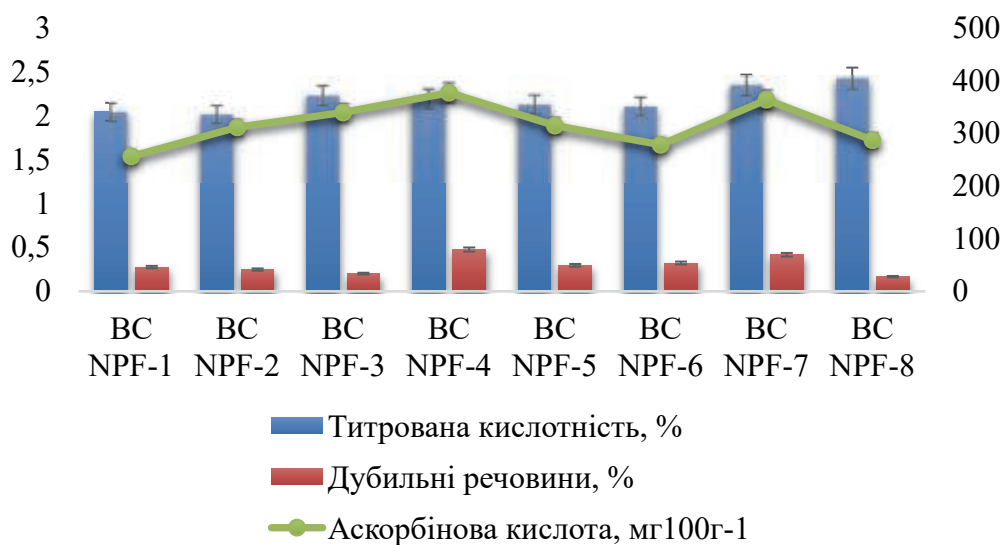


Рис. 5.34. Загальний вміст дубильних речовин, аскорбінової кислоти і титрована кислотність у надземній масі генотипів *Brassica carinata* у період стеблування-початок бутонізації

У період плодоношення спостерігалися зміни щодо вмісту сухої речовини, цукрів та моноцукрів. Вміст сухої речовини збільшувався у порівнянні з фазою стеблуння-початок бутонізації і становив від 19,79 % (BC NPF-8) до 21,77 % (BC NPF-7) залежно від генотипу (рис. 5. 35). Середнє значення сухої речовини у період стеблуння-початок бутонізації для усіх генотипів становив 11,42 %, тоді як у період плодоношення – 20,66 %, що у 1,8 рази більше. Загальний вміст цукрів у досліджуваних рослин в період плодоношення був від 5,03 % (BC NPF-6) до 7,28 % (BC NPF-5). У середньому для усіх генотипів вміст цукрів у період стеблуння-початок бутонізації становив 14,90 %, а в період плодоношення – 5,87 %, що у 2,54 рази менше. Середній вміст моноцукрів у період стеблуння-початок бутонізації становив 13,80 %, у період плодоношення – 4,51 %, що зменшилось у 3 рази.

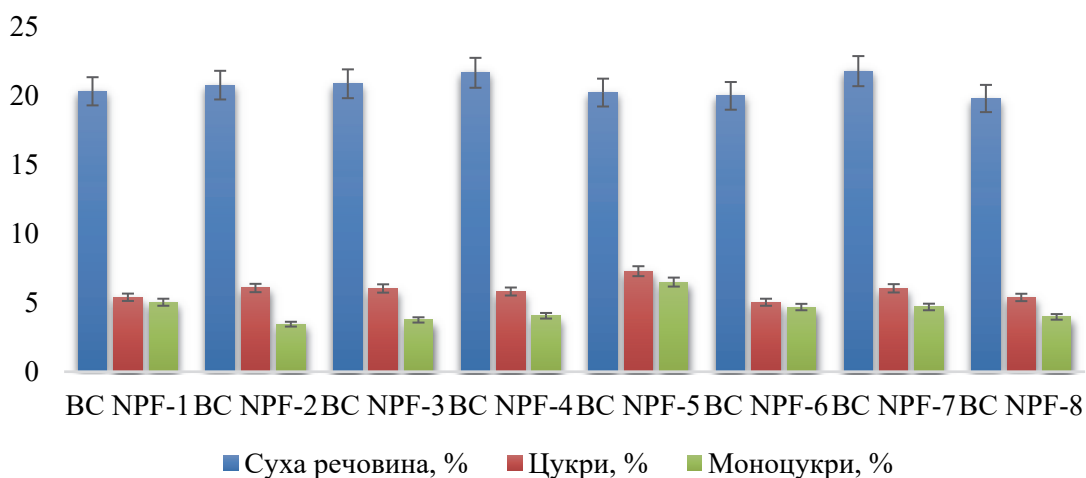


Рис. 5. 35. Вміст сухої речовини, загальний вміст цукрів і моноцукрів у надземній масі генотипів *Brassica carinata* у період плодоношення

У період плодоношення поряд зі стеблуння – початком бутонізації також визначали вміст дубильних речовин, аскорбінової кислоти та органічних кислот у сировині рослин *B. carinata* (рис. 5. 36). Вміст дубильних речовин у цей період становив від 0,25 % (BC NPF-8) до 1,03 % (BC NPF-4) залежно від генотипу. У період плодоношення сумарний вміст дубильних

речовин (0,73 %) збільшувався у 2,43 рази порівняно з періодом стеблуння-початком бутонізації (0,30 %).

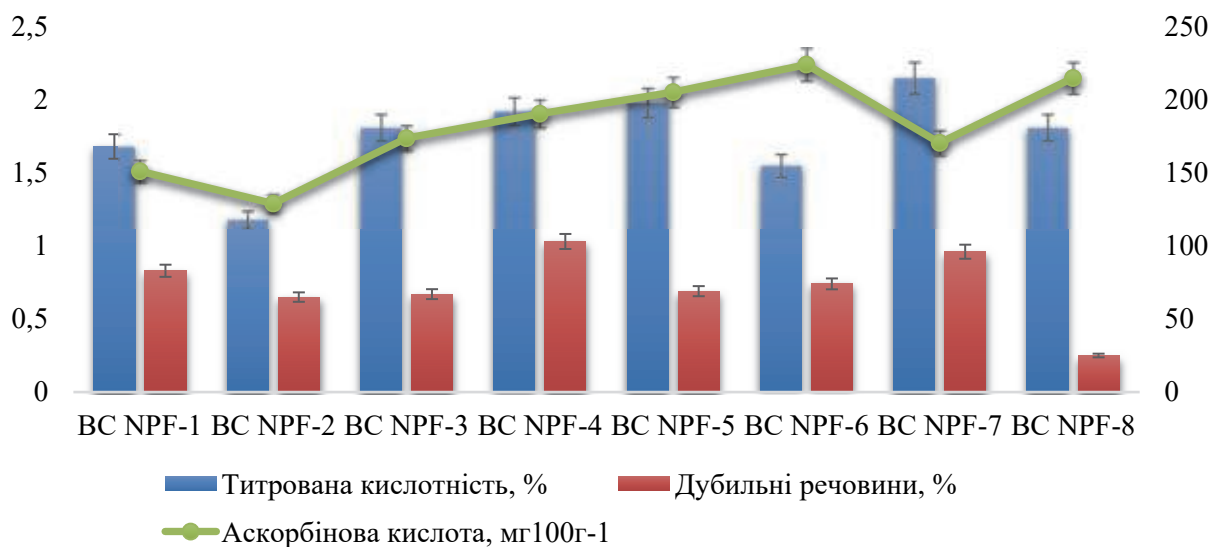


Рис. 5. 36. Загальний вміст дубильних речовин, аскорбінової кислоти і титрована кислотність у надземній масі генотипів *Brassica carinata* у період плодоношення

Титрована кислотність досліджуваних генотипів *B. carinata* була від 1,18 % (BC NPF-2) до 2,15 % (BC NPF-7). Її середній вміст у досліджуваних генотипів у період стеблуння – початок бутонізації становив 2,19 %, а в період плодоношення – зменшився до 1,76 %. Досліджувані рослини характеризувались рівнем аскорбінової кислоти у період плодоношення від 128,96 мг/100 г (BC NPF-2) до 224,0 мг/100 г (BC NPF-6), залежно від генотипу. Середній вміст аскорбінової кислоти для усіх генотипів *B. carinata* у період стеблуння-початок бутонізації становив 316,18 мг/100 г, тоді як у період плодоношення цей показник зменшувався до 182,32 мг/100 г або в 1,73 рази.

У насінні 45 генотипів, які досліджувались в Індії, визначено вміст аскорбінової кислоти в межах 60–80 мг/г (Kumar et al., 2017).

Визначено, що вміст ліпідів у період стеблуння-початок бутонізації рослин *B. carinata* становив від 5,26 % (BC NPF-5) до 10,31 % (BC NPF-3)

(рис. 5.37), вміст азоту – 2,53 % (BC NPF-1) до 2,98 % (BC NPF-3 та BC NPF-7), вміст протеїну – від 13,98 % (BC NPF-1) до 16,52 % (BC NPF-3).

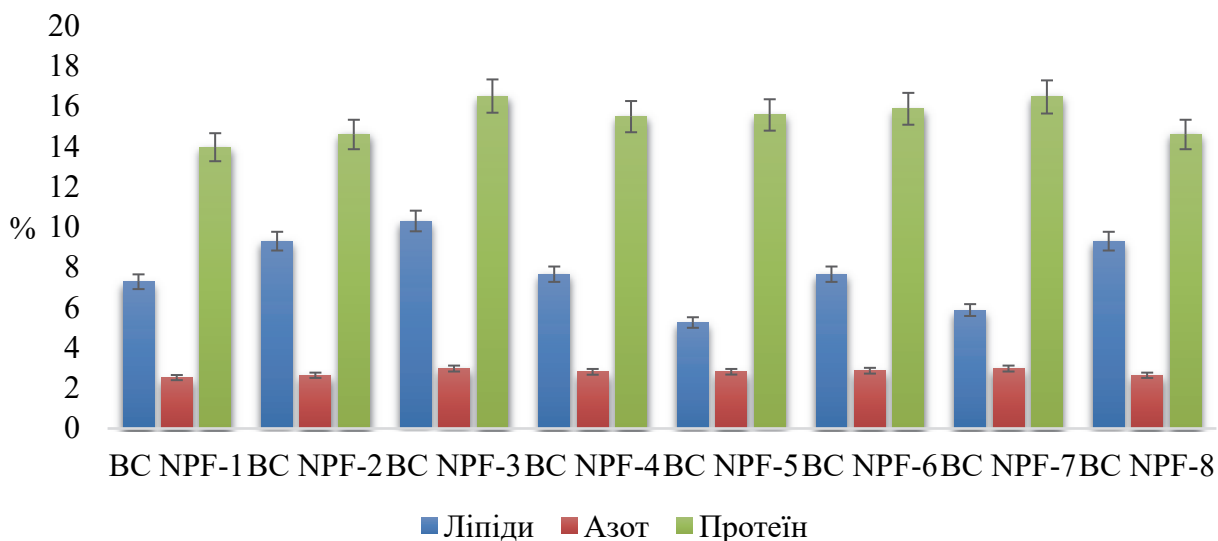


Рис. 5. 37. Загальний вміст ліпідів, азоту і протеїну в надземній масі генотипів *Brassica carinata* у період стеблуння-початок бутонізації

У період плодоношення в надземній частині досліджуваних рослин вміст ліпідів становив від 3,15 % (BC NPF-8) до 10,41 % (BC NPF-3), азоту – від 1,53 % (BC NPF-2) до 1,77 % (BC NPF-8), протеїну від 8,49 % (BC NPF-2) до 9,8 % (BC NPF-8), залежно від генотипу (рис. 5. 38).

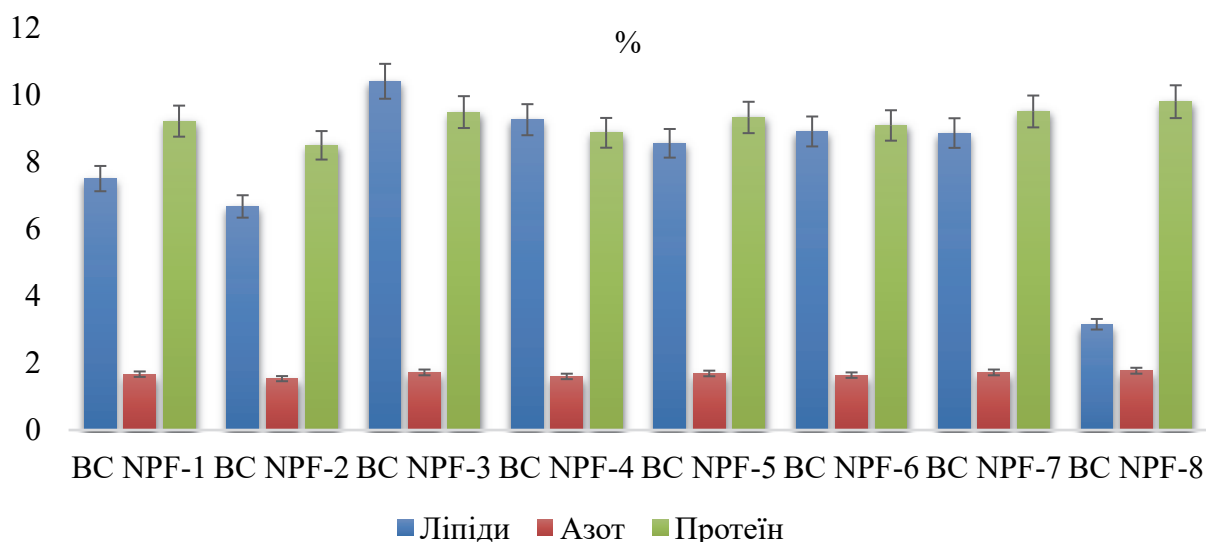


Рис. 5. 38. Загальний вміст ліпідів, азоту і протеїну в надземній масі генотипів *Brassica carinata* у період плодоношення

Таким чином, протягом вегетаційного періоду рослини *Brassica carinata* активно накопичують нутрієнти у надземній масі залежно від фази розвитку та генотипових особливостей. На початку вегетації досліджувані рослини характеризувались інтенсивнішим накопиченням аскорбінової кислоти, цукрів, моноцукрів, вільних органічних кислот, золи, протеїну порівняно з періодом плодоношення. Навпаки, вміст сухої речовини і дубильних речовин збільшувався до періоду плодоношення.

Вміст ліпідів у насінні. У багатьох рослинах ліпіди становлять до 80 % сухої маси запасуючих тканин. У насінні ліпіди накопичуються у вигляді триацилгліцеринів, які утворюються шляхом розширення мембранно-ліпідного біосинтетичного шляху, спільного для всіх рослинних тканин (Valker and Kinney, 2001). Дослідження насіння різних років урожаю показало деякі відмінності у накопиченні ліпідів залежно від генотипу. Вміст сухої речовини в насінні 2023 року урожаю становив від 91,08 % (BC NPF-1) до 94,21 % (BC NPF-7) залежно від генотипу та походження зразків (рис. 5. 39). Вміст ліпідів у досліджуваному насінні був від 21,1 % (BC SCF-1) до 36,02 % (BC NPF-2), залежно від генотипу.

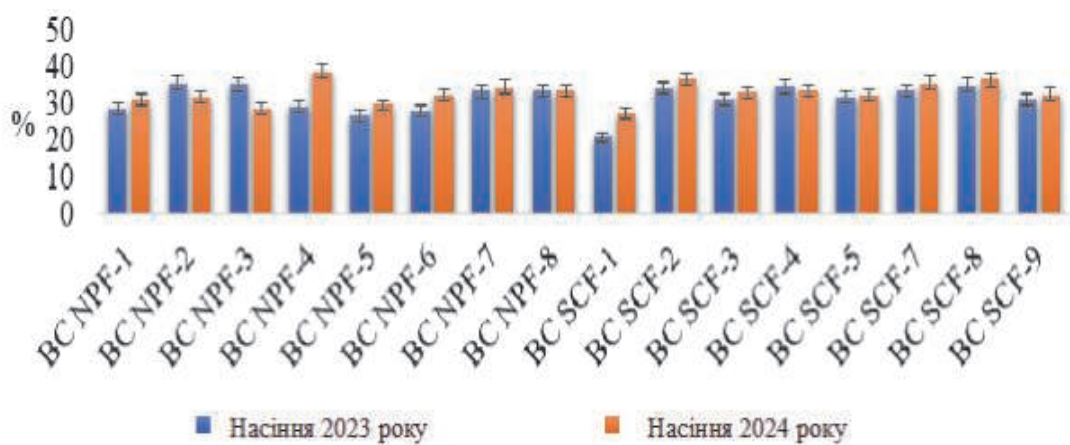


Рис. 5. 39. Вміст ліпідів у насінні *Brassica carinata* залежно від генотипових особливостей і року урожаю

Вміст жирних олій у генотипів *Brassica carinata*, вирощуваних в Ірані, становив 25,1–29,1 % (Sharafi et al., 2015; Kumar et al., 2017), в умовах Індії був

значно вищий та досягав 37,88–41,12 %. Вміст жирних олій та протеїну в насінні різних генотипів в умовах Єгипту становив 27,0–38,4 % та 24,6–35,4 % відповідно (Mohdaly, 2022).

5.4. Енергетична цінність олійних рослин роду *Brassica*

Визначено енергетичну цінність насіння рослин різних форм і сортів *Brassica napus* f. annua DC. (рис. 5. 40). Найбільшою калорійністю насіння серед зразків вирізнялася форма EORIAFA. У цілому енергетична цінність насіння досліджуваних форм і сортів рослин становила від 5560 до 6331 ккал/кг.

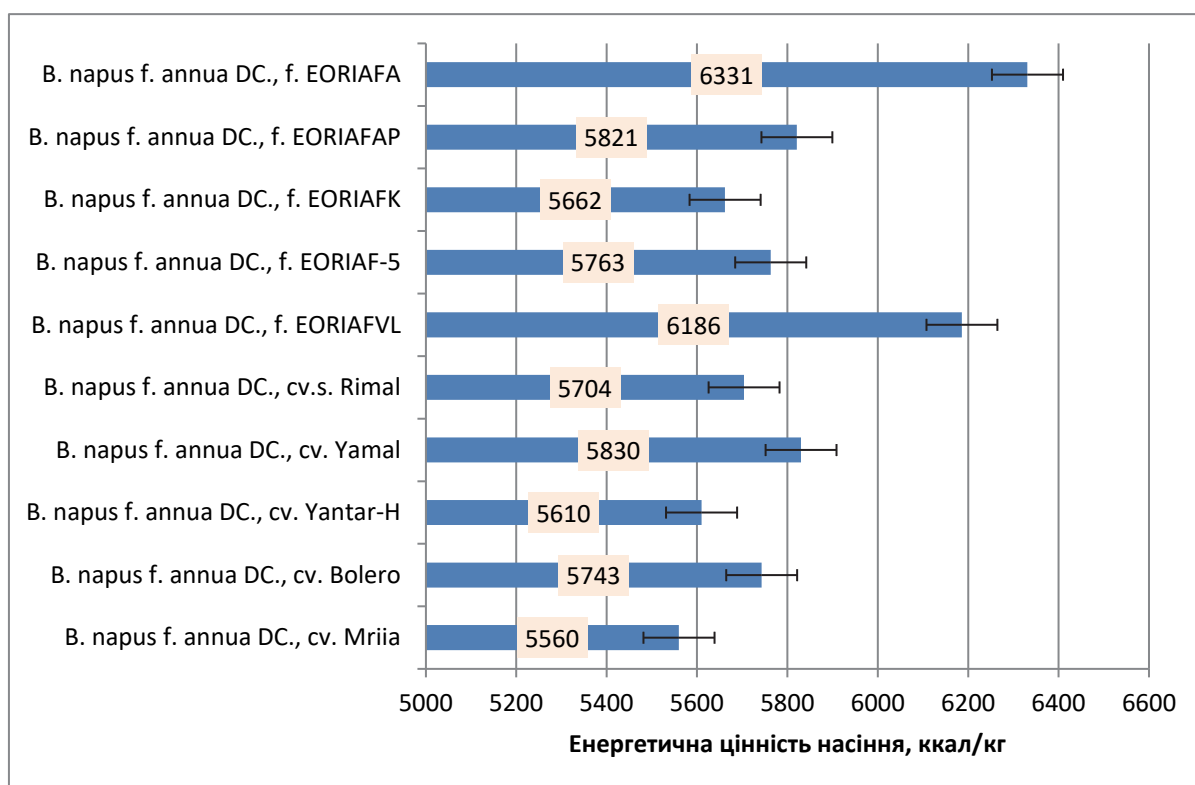


Рис. 5. 40. Енергетична цінність насіння рослин різних форм і сортів *Brassica napus* f. annua DC.

За енергетичною цінністю насіння генотипи рослин *Brassica carinata* суттєво відрізняються (рис. 5. 41). У цілому енергетична цінність насіння інтродукованих зразків рослин становила від 5454 до 5830 ккал/кг. Серед досліджуваних форм особливо вирізнялись BC NPF-7 та BC NPF-8, але найбільшу теплоємність встановлено у генотипі BC NPF-8.

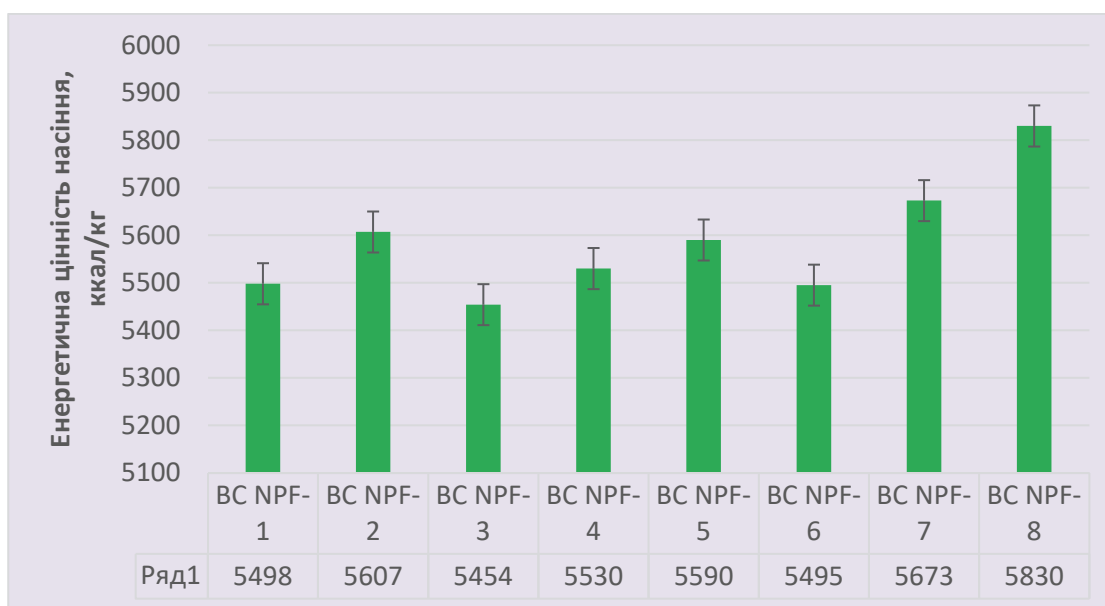


Рис. 5. 41. Енергетична цінність насіння рослин інтродукованих популяцій *Brassica carinata*

У селекційно-генетичних форм рослин *Brassica carinata* також виявлено суттєву різницю у калорійності насіння, яка варіювала у межах від 5369 до 5900 ккал/кг (рис. 5. 42). Серед досліджуваних генотипів найвищою енергетичною цінністю вирізнявся BC SCF-6. Варто відмітити той факт, що досліджень, пов'язаних із встановленням калорійності фітомаси цього виду, в науковій літературі не знайдено.

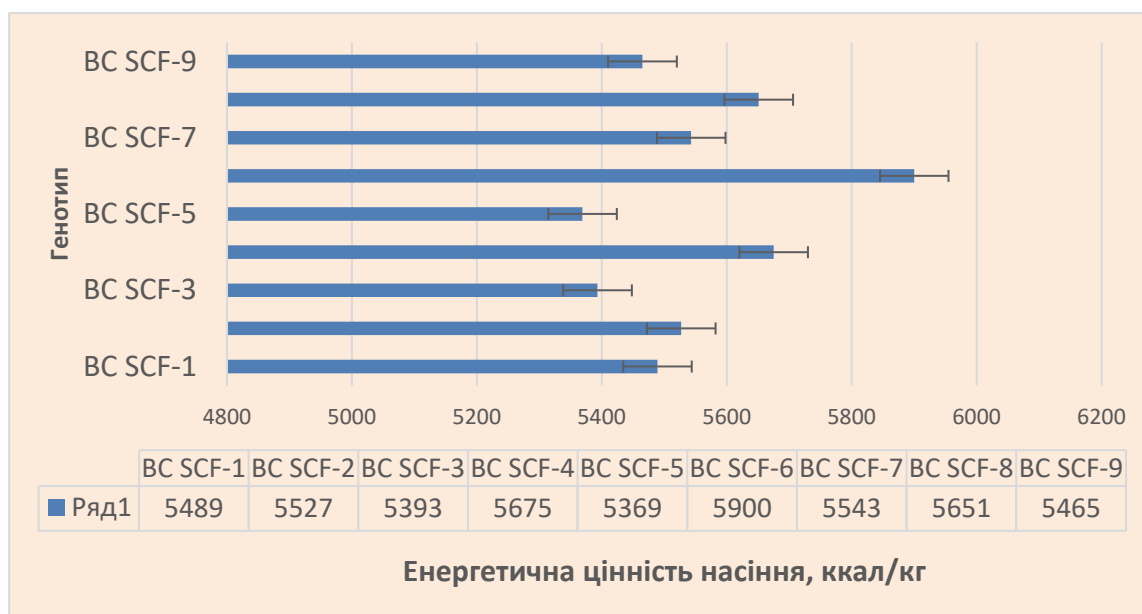


Рис. 5. 42. Енергетична цінність насіння рослин селекційно-генетичних форм *Brassica carinata*

Виявлено, що надземна частина у рослин *Brassica carinata* (побічна продукція) має значно меншу калорійність порівняно з насінням (рис. 5. 43). Майже всі генотипи, які забезпечували меншу калорійність насіння, демонстрували обернено пропорційні показники за надземною фітомасою.

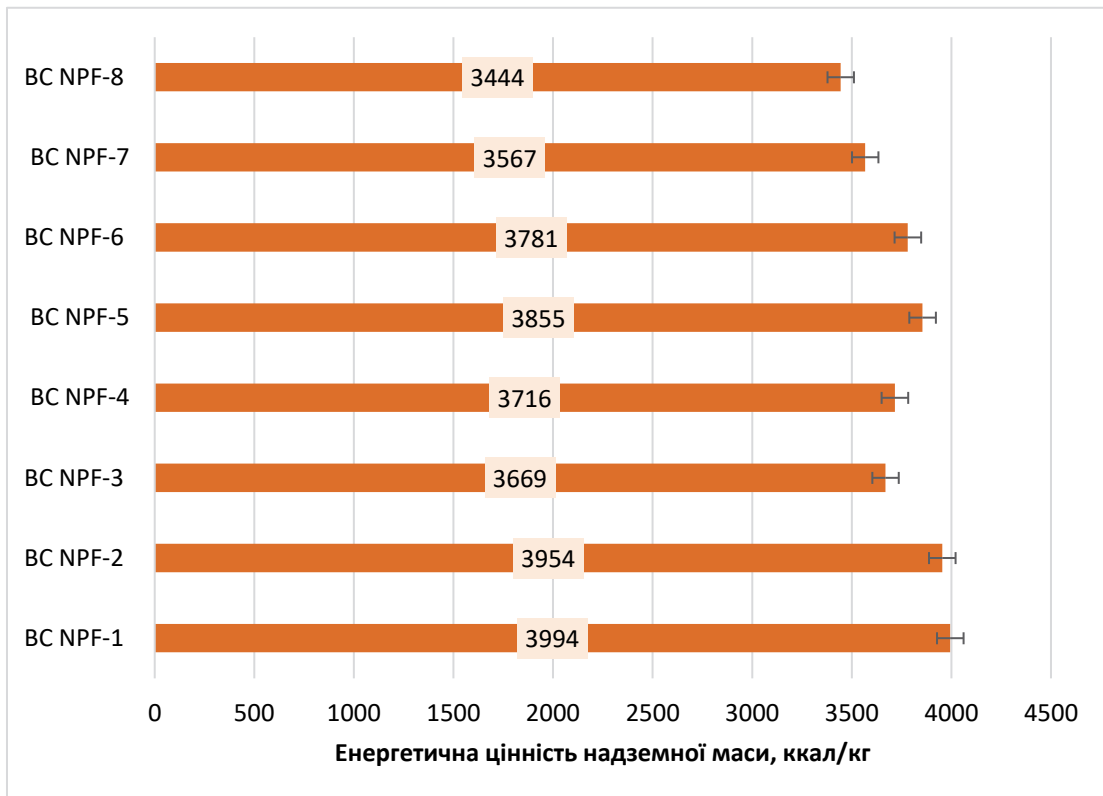


Рис. 5. 43. Енергетична цінність надземної маси рослин інтродукованих популяцій *Brassica carinata*

Таким чином, з'ясовано, що фітомаса і насіння олійних рослин роду *Brassica* характеризуються високою енергетичною цінністю. Надземна маса рослин різних генотипів *Brassica carinata* забезпечила від 3444 (BC NPF-8) до 3994 ккал/кг (BC NPF-1). Найвищою калорійністю насіння характеризуються генотипи BC NPF-8 (5830 ккал/кг) та BC SCF-6 (5900 ккал/кг). В цілому калорійність насіння зразків *Brassica napus* дещо перевищує (на 191-431 ккал/кг) *Brassica carinata* і в найкращих генотипів становить 6186-6331 ккал/кг.

5. 5. Біохімічний склад олії *Brassica carinata* залежно від генотипових особливостей рослин

Важливим завданням роботи є поліпшення якісно-кількісних характеристик фітосировини і підвищення продуктивності рослин *B. carinata*, що сприятиме створенню збалансованих харчових продуктів, цінних лікарських засобів на основі її ліпідів та олій технічного призначення.

За результатами досліджень проведено аналіз олії генетично різноманітних зразків природних популяцій і селекційно-генетичних ліній гірчиці ефіопської – 16 зразків.

Проведено скринінг літературних та інформаційних джерел, підібрано й опрацьовано методики. Відомо, що найбільш достовірними показниками, які характеризують якість і автентичність олії та олійно-жирової сировини є жирнокислотний та ацилгліцериновий склади, а також параметри стеринової фракції, які визначають хроматографічними та спектрометричними методами.

Методичні аспекти досліджень. Рослинні олії є леткі (ефірні) та нелеткі, тобто жирні. Жирні олії рослин цінуються за компонентний набір – жирні кислоти, які займають важливе місце у життєдіяльності організму людини, особливо незамінні. Зазвичай, такі олії класифікують, орієнтуючись на вміст певних жирних кислот, а саме:

- лауринова група – олії, які мають у своєму складі лауринову та ін. низькомолекулярні кислоти (кокосова, пальмоядрова олії);
- ерукова група – олії, які містять ерукову, нервонову, ейкозенову кислоти (це високоерукові олії ріпаку, гірчиці, суріпиці);
- пальмітинова група – олії, які характеризуються високим вмістом пальмітинової кислоти (пальмова, бавовняна олії);
- олеїнова група – найбільший вміст олеїнової кислоти (оливкова, високоолеїнова соняшникова, вівсяна, арахісова, абрикосова, сафлорова, рисова, фісташкова олії);

- олеїново-лінолева група – олії цієї групи паритетно містять олеїнову та лінолеву кислоти (кунжутна, вишнева олії);
- лінолева група – переважає лінолева кислота (соняшникова, кукурудзяна, конопляна, гарбузова, кедрова олії);
- α -ліноленова група включає олії з підвищеним вмістом α -ліноленової кислоти (лляна, гірчична, пшенична, соєва олії).

Окремі рослинні олії мають здатність до висихання. За цією властивістю їх ранжують на групи:

- висихаючі (гліцериди ліноленової кислоти) – на повітрі зазнають окиснення, в результаті чого утворюють гладку, прозору, еластичну, суху плівку, яка нерозчинна в органічних розчинниках (лляна, коноплева, перилова, рицинова олії);
- напіввисихаючі (гліцериди ліноленової кислоти) – плівка утворюється повільно, липка, м'яка і не така тривка, як у висихаючих олій (соняшникова, кукурудзяна, макова, соєва олії);
- невисихаючі (гліцериди олеїнової кислоти) – не утворюють плівок та не загущуються під час нагрівання (оливкова, арахісова, гірчична, пальмова олії).

У нашому дослідженні ми з'ясовували олійність зразків, форм і сортів рослин гірчиці ефіопської.

Визначення загального кількісного вмісту жирної олії у насінні гірчиці ефіопської проводили у лабораторних умовах із дотриманням всіх методичних вимог. Наважка насіння – 1(2) г, повторність – двократна. Наважку абсолютно сухого насіння поміщали в пакет із фільтрувального паперу, який попередньо сушили протягом 1 год за температури 100-105°C, потім охолоджували і зважували. Пакети з наважками насіння поміщали у бюкси з притертою пробкою, заливали петролейним ефіром та витримували 24 години. Потім пакети поміщали до апарату Сокслета на 24 години для екстракції. По

завершенню екстракції отримували олію в колбі апарату. Отриманий зразок олії після повного видалення (випаровування) ефіру використовували у подальших хроматографічних дослідженнях. Пакети з апарату Сокслета переміщали до кристалізатора і очікували на повне випаровування розчинника, а потім сушили за температури 100-105°C у сушильній шафі. Після охолодження в ексикаторі проби зважували на аналітичних вагах. Різниця у вазі пакета з наважкою насіння до і після екстракції дорівнює масі олії, тобто її кількісному вмісту.

$$X = m_1 * 100 / m_2$$

де, m_1 – пакет із наважкою до екстракції

m_2 – пакет із наважкою після екстракції

Для того, щоб розуміти характеристики будь-якої рослинної олії, її досліджують у лабораторних умовах, насамперед для встановлення жирно-кислотного складу. Одним із сучасних методів визначення складу рослинних олій є капілярна газова хроматографія. Вважається, що цей метод у світовій лабораторній практиці є одним із найефективніших. В сучасній газовій хроматографії використовують високоефективні капілярні колонки, які дозволяють отримати інформацію для виявлення жирів.

Визначення жирнокислотного складу олій із насіння гірчиці ефіопської (зразків різних генотипів) здійснено за допомогою методу газорідинної хроматографії. Зразки для дослідження готували згідно вимог ДСТУ ISO 5509-2002. Принцип пробопідготовки засновано на луговому гідролізі тригліцеридів до вільних жирних кислот із послідуючим отриманням реакції етерифікації метилових ефірів жирних кислот.

Хроматографічний аналіз виконано на газовому хроматографі HP 6890 ("Hewlett Packard", USA) з автоматичним інжектором з діленням потоку (*split*), оснащеному термостатом колонки з програмуванням температури, полум'яно-іонізаційним детектором і комп'ютерною системою зі спеціальним програмним

забезпеченням для автоматичного інтегрування та ідентифікації піків ChemStation Ver.A.06.03. Застосовано капілярну колонку SP-2560 з високополярною нерухомою фазою – біс-цианопропілполісилоксаном (незв'язаним): довжина 100 м, діаметр 0,25 мм, товщина плівки 0,2 мкм, із максимальною робочою температурою 250°C. Завдяки використанню високоефективної капілярної колонки було розділено значну кількість жирних кислот та їхніх ізомерів. Як газ-носіє використано гелій; потік газу-носія – 1,2 мл/хв. Об'єм введеної проби – 1,0 мкл. Концентрація проби – 20,0 мг/мл. Загальний час аналізу – 86,01 хв.

Жирні кислоти ідентифікували за часом утримання відповідно до часу утримання стандартної (еталонної) суміші (метод порівняння). Кількісний склад суміші визначили методом внутрішньої нормалізації, коли сума площ всіх піків приймається за 100 % і концентрація будь-якого компонента проби розраховується як відносна площа піка

$$C_i (\%) = (S_i K_i / \sum S_i K_i) 100,$$

де, S_i – площа відповідного піка;

K_i (або R_f) – калібрувальний коефіцієнт;

$\sum S_i K_i$ – сума добутків площ піків на відносні поправочні коефіцієнти для усіх піків хроматограми.

Оптимальні умови розділення жирних кислот, у тому числі й їхніх ізомерів, було підтверджено за допомогою калібрування колонки стандартною сумішшю метилових ефірів жирних кислот, визначенням абсолютного і відносного R_f та відгуку (чутливості) ПІД для кожного компонента стандартної суміші, що виражається значенням FID-factor за формулою

$$FID = M / (n_x - 1) (AW_c) (FID_{16:0}),$$

де, M – молекулярна маса метилових ефірів жирних кислот;

$(n_x - 1)$ – число атомів С у жирній кислоті;

AW_c – молекулярна маса карбону (12,01);

$FID_{16:0}$ – коефіцієнт кореляції для пальмітинової кислоти (16:0), що дорівнює 1,407.

Абсолютний R_f визначається за формулою:

$$R_f = S_1MR_2 / S_2MR_1,$$

де, S_1 і S_2 – площі піків двох розділених компонентів;

MR_1 і MR_2 – їхні відносні масові частки.

Відносний R_f визначається відносно піку.

Результати досліджень та їхнє обговорення. Попит на рослинні олії для харчового і нехарчового використання постійно зростає, тоді як доступність продуктивних орних земель поступово зменшується. Щоб задовільнити вимоги промисловості, не впливаючи на можливість вирощування продовольчих рослин для виробництва продуктів харчування, селекціонерам необхідно розробити нові та вдосконалені сорти олійних культур. Жирно-кислотний склад відіграє ключову роль у визначенні властивостей і можливого використання рослинних олій (Marillia et al., 2013). Гірчиця ефіопська (*Brassica carinata*) є перспективною новою промисловою олійною культурою, особливо для напівпустельних регіонів (Marillia et al., 2013). Відомо, що олії гірчиці ефіопської були генетично модифіковані для поліпшення складу жирних кислот, зокрема збільшення вмісту довголанцюгових жирних кислот (наприклад, ерукової кислоти). Ці вдосконалені олії можуть забезпечити сировину для виробництва біореактивного та біодизельного палива (Thakur et al., 2029; Redda et al., 2024).

У даній роботі було проведено біохімічні дослідження жирно-кислотного складу олії, отриманої з *Brassica carinata*. Для дослідження було обрано 8 форм із природної флори і 8 нових селекційно-генетичних форм. Проведено оцінку наступних форм із природної флори : 1 – BC NPF-1; 2 – BC NPF-2; 3 – BC NPF-3; 4 – BC NPF-4; 5 – BC NPF-5; 6 – BC NPF-6; 7 – BC NPF-7; 8

– BC NPF-8. А також нових селекційно-генетичних форм: 9 – BC SCF-1; 10 – BC SCF-2; 11 – BC SCF-3; 12 – BC SCF-4; 13 – BC SCF-5; 14 – BC SCF-7; 15 – BC SCF-8; 16 – BC SCF-9.

Жирні кислоти ідентифікували за часом утримання у порівнянні зі стандартним розчином. У результаті хроматографічного аналізу було встановлено, що основними жирними кислотами ефіопської гірчиці є ерукова (C22:1), ліолева (C 18:2), ліноленова (C 18:3), олеїнова (C18:1), гондоїнова (C20:1), пальмітинова (C16:0) та нервонова (C24:1) кислоти. Відповідно, для порівняння восьми форм природньої флори і восьми селекційно-генетичних форм, брали до уваги деякі жирні кислоти, перелічені вище.

В результаті хроматографічного аналізу було виявлено, що концентрація ерукової кислоти була найвищою поміж інших жирних кислот. У природних формах концентрація варіювала у межах 36-43 %. Найнижча концентрація ерукової кислоти (36,88 %) виявилася в формі BC NPF-5, а найвища (43,64 %) була отримана у зразку BC NPF-7. У той самий час серед нових селекційно-генетичних форм найвищою концентрацією ерукової кислоти (45,87 %) відзначилась форма BC SCF-4, а найнижче значення (40,59 %) було зареєстроване у зразку BC SCF-1. Ерукова кислота (C22:1, ω -9, EA) є довголанцюговою мононенасиченою жирною кислотою, яка є важливим олеохімічним продуктом з широким спектром застосувань у металургії, машинобудуванні, гумовій промисловості, хімічній промисловості та в інших галузях через свою гідрофобність і водостійкість (Wang et al., 2022). Крім того, неїстівний характер олії з еруковою кислотою робить її важливою біопромисловою культурою, яку можна використовувати для виробництва біореактивних палив, де 22-вуглецевий ланцюг олії може бути розщеплений на два біопаливних вуглеводні, тим самим подвоюючи вихід палива для кожної молекули ерукової кислоти (Hagos et al., 2020).

Другою за відсотковим співвідношенням потрібно відмітити лінолеву кислоту, концентрації якої варіювали у межах 15-18 %. Хроматографічний аналіз показав, що серед форм із природної флори найнижча концентрація лінолевої (16,19 %) кислоти була отримана з форми BC NPF-7, а найвища (18,25 %) була зареєстрована у зразку BC NPF-5. Суттєво не вирізнялись нові селекційно-генетичні форми ефіопської гірчиці за концентрацією лінолевої кислоти. Найменша концентрація (15,67 %) була відмічена у форми BC SCF-2, а найвища (18,84 %) – у генотипа BC SCF-3.

Ще однією поліненасиченою жирною кислотою є ліноленова кислота, вміст якої в досліджуваних природних формах ефіопської гірчиці склав у середньому 12 %, де в нових селекційно-генетичних формах варіював у межах 11-13 %. Необхідно зазначити, що олії, багаті на поліненасичені жирні кислоти, такі як ліолева та ліоленова кислоти, мають важливі промислові застосування як сикативні олії у виробництві фарб та покриттів, а також у розробці фармацевтичних і нутрицевтичних препаратів (Nabloussi et al., 2008). Також олії, багаті на ліолеву кислоту, використовуються як сировина для виробництва кон'югованої ліолевої кислоти, нового терапевтичного нутрієнта з багатообіцяючими антиоксидантними і протипухлинними властивостями. Ця жирна кислота також має важливе застосування як компонент косметичних продуктів для догляду за шкірою (Nabloussi et al., 2008).

Наші дослідження жирно-кислотного складу гірчиці ефіопської демонструють значний вміст ще однієї важливої кислоти – олеїнової. Її концентрація у формах з природної флори знаходилась у діапазоні 7-9 %, де найвищий рівень олеїнової кислоти (9,30 %) був зареєстрований у зразку BC NPF-2, а найнижчий вміст (7,90 %) – мала форма BC NPF-6. Для порівняння, нові селекційно-генетичні форми мають майже ідентичний вміст олеїнової кислоти з найнижчими значеннями 7,77 % та 7,74 %, відміченими у формах BC SCF-3 і BC SCF-4 відповідно. Зразки 10-SCF, 13-SCF, 14-SCF 15-SCF та

16-SCF характеризувались концентраціями олеїнової кислоти у межах 9,11 %-9,57 %. Олеїнова кислота – це мононенасичена жирна кислота омега-9, що міститься у більшості рослинних і тваринних джерел, становить понад 90 % мононенасичених жирів цис-ізомеру в раціоні людини (Velasco et al., 2003). Вона знижує рівень холестерину і тригліцеридів та покращує в'язкість кров'яних клітин (Nabloussi et al., 2008). Олеїнова кислота є стабільнішою до тепла та окиснення, ніж лінолева кислота, і складає 46,00-66,03 % ріпакової олії (Shen et al., 2023). Олеїнова кислота вважається фітоз'єднанням, яке може покращувати стан серцево-судинної системи. Оскільки лінолева кислота має ще один олефіновий зв'язок, порівняно з олеїновою кислотою, антиоксидантний ефект лінолевої кислоти кращий, ніж у олеїнової кислоти. Лінолева кислота є харчовим компонентом, оскільки вона є незамінною жирною кислотою, важливою для підтримки організму людини. Лінолева кислота корисна для підтримки стану шкіри людини, імунної системи, клітинних мембран і синтезу ейкозаноїдів (Shen et al., 2023). З огляду на отримані результати можна зазначити, що гірчиця ефіопська має відносно низький вміст олеїнової кислоти, особливо в порівнянні з неїстівною еруковою кислотою. Для можливого використання фітосировини у харчовій промисловості необхідна подальша селекція та гібридизація для збільшення вмісту їстівних жирних кислот.

Сьогодні багато фермерів і дослідників активно шукають і віддають перевагу більш витривалим олійним культурам роду *Brassica* (Hagos et al., 2020), таким як гірчиця ефіопська, яка може витримувати дуже вразливі екологічні умови, навіть у районах, де не ростуть інші культури (тобто на маргінальних землях). Тому це одна з найцікавіших культур родини *Brassicaceae*, яка може використовуватися нині для енергетичних цілей у середземноморських регіонах (Hagos et al., 2020), а також може бути придатною для маргінальних земель і забруднених районів, оскільки є

рослиною з сильно вираженими фіторемедіаційними властивостями (Hagos et al., 2020). Також виявлено, що культура має кращу агроекологічну адаптивність і продуктивність – у порівнянні з ріпаком (*Brassica napus*) та гірчицею індійською (*Brassica juncea*) – за несприятливих екологічних умов, і навіть за несучасних систем землеробства (Hagos et al., 2020). Це бажано, оскільки виробники можуть культивувати цю рослину без особливих труднощів з витратами на виробництво, а також можуть опосередковано розвивати екологічно стійкий бізнес (Mohdaly et al., 2008).

Гірчиця ефіопська є нині новою перспективною енергетичною культурою для більшості середземноморських, аридних та напіваридних кліматичних країн (Marillia et al., 2013; Hagos et al., 2020), також – для України (Рахметов та ін., 2024). Фактично, наявність високих рівнів урожайності вимагає менше ресурсів, а здатність адаптуватися та протистояти абіотичним і біотичним стресам робить її цінною з точки зору агрономічного та енергетичного балансу. Наприклад, її адаптація значно розширилася і збільшила її виробництво в деяких посушливих районах США (Каліфорнія), Канади, Італії, Іспанії та країн Південної Азії і України – через зростаючий попит на біоенергію та олійні культури в цих країнах (Hagos et al., 2020; Cardone et al., 2003; Рахметов та ін., 2024) і вплив глобальної зміни клімату на стає сільськогосподарське виробництво та екологічні системи.

5. 6. Мінеральний склад рослин *Brassica carinata*

Результати проведених досліджень свідчать про те, що загальний вміст золи у рослинних зразках генотипів *B. carinata* у період стеблуння-початок бутонізації становив 10,49–13,05 %, кальцію – 1,82–2,49 %, фосфору – 1,31–1,93 % (рис. 5. 44).

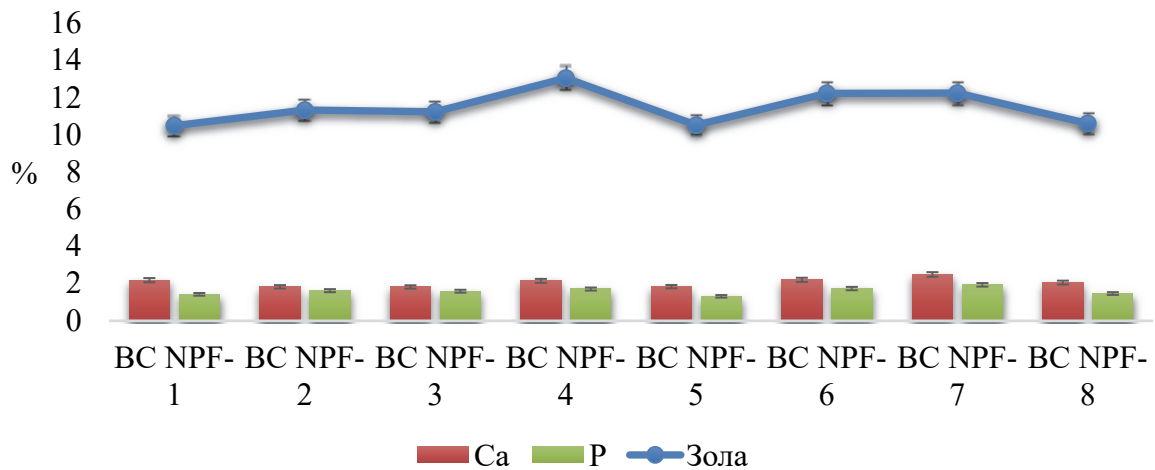


Рис. 5. 44. Загальний вміст золи, фосфору та кальцію у надземній масі генотипів *Brassica carinata* в період стеблуння-початок бутонізації

Загальний вміст золи у рослинних зразках генотипів *B. carinata* у період стеблуння-початок бутонізації становив 5,53–7,87 %, кальцію – 1,71–2,63 %, фосфору – 1,12–1,82 % (рис. 5. 45). В цілому середнє значення вмісту золи у період стеблуння-початок бутонізації становило 11,46 %, а в період плодоношення – 6,54 % (сумарно по всіх генотипах), що у 1,75 рази менше, ніж під час стеблуння-початок бутонізації рослин. Вміст кальцію у період стеблуння-початок бутонізації та плодоношення у досліджуваних рослин суттєво не відрізнявся і в середньому для усіх генотипів становив 2,07 % та 2,20 % відповідно.

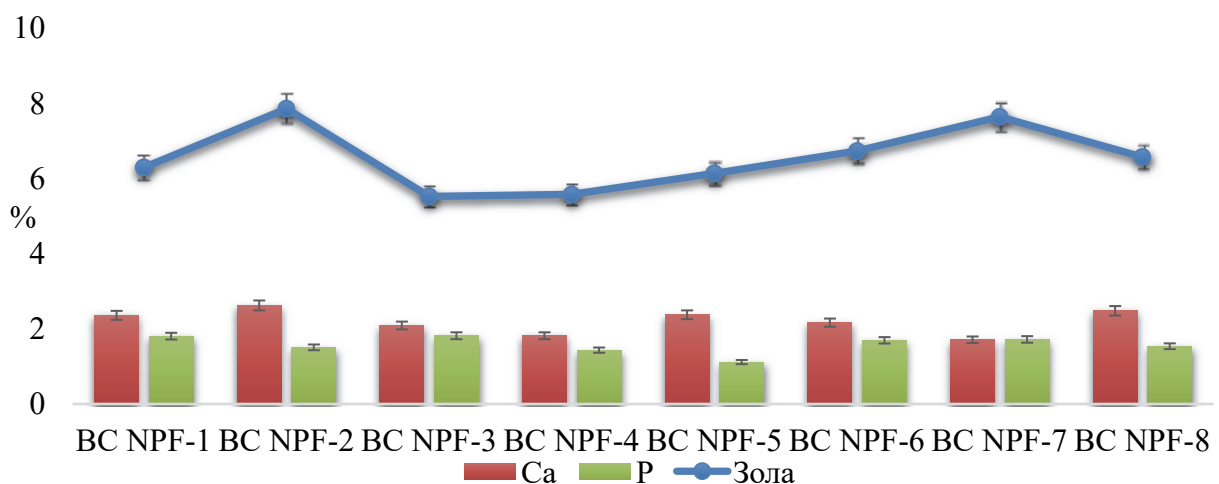


Рис. 5. 45. Загальний вміст золи, фосфору та кальцію у надземній масі генотипів *Brassica carinata* у період плодоношення

Відомо, що в рослинній сировині (надземній та підземній фітомасі) виявлено близько 78 елементів із 108 відомих у природі. Для нормального росту і розвитку рослини умовно виділяють дві групи елементів: необхідні (C, O, H, N, P, K, Ca, Mg, Fe, S, Cu, B, Mo, Zn) та умовно необхідні (Li, Ag, Sr, Cd, Al, Si, Ti, Pb, Cr, Se, F, Ni). Тому визначення вмісту макро- і мікроелементів у рослинній сировині має важливе фундаментальне та прикладне наукове значення з точки зору вивчення фізіолого-біохімічних механізмів стійкості рослин до дії екологічних факторів довкілля, а також визначити напрями безпечного та економічно-ефективного використання фітосировини.

З огляду на вище наведені дані проведено порівняльну оцінку різних генотипів рослин *B. carinata* на вміст макро-, мезо- і мікроелементів (рис. 5. 46). Враховуючи те, що бор та фосфор важливі елементи, які забезпечують оптимальний ріст рослин, накопичення цукрів, вуглеводний і білковий обмін та метаболізм, синтез білків, проростання пилку і запліднення квіток, підвищують врожайність та його якість, було з'ясовано, що серед досліджуваних генотипів найвищим вмістом цих елементів характеризувався зразок BC NPF-1 (67,7 мг/кг – бор та 62,3 мг/кг – фосфор).

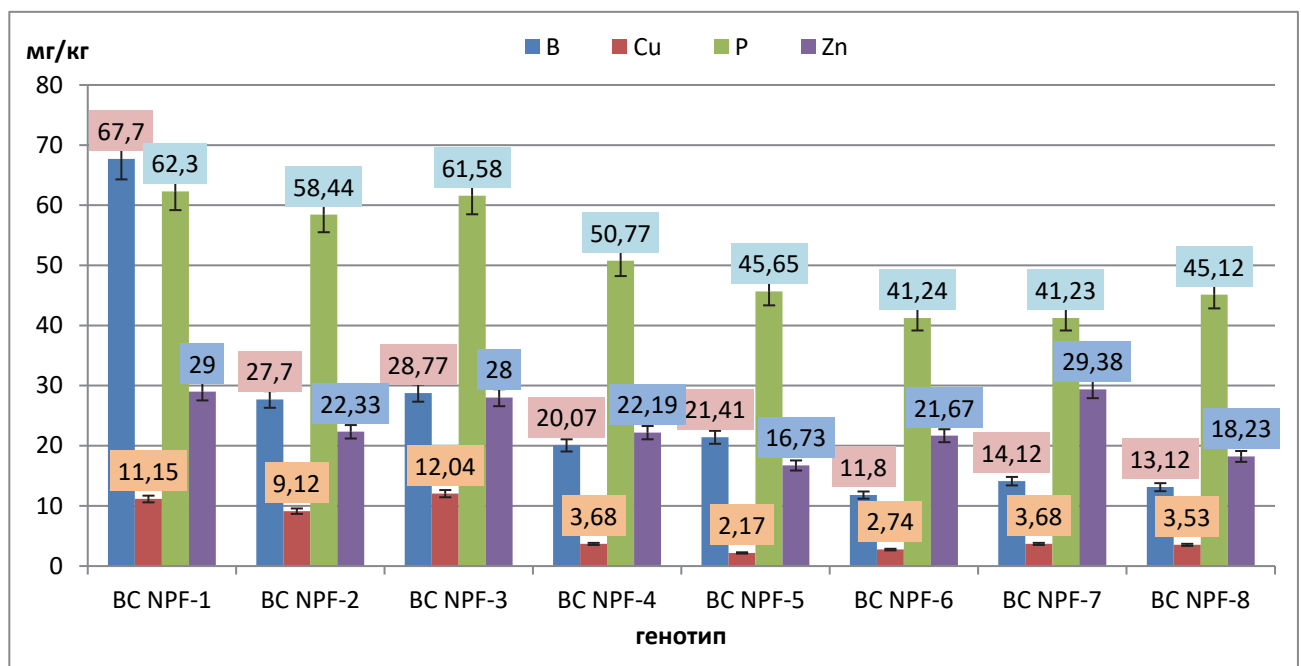


Рис. 5.46. Вміст росторегулюючих елементів у різних генотипів рослин *B. carinata*

У решти генотипів спостерігається значно нижчий вміст бору (у 2,3–5,7 рази), хоча за тих самих умов вміст фосфору в окремих генотипів знижувався лише у 1,5 рази, а також у інших генотипів перевищував в окремих випадках близько 3,5 рази.

У порівнянні з результатами досліджень Zeiner et al. (2022) в умовах України генотип BC NPF-1 накопичував бору менше в 1,2 рази, а різниця між найменшим показником (зразок BC NPF-6) сягала у 6,7 рази.

Мідь і цинк є важливими компонентами для фотосинтезу та дихання, фіксації азоту й синтезу білків, стійкості до хвороб, відповідають за зв'язування сонячної енергії, синтезують ауксин, запобігаючи руйнуванню клітин та сприяють активації ростових процесів. За вмістом міді можна виділити дві групи генотипів: гіперакумулянти – BC NPF-1, BC NPF-2 та BC NPF-3; гіпоаккумулянти – BC NPF-4, BC NPF-5, BC NPF-6, BC NPF-7 і BC NPF-8. Щодо накопичення цинку також виділено дві групи генотипів: гіперакумулянти – BC NPF-1, BC NPF-3, BC NPF-7; гіпоаккумулянти – BC NPF-2, BC NPF-4, BC NPF-5, BC NPF-6, BC NPF-8. У дослідженні Zeiner et al. (2022) рослини *B. carinata* накопичують мідь на рівні 5,97 мг/кг, а також цинк – 27,2 мг/кг, що цілком корелює з отриманими даними у зразках, інтродукованих у НБС.

Цінними елементами, які відіграють важливу роль у процесі дихання, фотосинтезі, синтезі білків, транспортуванню води та вуглеводів рослин є залізо і натрій. Аналіз вмісту цих елементів дозволив виявити, що усі генотипи накопичували їх по-різному, серед яких і надалі найвищим вмістом вирізнявся генотип BC NPF-1, дещо менші показники демонстрували BC NPF-2 та BC NPF-3 (рис. 5. 47). За рівнем вмісту заліза здійснено розподіл генотипів на наступні групи: високого рівня (понад 200 мг/кг) – BC NPF-1; середнього рівня (від 100 до 200 мг/кг) – BC NPF-2, BC NPF-3 та BC NPF-5; низького (до 100 мг/кг) – BC NPF-4, BC NPF-6, BC NPF-7, BC NPF-8. За рівнем вмісту натрію досліджувані генотипи було розподілено наступним чином: високого рівня

(понад 500 мг/кг) – BC NPF-1, BC NPF-4, BC NPF-7; середнього рівня (від 250 до 500 мг/кг) – BC NPF-3 та BC NPF-5; низького рівня (до 250 мг/кг) – BC NPF-2, BC NPF-5, BC NPF-8. Щодо кількісного накопичення натрію і заліза у рослин *B. carinata* у дослідженні Zeiner et al. (2022) відзначається про рівень Fe – 101 мг/кг та Na – 1656 мг/кг фітосировини.

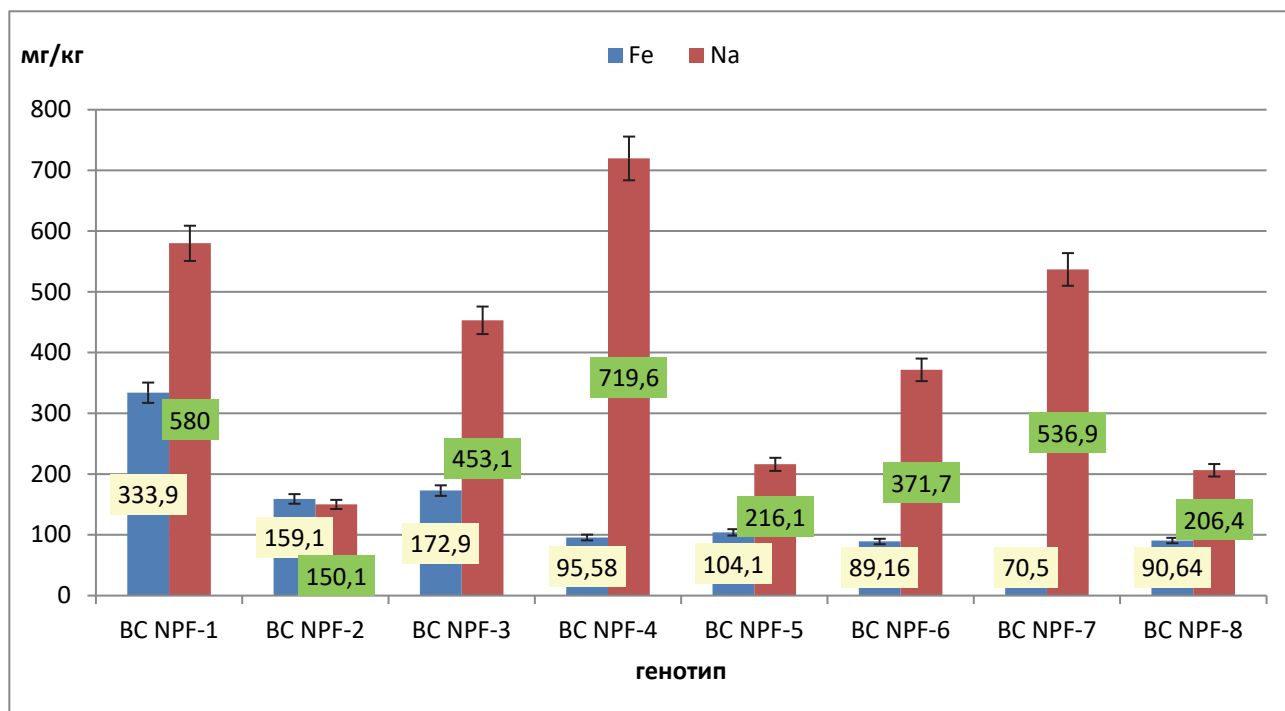


Рис. 5. 47. Вміст заліза і натрію у різних генотипів рослин *B. carinata*

Відомо, що накопичення у рослин таких елементів як сірка, магній, калій та кальцій має важливе значення для належної роботи фотосинтетичного апарату, забезпечення продуктивності як вегетативної маси, так і насіння. Аналіз елементного складу також показує те, що генотип BC NPF-1 характеризується найбагатшим вмістом з-поміж досліджуваних інтродуцентів (рис. 5. 48).

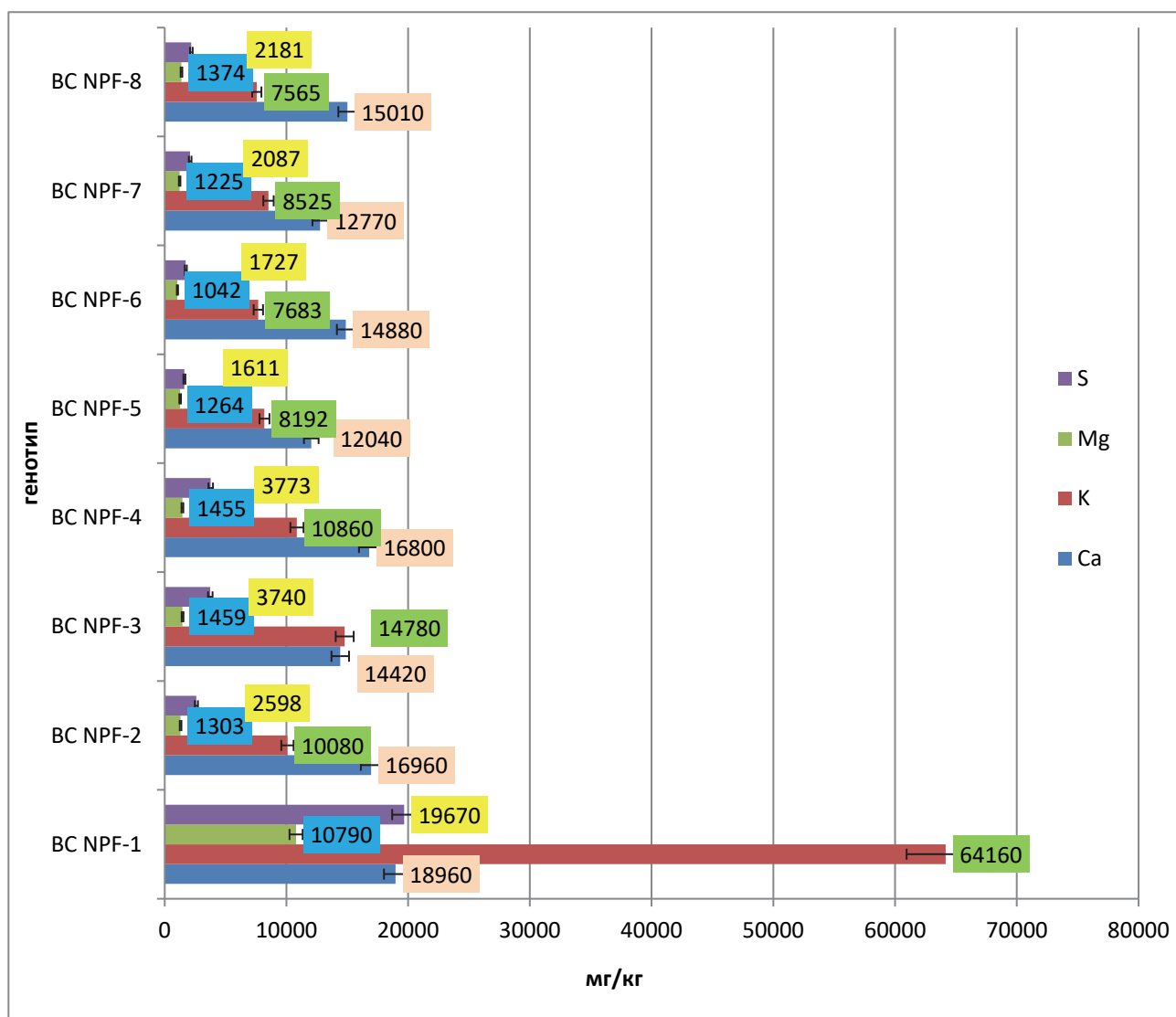


Рис. 5. 48. Вміст елементів-регуляторів продуктивності різних генотипів рослин *B. carinata*

Також здійснено розподіл генотипів на групи по кожному елементу окремо. За вмістом калію зразки розподілено наступним чином: високого (понад 20 тис. мг/кг) – BC NPF-1; середнього (від 10 до 20 тис. мг/кг) – BC NPF-2 BC NPF-3 BC NPF-4; низького (до 10 тис. мг/кг) – BC NPF-5, BC NPF-6, BC NPF-7, BC NPF-8. За вмістом кальцію виокремлено дві групи: високовмісні (від 15 до 20 тис. мг/кг) – BC NPF-1, BC NPF-2, BC NPF-4, BC NPF-8; середнього вмісту (від 10 до 15 тис. мг/кг) – BC NPF-3, BC NPF-5, BC NPF-6, BC NPF-7. За вмістом магнію: високовмісні (понад 10 тис. мг/кг) – BC NPF-1; середнього вмісту (від 5 до 10 тис. мг/кг) – не зафіксовано; низького вмісту (до 5 тис. мг/кг) – BC NPF-2 – BC NPF-8. За вмістом сірки логічно виділити 4 групи: дуже високого (понад

15 тис. мг/кг) – ВС NPF-1; дуже низького (до 5 тис. мг/кг) – ВС NPF-2 – ВС NPF-8. Щодо групи високого (від 10 до 15 тис. мг/кг) та середнього (від 5 до 10 тис. мг/кг) вмісту сірки генотипів не відмічено. Відомо, що рослини *B. carinata* акумулюють Mg – понад 11 тис. мг/кг, K – в межах 41,5 тис. мг/кг, а Ca – близько 8100 мг/кг (Zeiner et al., 2022). Щодо рівня накопичення сірки S даних немає.

Разом із необхідними елементами було простежено здатність рослин до накопичення умовно необхідних елементів (рис. 5. 49-5. 51). Варто зазначити, що в цілому за сукупністю таких елементів як Ba, Cd, Co, Cr, Ni, Pb, Ti, V найвищим вмістом вирізнявся й надалі генотип ВС NPF-1, а дещо меншими ВС NPF-2 та ВС NPF-3 (див. рис. 5. 48). За вмістом барію виділено наступні групи інтродуцентів: високовмісні (понад 7 мг/кг) – ВС NPF-2 та ВС NPF-6; середнім вмістом (від 5 до 7 мг/кг) – ВС NPF-1, ВС NPF-3, ВС NPF-4, ВС NPF-7, ВС NPF-8; низьким вмістом (до 5 мг/кг) – ВС NPF-5. За вмістом решти елементів (Cd, Co, Cr, Ni, Pb, Ti), узагальнюючи отримані дані, можна розподілити генотипи на дві групи: гіперакумулянти – ВС NPF-1, ВС NPF-2, ВС NPF-3 (де генотип ВС NPF-1 переважає за показниками усіх елементів) та гіпоаккумулянти – решта досліджуваних генотипів. Отримані дані цілком співставні з відомими результатами досліджень інших представників родини Brassicaceae (Golubkina et al., 2023; Cockson et al., 2021).

Накопичення кремнію та алюмінію у рослинній сировині сприяє підвищенню стійкості рослин до дії різноманітних біотичних і абіотичних чинників довкілля (Pandey et al., 2016; Meena et al., 2016).

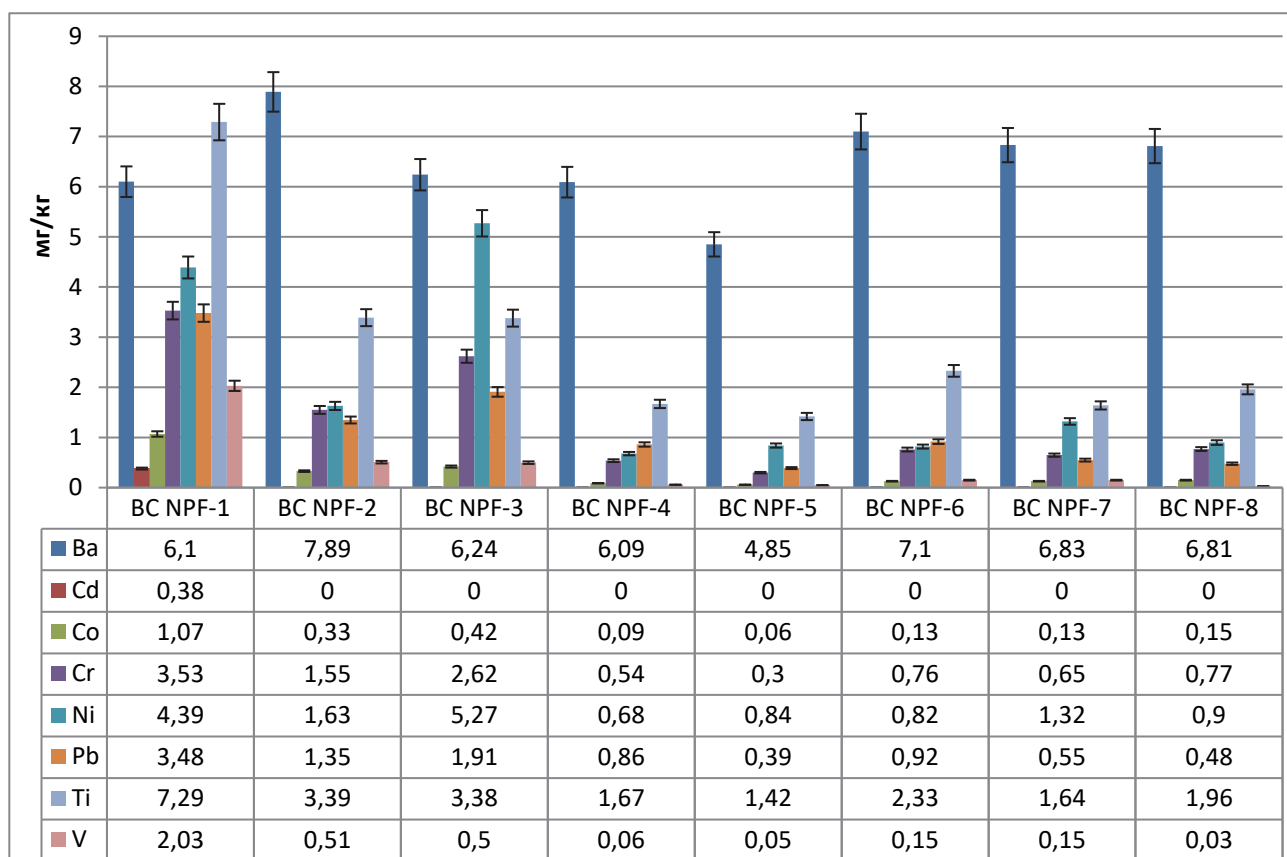


Рис. 5.49. Мікроелементний склад різних генотипів рослин *B. carinata*

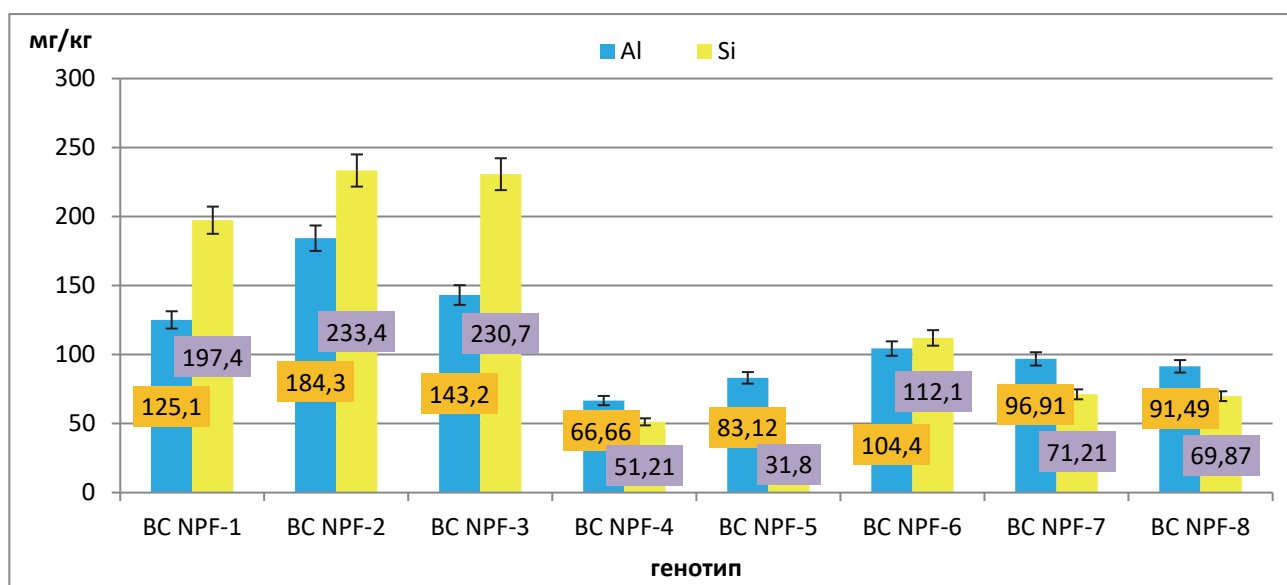


Рис. 5.50. Вміст мікроелементів формуючих стресостійкість рослин *B. carinata*

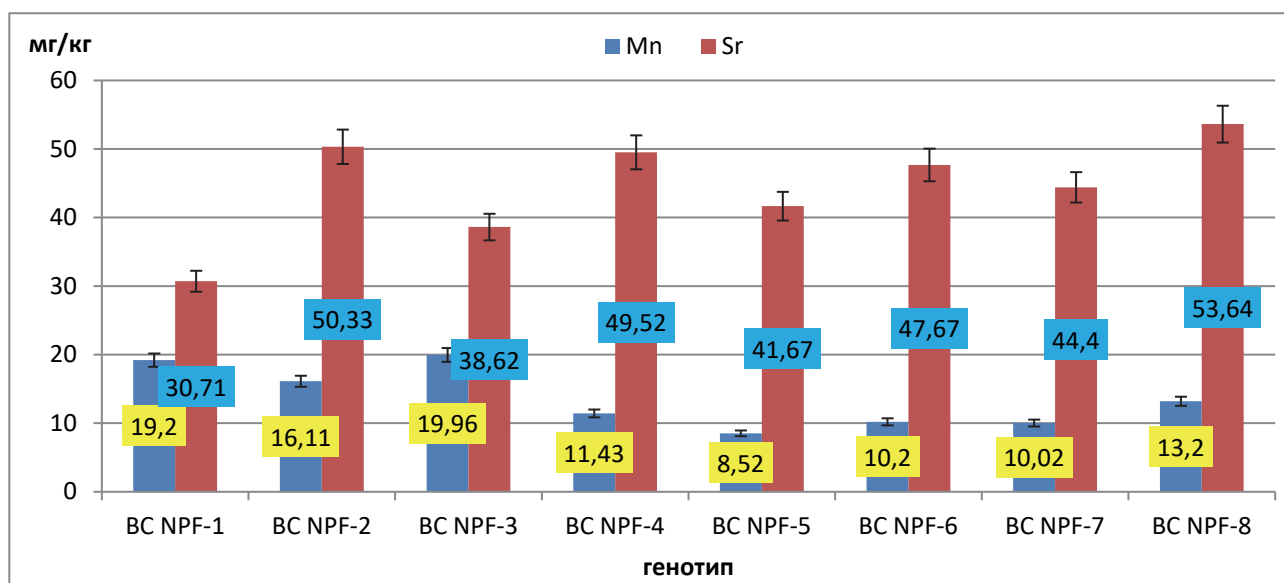


Рис. 5.51. Вміст мангану і стронцію у рослин *B. carinata*.

Аналіз вмісту цих елементів у фітосировині *B. carinata* дозволив виявити ряд закономірностей, зокрема те, що генотипи рослин BC NPF-1, BC NPF-2, BC NPF-3, як і у вищенаведених випадках, вирізняються вищими показниками за кількісним складом мікроелементів порівняно з іншими генотипами. Тому доцільно згрупувати дані генотипи за потенціалом стійкості до стресових чинників: стійкі – BC NPF-4, BC NPF-5, BC NPF-6 BC NPF-7, BC NPF-8; дуже стійкі – BC NPF-1, BC NPF-2, BC NPF-3. Вміст цих речовин в умовах інтродукції в НБС значно вищий у порівнянні із результатами, отриманими в умовах Швеції (Zeiner et al., 2022).

Відомо, що манган – учасник належної фотосинтетичної активності рослин, що в свою чергу впливає на їхню стійкість до різноманітних чинників довкілля та продуктивність. Встановлено, що генотипи BC NPF-1, BC NPF-2, BC NPF-3 характеризуються найвищим вмістом мангану – це підтверджує припущення щодо виокремлення цих генотипів як більш стресостійких і вищим продуктивним потенціалом. Щодо накопичення стронцію, то у доступній літературі немає обґрунтування його участі в оптимізації фізіолого-біохімічних процесів рослин, але відомо, що це є продукт розпаду

радіоактивних елементів, тому важливо вивчати здатність рослин до накопичення цього елементу у фітомасі. Надалі це дозволить здійснювати підбір культур для використання у фіторе mediaції задля очищення забруднених територій. Цікаво, що в дослідженні Zeiner et al. (2022) в умовах Швеції рослини *B. carinata* накопичували стронцію на рівні 42,5 мг/кг, що цілком співставно з отриманими даними у наших умовах. Щодо вмісту мангану, то в умовах інтродукції у НБС цей показник менший – від 4,1 до 6,8 рази.

РОЗДІЛ 6.

РОЛЬ СУЧАСНИХ БІОЛОГО-ЕКОЛОГІЧНИХ ТА АЛЕЛОПАТИЧНИХ МЕТОДІВ У ПОЛІПШЕННІ РОСТОВИХ ПРОЦЕСІВ, ПІДВИЩЕННІ ПРОДУКТИВНОСТІ ОЛІЙНИХ РОСЛИН (РИЖІЮ, ГІРЧИЦІ ТА РІПАКУ)

6. 1. Вплив кремнієвмісних добрив на ріст, розвиток і продуктивність олійних рослин

Внаслідок проведених досліджень встановлено, що внесення кремнієвмісних добрив під сівбу ріжю, гірчиці та ріпаку в цілому позитивно впливає на ростові показники і продуктивність рослин).

За одночасної сівби насіння ріжю, гірчиці та ріпаку (II декада травня) розвиток рослин відбувався по-різному. Рижій як скоростигла рослина розвивався швидше і до проведення першого комплексного аналізу був у фазі початку бутонізації, а ріпак та гірчиця – у вегетативній фазі. В цей період вплив кремнієвмісних добрив порівняно з контролем уже був очевидним (рис. 6. 1).

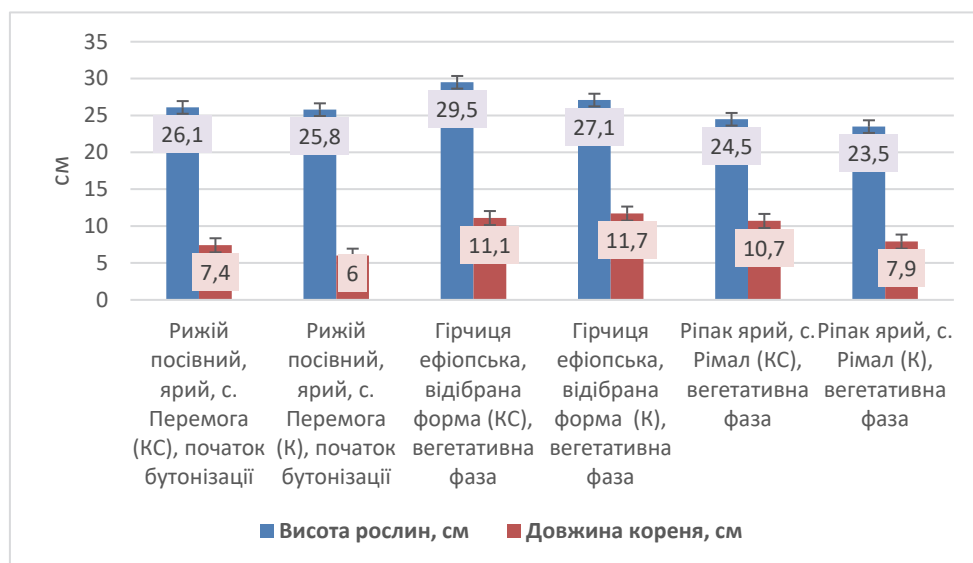


Рис. 6. 1. Висота рослин і довжина кореня ріжю, гірчиці та ріпаку у період вегетації залежно від варіанту дослідження (КС – внесення кремнієвмісних добрив, К – контроль)

Висота рослин і довжина кореня ріжю, гірчиці та ріпаку в досліджений період за застосування кремнієвмісних сполук (КС) була вищою ніж у контролі (К). Позитивну роль кремнієвмісних добрив на зростання морфометричних параметрів рослин та урожайності відзначено у дослідженнях R. Crooks, P. Prentice (2011), M. Selivanova та ін. (2020), R. Tayade та інших (2022).

Аналогічна закономірність встановлена за результатами досліджень кількості і розміру листків, діаметру стебла в основі, за масою надземної частини і коренів рослин ріжю, гірчиці та ріпаку. Найвищі показники рослини мали у варіантах із внесенням кремнієвмісних добрив (рис. 6. 2-6. 5).

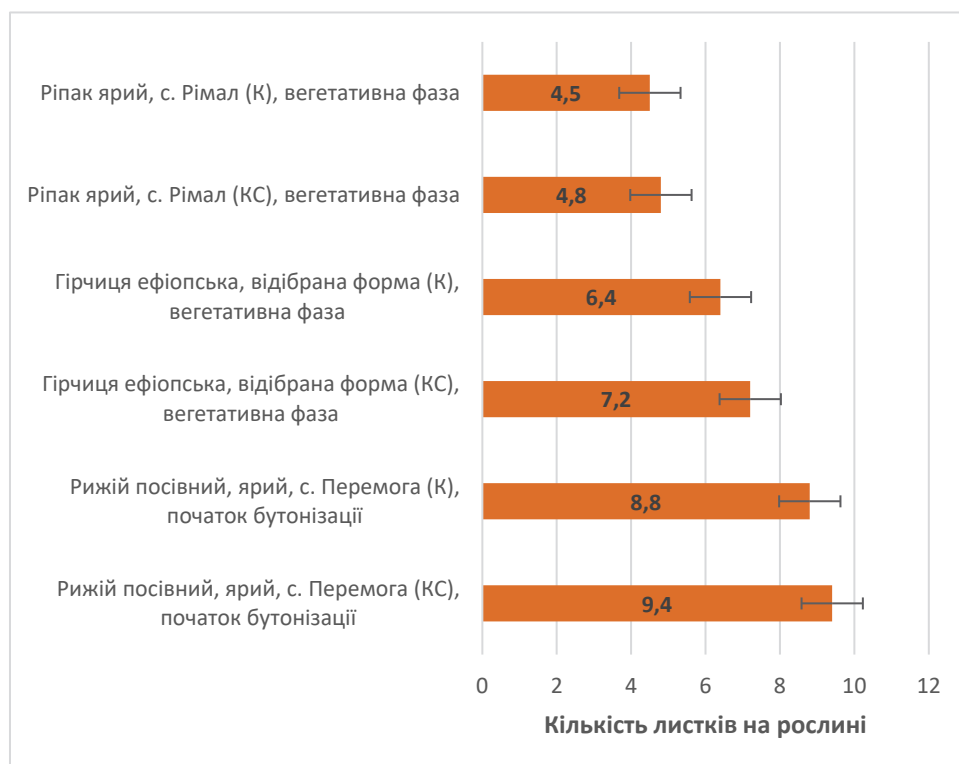


Рис. 6. 2. Кількість листків на рослині ріжю, гірчиці та ріпаку в період вегетації залежно від варіанту дослідження (КС – внесення кремнієвмісних добрив, К – контроль)

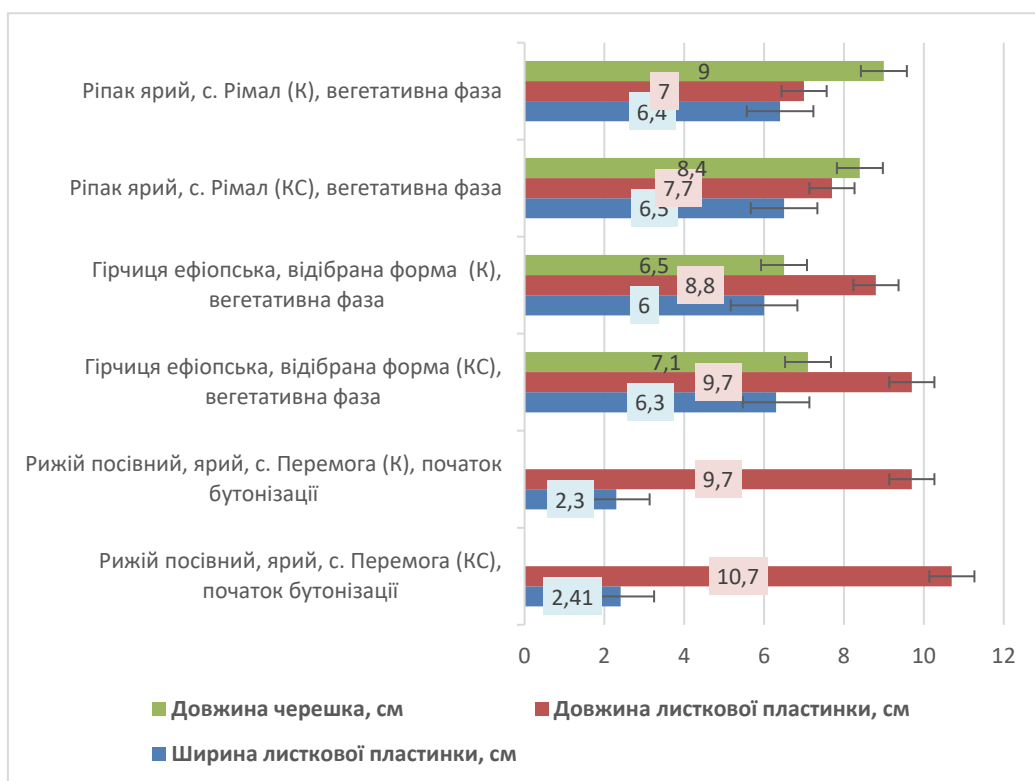


Рис. 6. 3. Розміри листків на рослині рижію, гірчиці та ріпаку у період вегетації залежно від варіанту досліду (КС – внесення кремнієвмісних добрив, К – контроль)

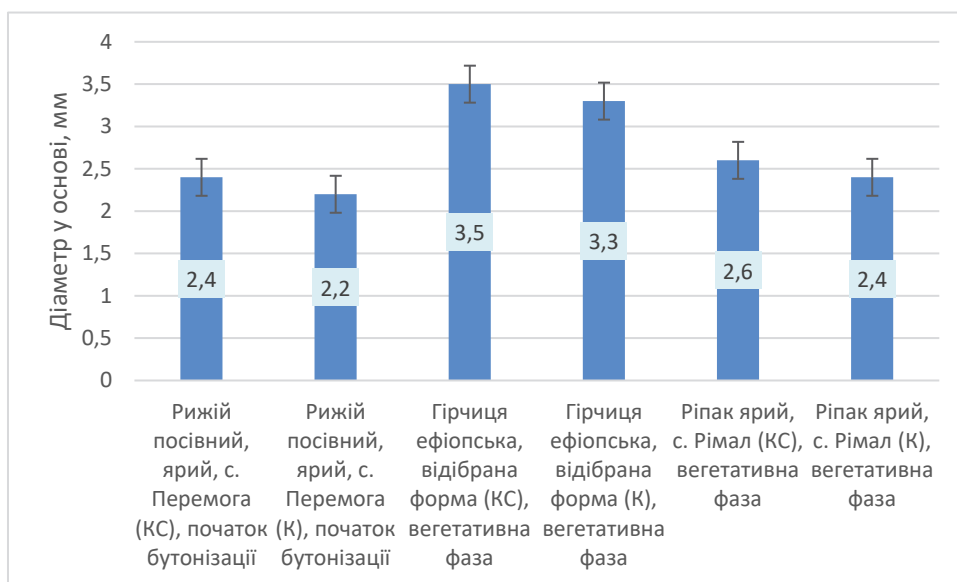


Рис. 6. 4. Діаметр стебла в основі рослин рижію, гірчиці та ріпаку в період вегетації залежно від варіанту досліду (КС – внесення кремнієвмісних добрив, К – контроль)

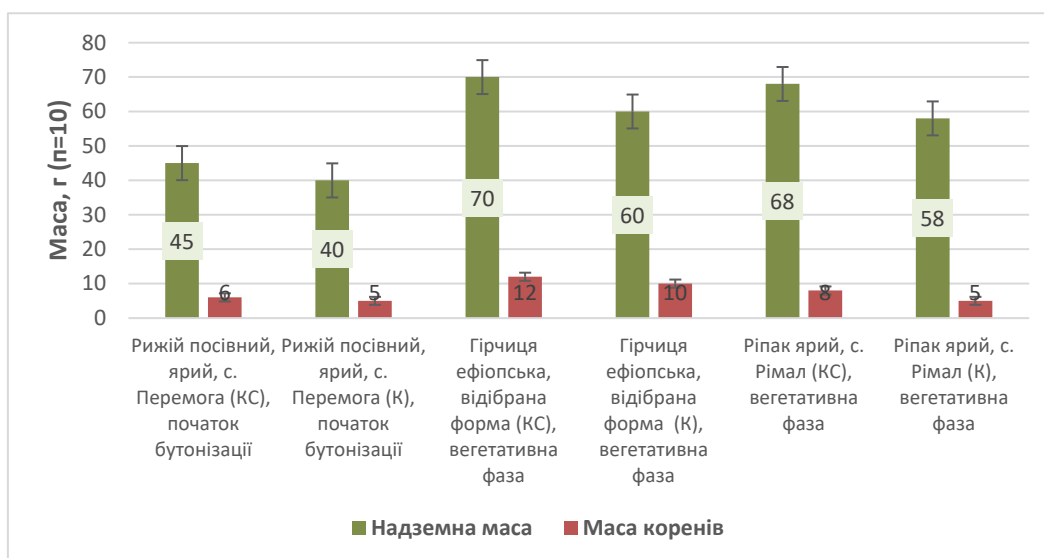


Рис. 6. 5. Надземна маса та маса коренів рослин рижю, гірчиці та ріпаку в період вегетації залежно від варіанту дослідження (n=10) (КС – внесення кремнієвмісних добрив, К – контроль)

До наступного періоду комплексного аналізу рослини залежно від видових особливостей та застосування добрив знаходилися у різних фазах розвитку: рижій – кінець квітання-плодоношення; ріпак – квітання; гірчиця – у фазі бутонізації (рис. 6. 6). У цей період різниця між варіантами з внесенням добрив та контролем за висотою рослин була суттєвою у всіх культур: рижю – 2,5 см, гірчиці – 9,5, ріпаку – 5,8 см. Значуща різниця встановлена між варіантами за довжиною коріння.

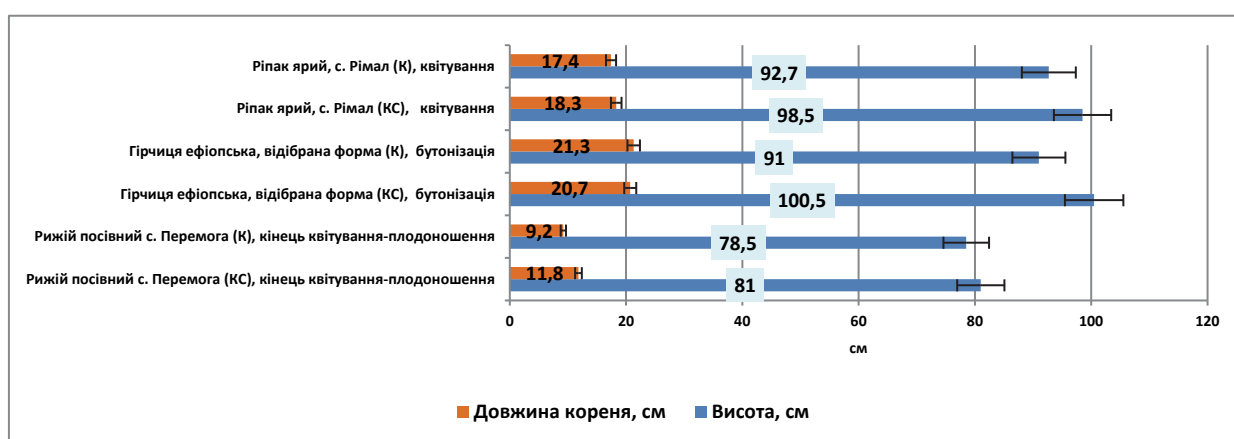


Рис. 6. 6. Висота рослин і довжина кореня рижю, гірчиці та ріпаку, залежно від фази розвитку і варіанту дослідження (КС – внесення кремнієвмісних добрив, К – контроль)

Аналогічно попередньому періоду встановлена суттєва різниця у різних культур між удобреними та неудобреними варіантами за кількістю і розмірами листків, бічних пагонів I порядку, діаметром стебла в основі, за масою стебел, листків і коренів рослин рижю, гірчиці та ріпаку (рис. 6. 7-6. 10).

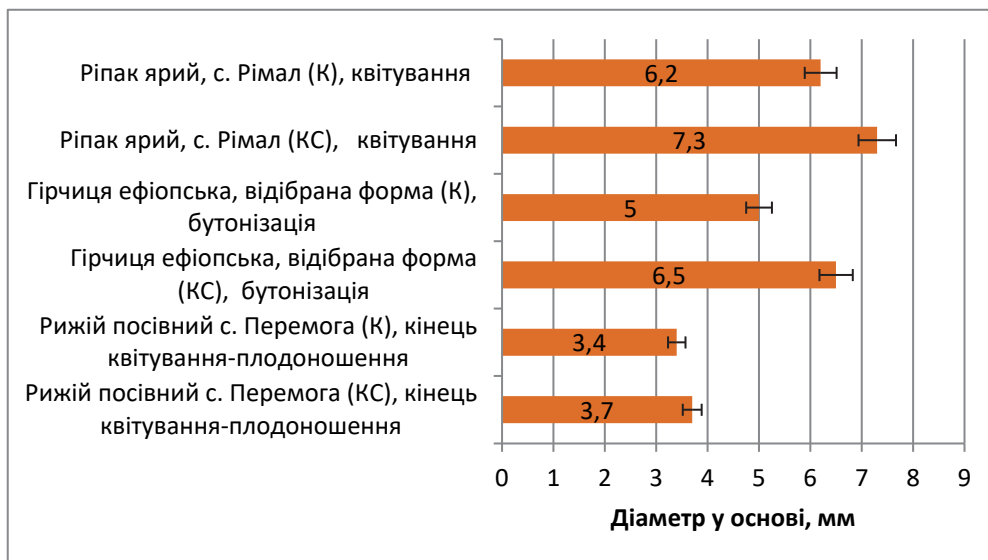


Рис. 6. 7. Діаметр в основі рослин рижю, гірчиці та ріпаку залежно від фази розвитку і варіанту дослідження (КС – внесення кремнієвмісних добрив, К – контроль)

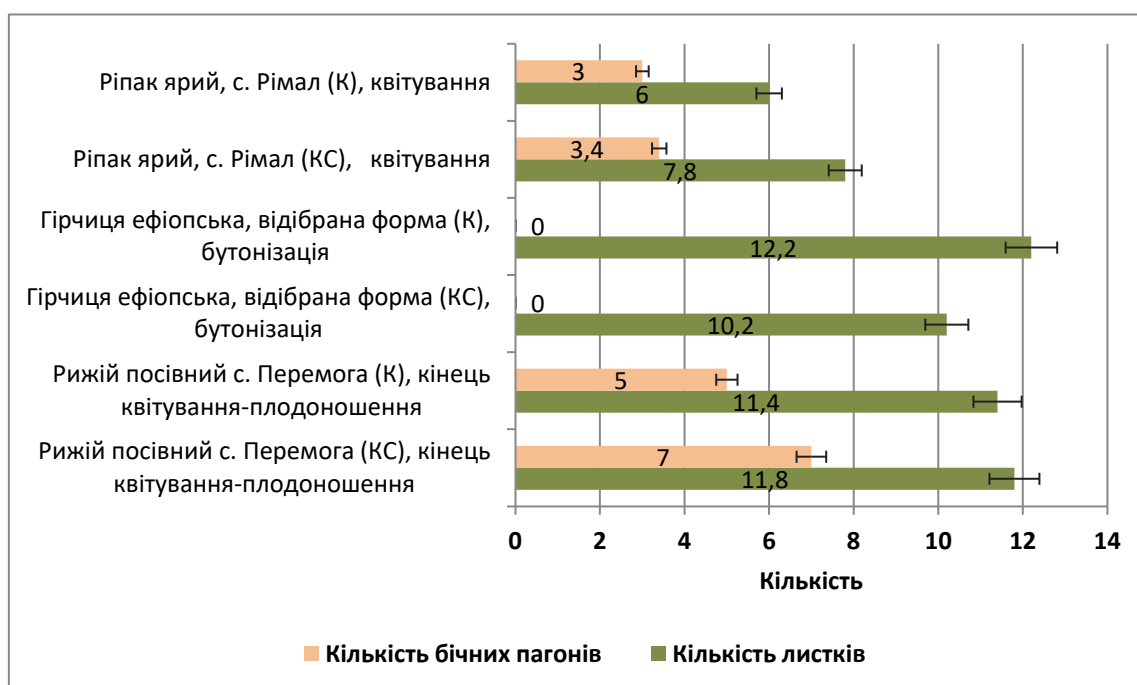


Рис. 6. 8. Кількість бічних пагонів і листків на рослині рижю, гірчиці та ріпаку залежно від фази розвитку і варіанту дослідження (КС – внесення кремнієвмісних добрив, К – контроль)

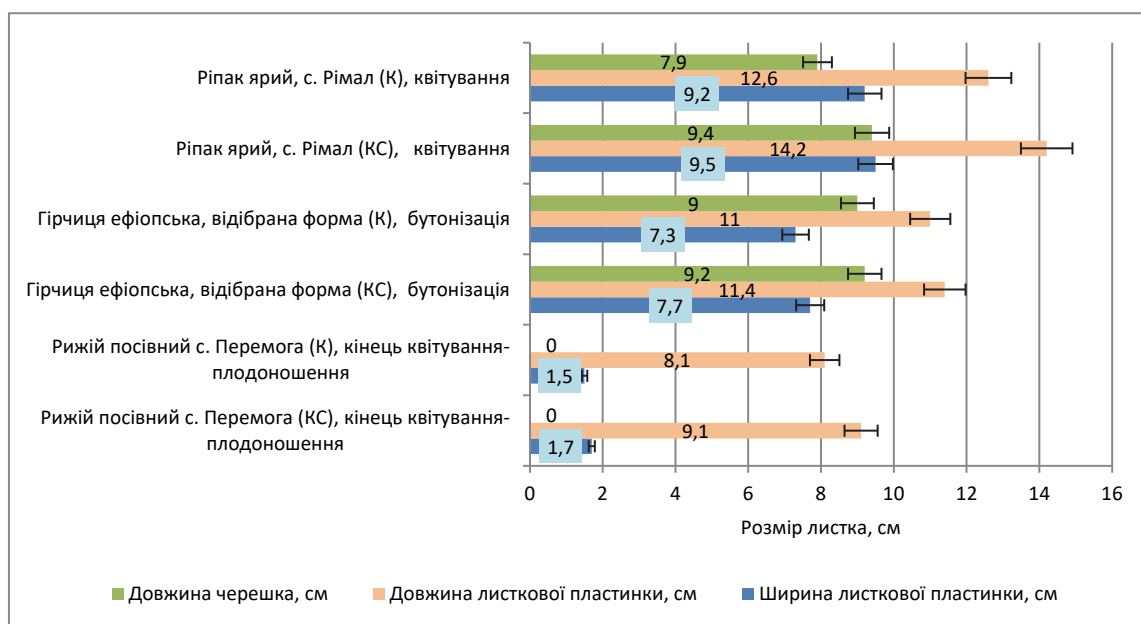


Рис. 6. 9. Розмір листків рослин рижю, гірчиці та ріпаку залежно від фази розвитку і варіанту дослідження (КС – внесення кремнієвмісних добрив, К – контроль)

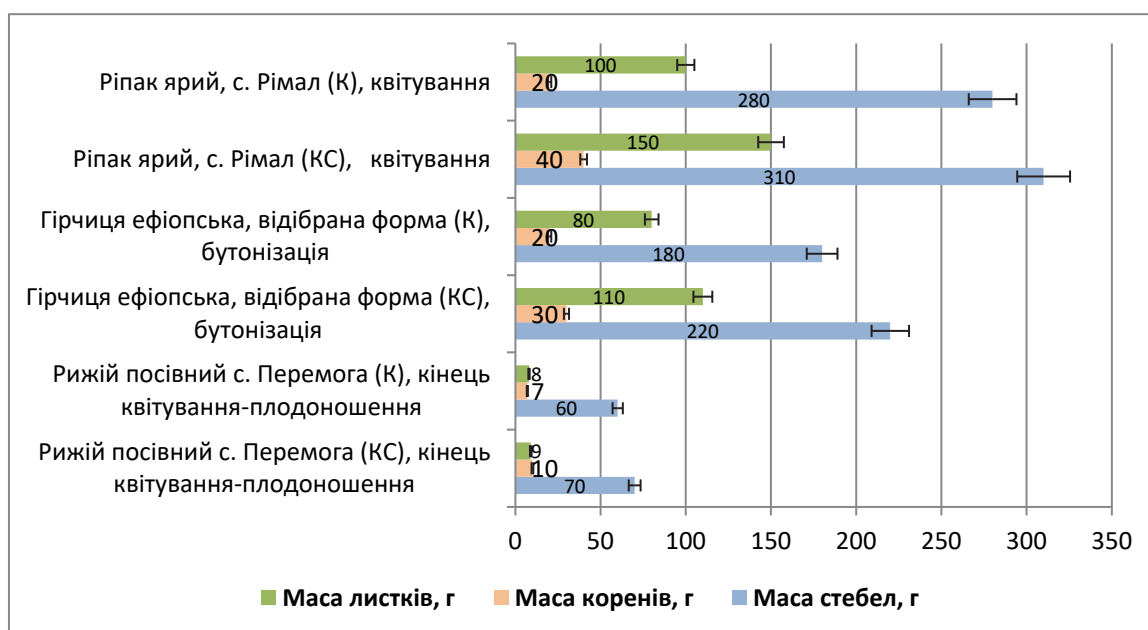


Рис. 6. 10. Маса листків, стебел і коренів рослин рижю, гірчиці та ріпаку залежно від фази розвитку і варіанту дослідження (КС – внесення кремнієвмісних добрив, К – контроль) (n=10 рослин)

До фази плодоношення ростові показники суттєво змінилися у рослин ріпаку та гірчиці, особливо у варіантах з добривом. У рижю суттєвого приросту висоти та коренів рослин не відбулося (рис. 6.11).

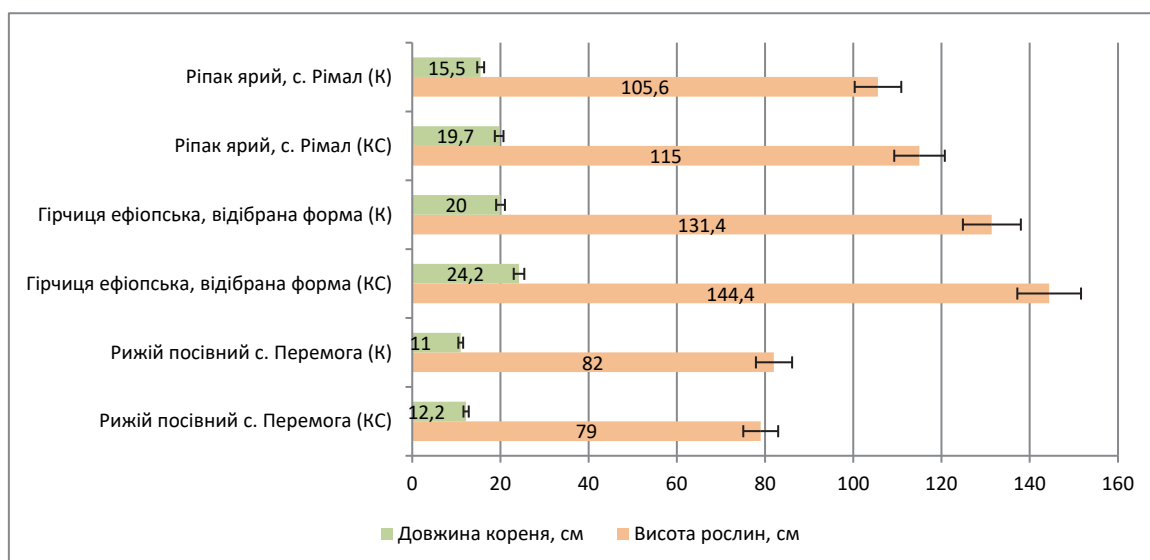


Рис. 6. 11. Висота рослин і довжина кореня рослин рижію, гірчиці та ріпаку в фазі плодоношення залежно від варіанту дослідження (КС – внесення кремнієвмісних добрив, К – контроль)

В цілому в цей період також зберігається закономірність щодо суттєвого впливу на основні ростові та продуктивні показники рослин кремнієвмісних добрив (6. 12-6. 14).

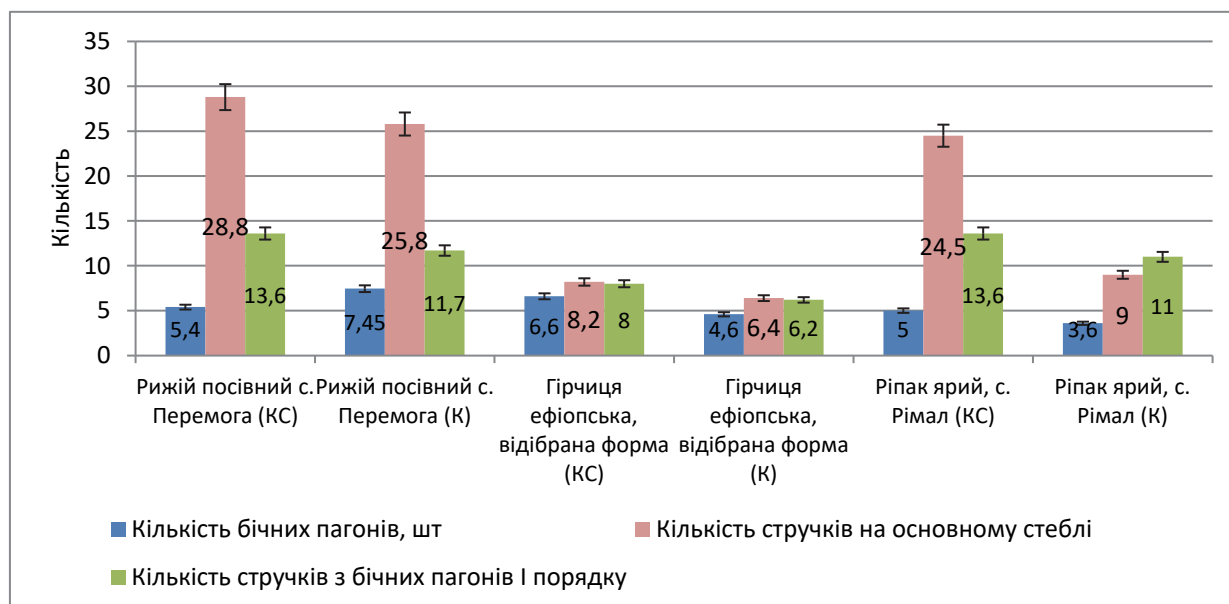


Рис. 6. 12. Кількість бічних пагонів і стручків на рослині рижію, гірчиці та ріпаку у період плодоношення залежно від варіанту дослідження (КС – внесення кремнієвмісних добрив, К – контроль)

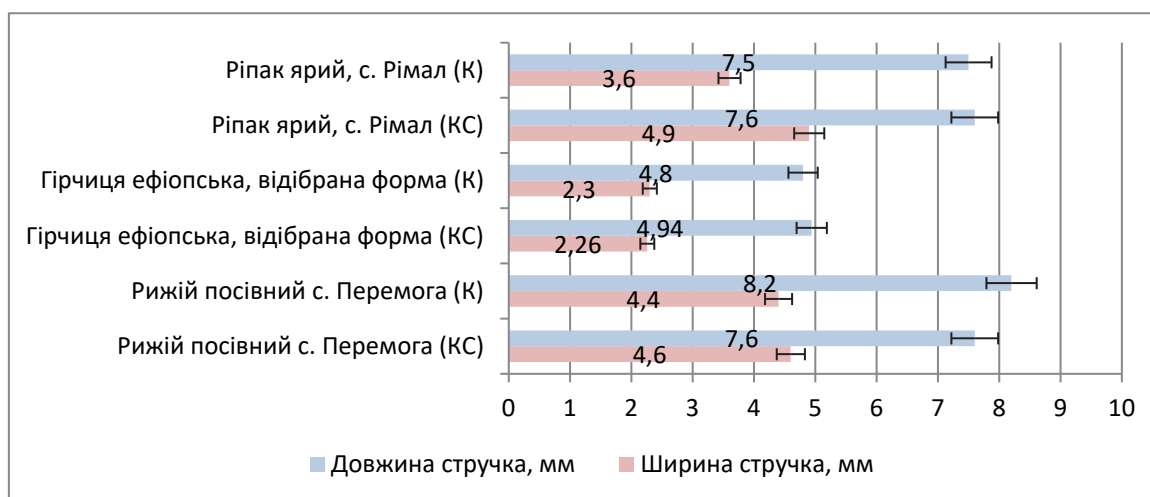


Рис. 6. 13. Розмір стручків на рослині рижю, гірчиці та ріпаку у фазі плодоношення залежно від варіанту дослідження (КС – внесення кремнієвмісних добрив, К – контроль)

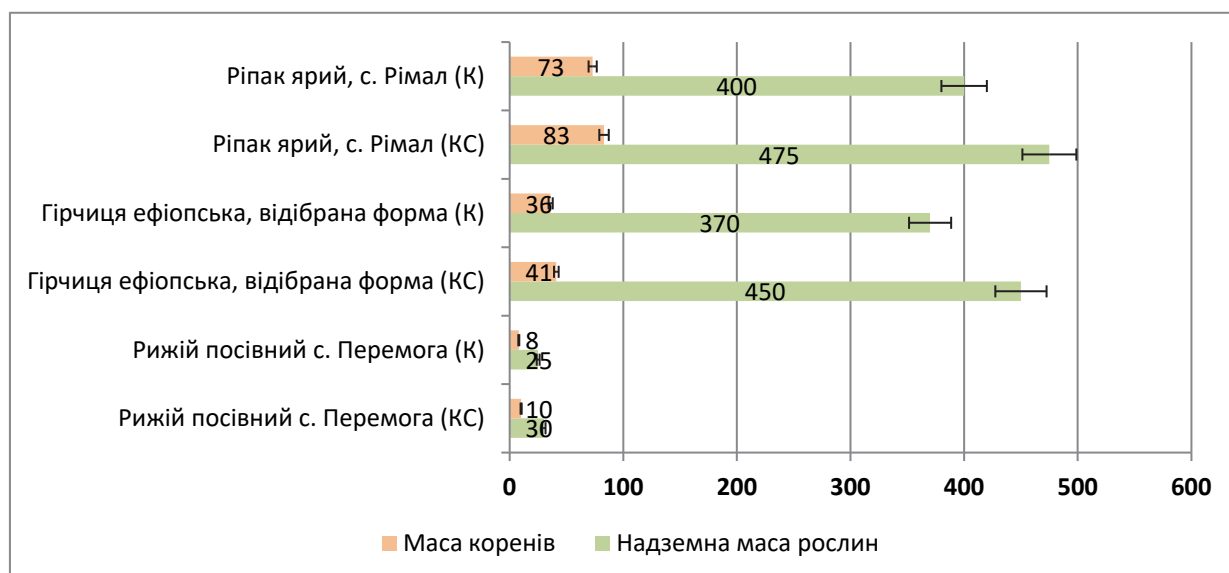


Рис. 6. 14. Надземна маса і маса коренів рослин рижю, гірчиці та ріпаку в фазі плодоношення залежно від варіанту дослідження (КС – внесення кремнієвмісних добрив, К – контроль)

У фазі дозрівання рослин у досліді встановлено закономірно позитивний вплив кремнієвмісних добрив на морфометричні та продуктивні показники. Рижій, гірчиця і ріпак мали вищі показники висоти рослин, довжини кореня, діаметра стебла в основі, кількості пагонів, кількості стручків та їхніх розмірів, маси надземної частини, коренів і насіння в

удобрених варіантах, ніж у контролі – за певними винятками (рис. 6. 15-6. 20).

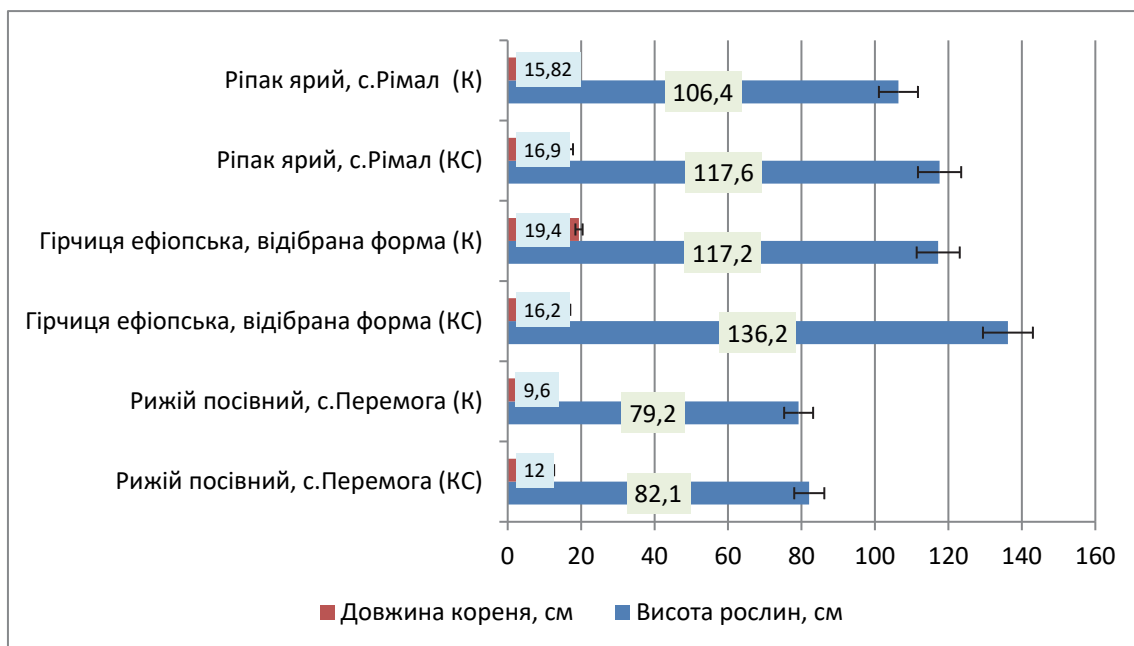


Рис. 6. 15. Висота рослин і довжина кореня рижю, гірчиці та ріпаку у фазу досягання залежно від варіанту дослідження (КС – внесення кремнієвмісних добрив, К – контроль)

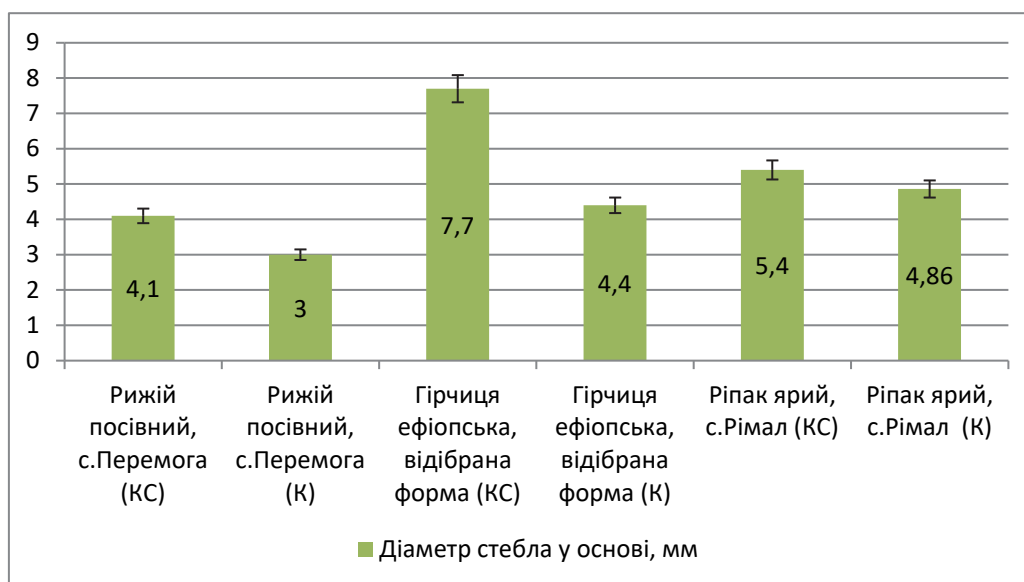


Рис. 6. 16. Діаметр стебла в основі рослин рижю, гірчиці та ріпаку в фазі дозрівання залежно від варіанту дослідження (КС – внесення кремнієвмісних добрив, К – контроль)

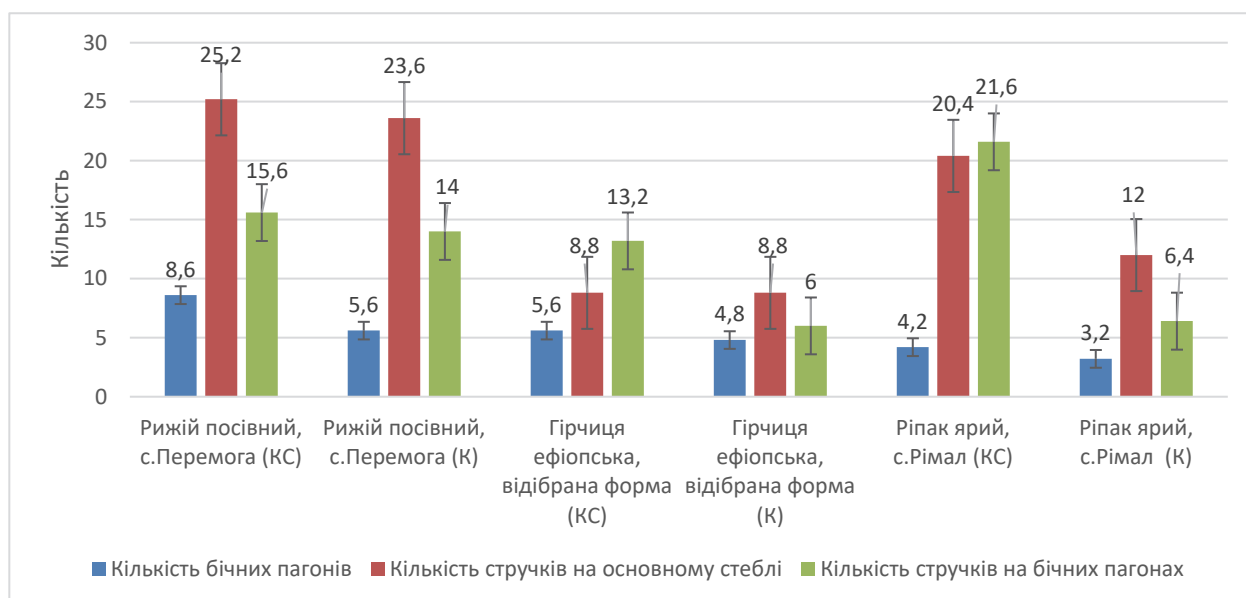


Рис. 6. 17. Кількість бічних пагонів і стручків на рослині рижю, гірчиці та ріпаку в фазі дозрівання залежно від варіанту дослідження (КС – внесення кремнієвмісних добрив, К – контроль)

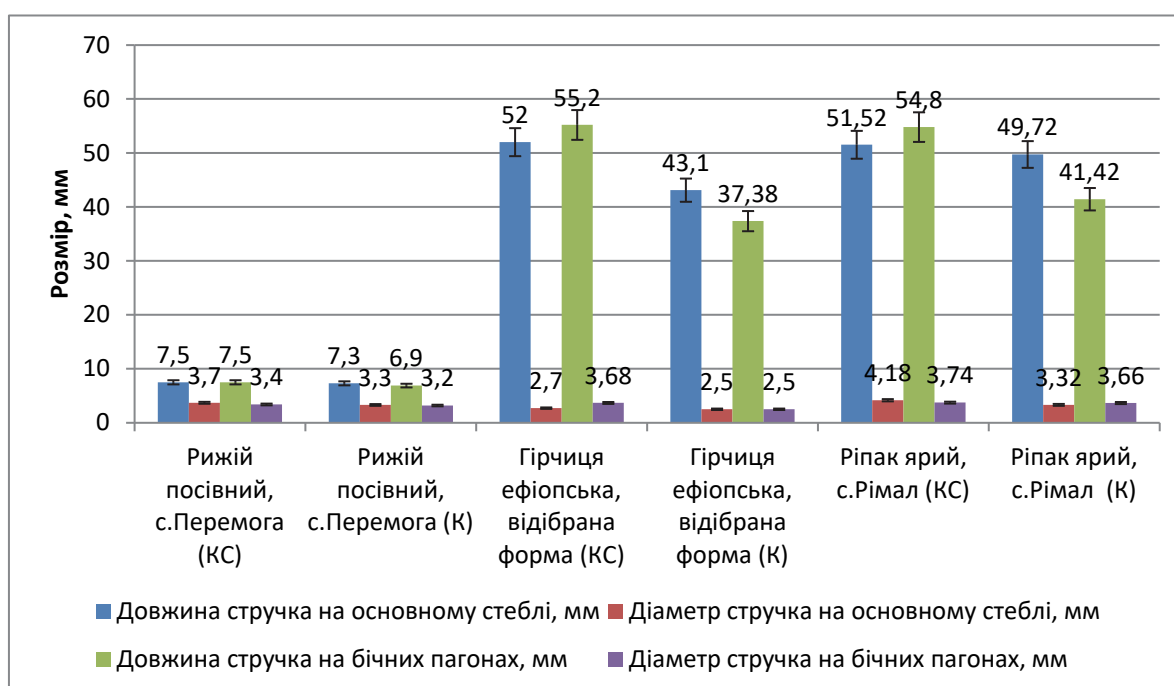


Рис. 6. 18. Розмір стручків на рослинах рижю, гірчиці та ріпаку в фазі дозрівання залежно від варіанту дослідження (КС – внесення кремнієвмісних добрив, К – контроль)

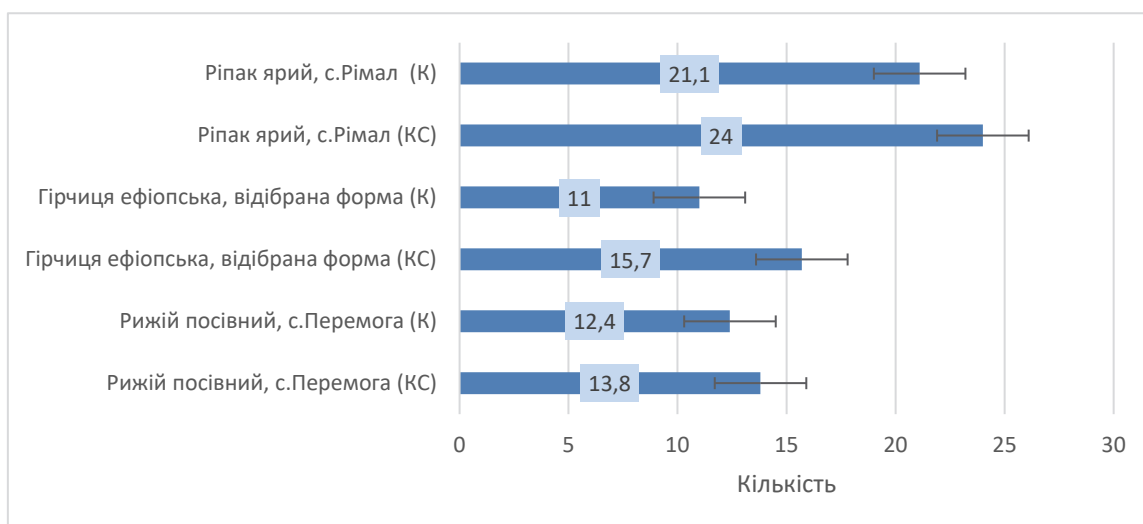


Рис. 6. 19. Кількість насінин у стручку на рослинах рижію, гірчиці та ріпаку в фазі дозрівання залежно від варіанту дослідження (КС – внесення кремнієвмісних добрив, К – контроль)

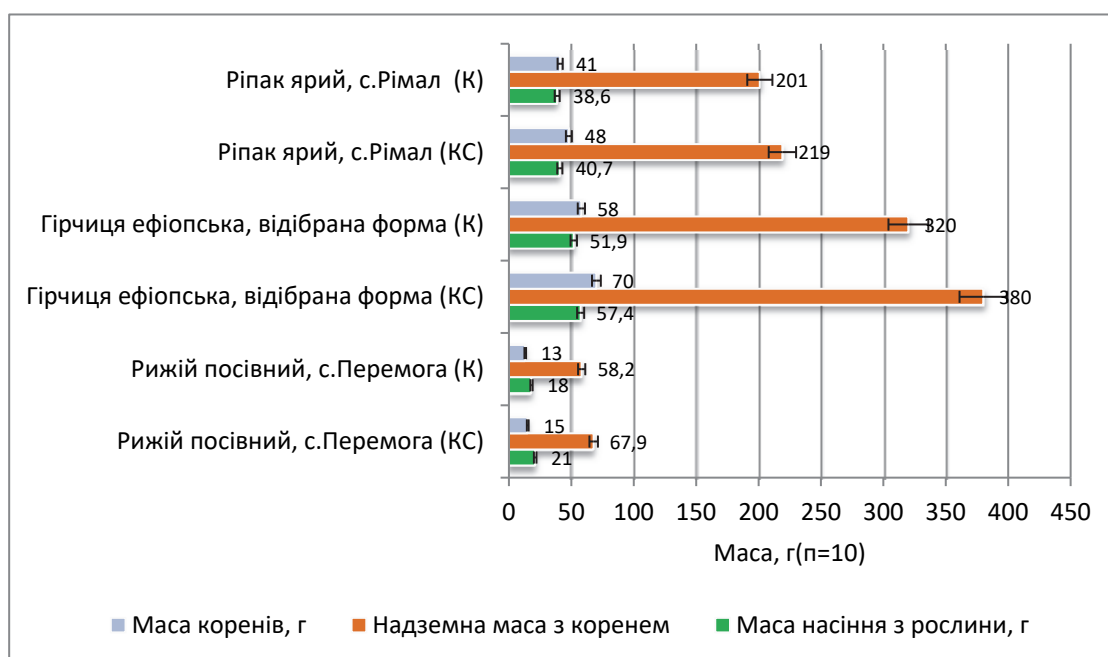


Рис. 6. 20. Маса надземної частини, насіння і коренів рижію, гірчиці та ріпаку залежно від варіанту дослідження (КС – внесення кремнієвмісних добрив, К – контроль)

За масою 1000 насінин рижію, гірчиці та ріпаку встановлено суттєву різницю між варіантами дослідження. Зокрема внесення кремнієвмісних добрив позитивно вплинуло на крупність насіння і маса 1000 насінин була більшою (рис. 6.21).

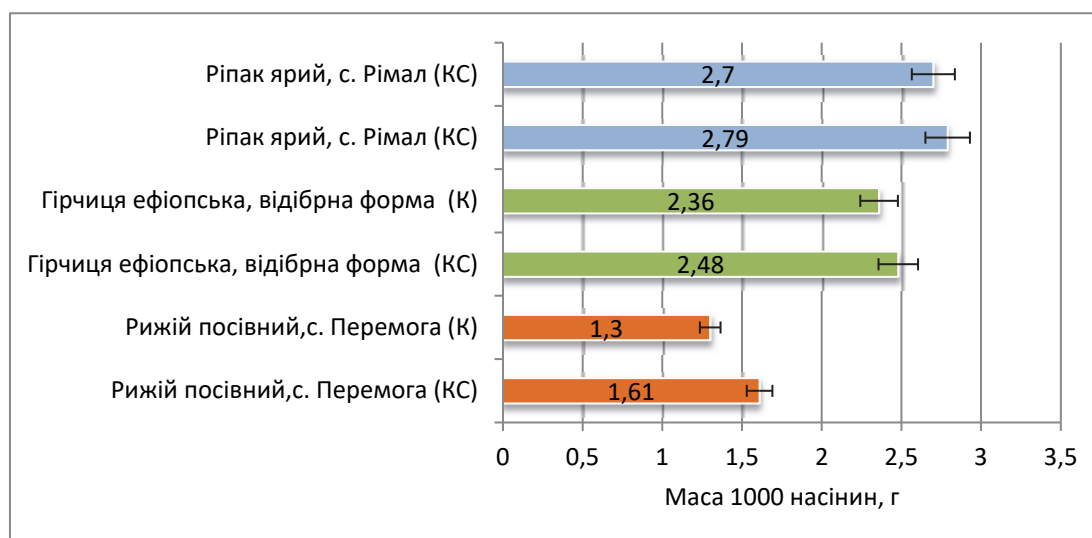


Рис. 6. 21. Маса 1000 насінин рижю, гірчиці та ріпаку залежно від варіанту дослідів (КС – внесення кремнієвмісних добрив, К – контроль)

Різниця між удобреними та неудобреними варіантами за масою 1000 насінин у рижю становила 0,31 г, гірчиці – 0,12, ріпаку – 0,09 г. Варто зазначити, що кремнієвмісні добрива здійснили суттєвий вплив на розміри і масу 1000 насінин, що є важливими показниками, які впливають на продуктивність рослин.

Таким чином, результати проведеного аналізу свідчать про те, що до завершення вегетації вплив кремнієвмісних добрив суттєво відобразився на всіх ростових і продуктивних показниках капустяних культур. Приріст висоти рослин становив 3,7 % у рижю, 10,5 % – у ріпака та 16,2 % – у гірчиці. Під впливом добрив значно збільшилася кількість насінин у стручку: на 11,3 % у рижю; на 13,7 % – у ріпака; на 42,7 % – у гірчиці. Маса 1000 насінин аналогічно зросла у ріпака на 3,3 %, у гірчиці – на 5,1 % і у рижю – на 18,4 %. Приріст надземної маси за умови впливу добрива сягав 9,0 % у ріпака, 16,7 % – рижю, 18,8 % – у гірчиці. Насінна продуктивність за цих умов збільшилася у ріпака на 5,4 %, гірчиці – на 10,6 %, у рижю – на 16,7 %, що доводить високу ефективність застосування кремнієвмісних добрив.

6. 2. Біохімічний склад рослин рижію, гірчиці та ріпака

Упродовж вегетаційного періоду було здійснено аналіз динаміки накопичення абсолютно сухої речовини у надземній фітомасі рослин *Camelina sativa* Crantz f. annua, cv. Peremoħa, *Brassica carinata* (ВФ-відібрана форма) та *Brassica napus annua* D.C., cv. Rimal залежно від використання кремнієвмісних сполук. Варто зазначити, що рослини по-різному реагували на внесення добрив, зокрема *Camelina sativa* Crantz f. annua, cv. Peremoħa у фазі плодоношення і дозрівання більше акумулював у надземній фітомасі абсолютно суху речовину у варіанті досліді – без використання кремнієвмісних сполук (рис. 6. 22). Можна припустити, що для даного генотипу такі мікродобрива спричиняють порушення фізіологічних процесів, або можливо варто підібрати оптимальну концентрацію при внесенні в ґрунт, оскільки у дослідженнях Teimoori et al. (2023) продемонстровано зростання накопичення сухої речовини в надземній фітомасі за умов позакореневого підживлення рослин кремнієвими добривами.

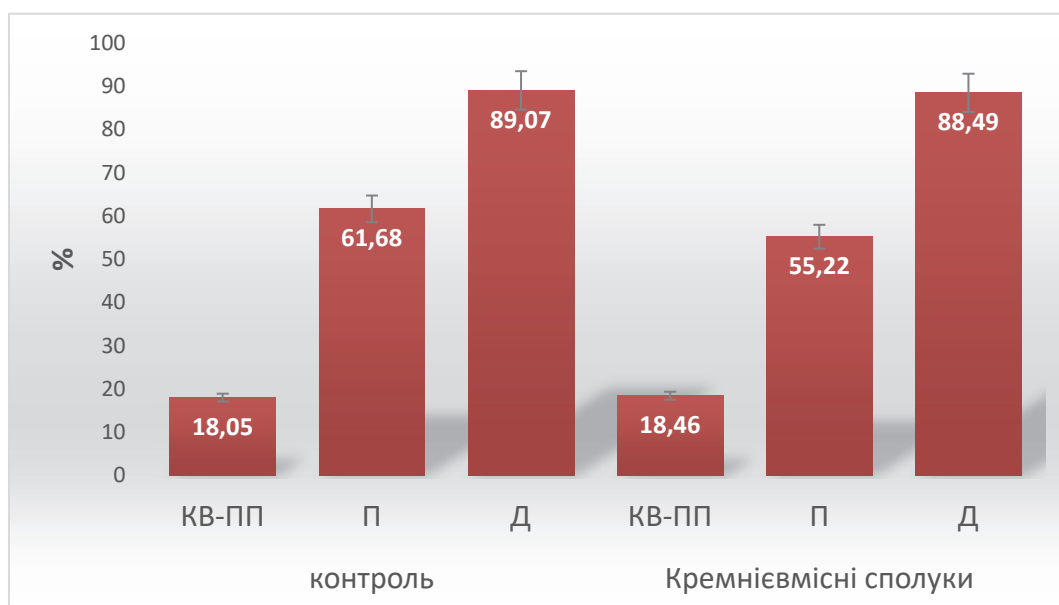


Рис. 6. 22. Вміст сухої речовини у рослин *Camelina sativa* Crantz f. annua, cv. Peremoħa залежно від фази розвитку та використання кремнієвмісних сполук (КВ-ПП – квітання-початок плодоношення; П – плодоношення; Д – дозрівання насіння)

Рослини *Brassica carinata* (ВФ) виявилися ще більш чутливими до кремнієвмісних сполук і накопичували значно менше сухої речовини при підживленні порівняно з контролем (рис. 6. 23). З огляду на це також варто попрацювати з концентраціями цих сполук маючи на меті пошук оптимальних елементів технології підживлення. Для різних генотипів рослин *Brassica carinata* позитивним рішенням щодо підвищення врожайності надземної біомаси та накопичення біологічно активних сполук, у тому числі – сухої речовини, є внесення азотовмісних добрив (Bashyal et al., 2021). У дослідженнях Seeraul та ін. (2019) накопичення абсолютно сухої речовини в надземній частині у різні фази розвитку забезпечувалось на рівні наших результатів.

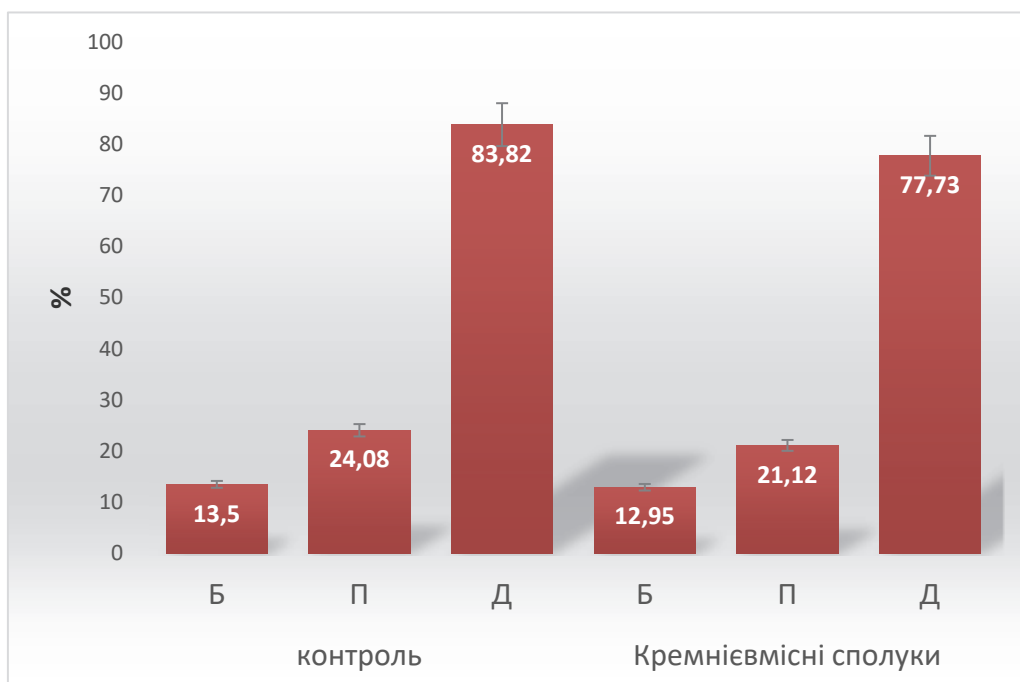


Рис. 6. 23. Вміст сухої речовини у рослин *Brassica carinata* (ВФ-відібрана форма) залежно від фази розвитку та використання кремнієвмісних сполук (Б – бутонізація; П – плодоношення; Д – достигання насіння)

Порівнюючи з попередніми видами позитивний вплив підживлення рослин кремнієвмісними сполуками відмічено у *Brassica napus annua* D.C., cv. Rimal (рис. 6. 24).

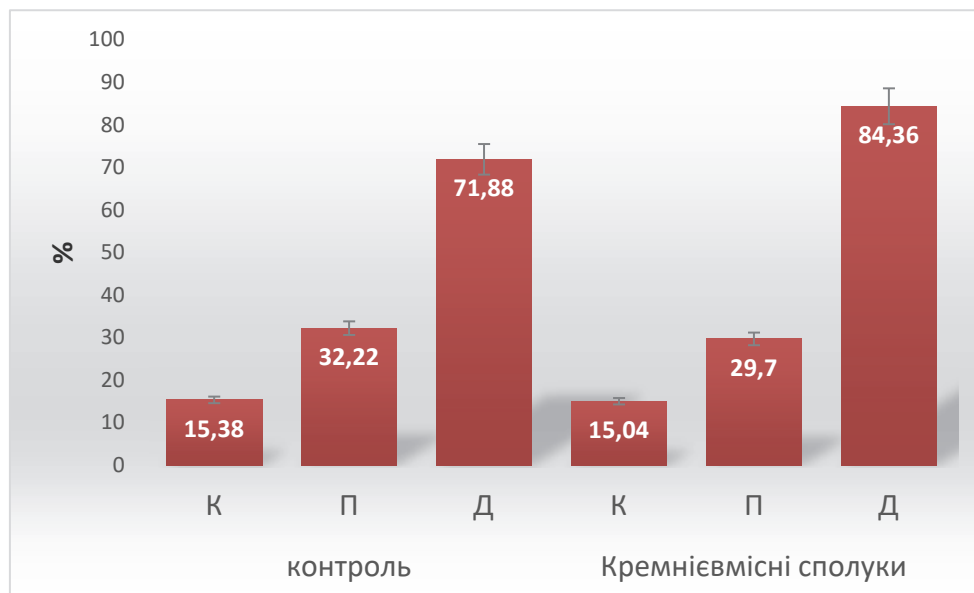


Рис. 6. 24. Вміст сухої речовини у рослин *Brassica napus annua* D.C., cv. Rimal залежно від фази розвитку та використання кремнієвмісних сполук (К – квітування; П – плодоношення; Д – дозрівання насіння)

Так у фазі квітування та плодоношення вміст сухої речовини був майже однаковим у варіанті без підживлення та з підживленням, а у фазі дозрівання цей показник був значно вищим за умов використання кремнієвмісних сполук. Варто зазначити, що подібні дослідження нами в літературі не зафіксовано, є дані результатів досліджень Вапо та інших (2022), які відмічають позитивний вплив на накопичення абсолютно сухої речовини у вегетативних та генеративних органах рослин у випадку використання миш'яку.

Дослідження вмісту цукрів у надземній частині рослин *Camelina sativa* Crantz f. *annua*, cv. Peremoha (рис. 6. 25) підтверджує припущення того, що рослини даного генотипу піддаються стресу, оскільки при використанні кремнієвмісних сполук спостерігається зростання рівню загального вмісту цукрів та моноцукрів, що свідчить про зміни характеру фізіолого-біохімічних процесів. Це пов'язано із захистом білкових структур організму рослин (Ahmad et al., 2020). У цьому ж дослідженні Ahmad та інших (2020) спостерігається також підвищення цукрів від 2 до 6 % за стресових умов.

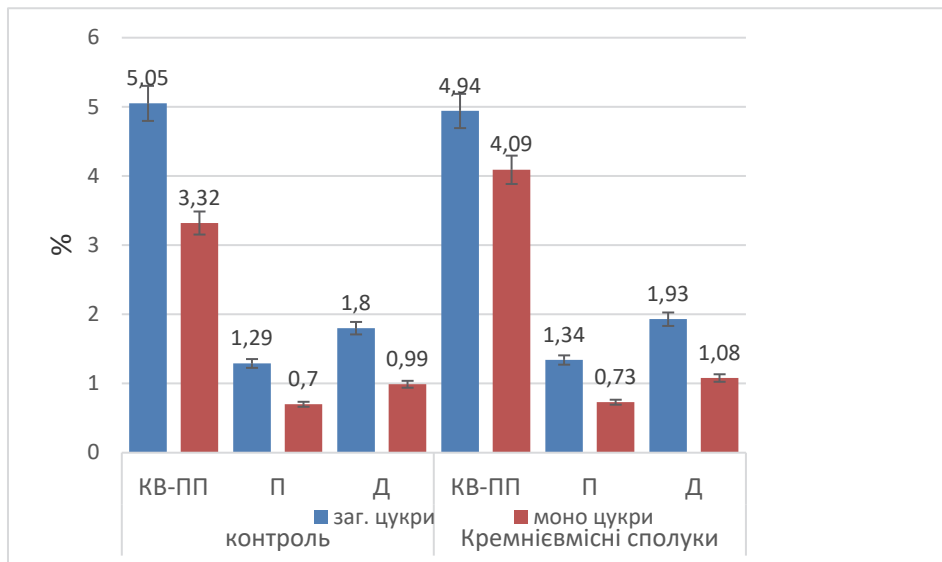


Рис. 6. 25. Вміст вуглеводнів у рослин *Camelina sativa* Crantz f. *annua*, cv. *PeremoHa* залежно від фази розвитку та використання кремнієвмісних сполук (КВ-ПП – квітання-початок плодоношення; П – плодоношення; Д – дозрівання насіння)

Встановлено значне зростання вмісту вуглеводнів у надземній фітомасі рослин упродовж вегетаційного періоду майже у два рази у фазі бутонізації та в межах 17 % у фазі плодоношення і дозрівання насіння – порівняно з контролем (рис. 6. 26), що вочевидь може бути викликано підвищенням чутливості рослин до дії стресових чинників довкілля (Mezgebe & Azerefegne, 2021). Загальний вміст цукрів у надземній фітомасі *Brassica carinata* за даними Kumar та інших (2020) коливається від 7,5 до 10 %.

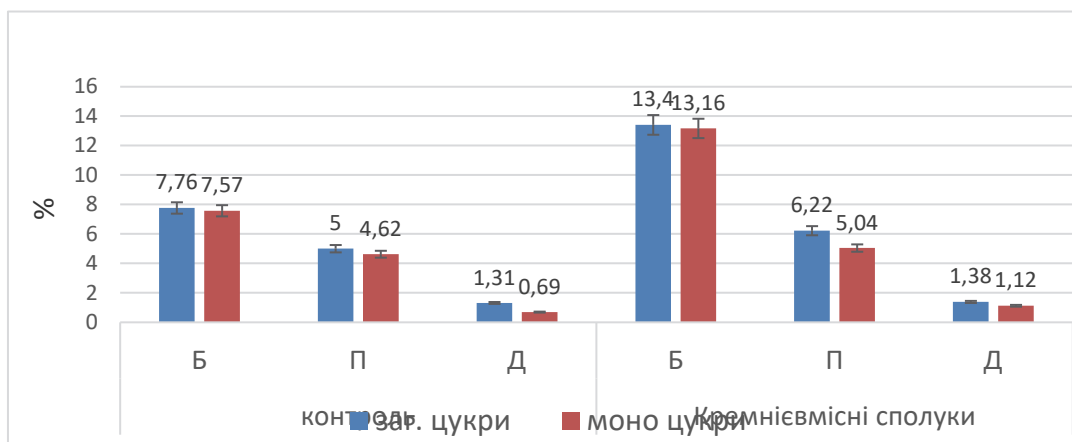


Рис. 6. 26. Вміст вуглеводнів у рослин *Brassica carinata* (ВФ-відібрана форма) залежно від фази розвитку та використання кремнієвмісних сполук (Б – бутонізація; П – плодоношення; Д – дозрівання насіння)

На відміну від інших культур зростання цукрів у надземній фітомасі рослин *Brassica napus annua* D.C., cv. Rimal було незначним (у межах 10-15 %) (рис. 6. 27). Це свідчить про позитивний вплив кремнієвмісних сполук на ріст і розвиток даних рослин. Варто зазначити, що вміст цукрів у рослинній сировині співпадає з даними, отриманими Jamshidi Zinab та іншими (2023).

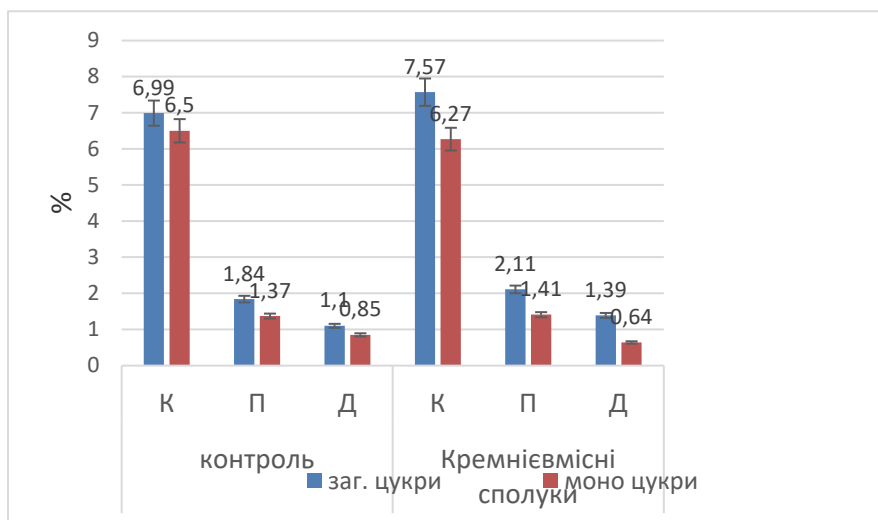


Рис. 6. 27. Вміст вуглеводнів у рослин *Brassica napus annua* D.C., cv. Rimal залежно від фази розвитку та використання кремнієвмісних сполук (К – квітання; П – плодоношення; Д – дозрівання насіння)

Досліджено вміст аскорбінової кислоти у рослин *Camelina sativa* Crantz f. *annua*, cv. PeremoHa. Встановлено, що найбільший вміст вітаміну С був у рослин під час квітання-початку плодоношення – у варіанті без обробки кремнієвмісними сполуками (рис. 6. 28). За внесення цих добрив спостерігали незначне зростання аскорбінової кислоти у порівнянні з контролем, тому очевидно накопичення вітаміну С не залежить від підживлення рослин кремнієвмісними сполуками. Як свідчать результати досліджень Ahmad та інших (2021) накопичення аскорбінової кислоти у *Camelina sativa* та *Brassica napus* – на одному рівні та коливається в межах 150 мг%.



Рис. 6. 28. Вміст аскорбінової кислоти у рослин *Camelina sativa* Crantz f. annua, cv. Перемога залежно від фази розвитку та використання кремнієвмісних сполук (КВ-ПП – квітування-початок плодоношення; П – плодоношення; Д – дозрівання насіння)

Подібна тенденція щодо накопичення аскорбінової кислоти у надземній частині спостерігається також й у рослин *Brassica carinata* (ВФ-відібрана форма). У фазі бутонізації цей показник був найвищим – у варіанті без внесення мікродобрих, а у фазі плодоношення та дозрівання насіння цей же показник був вищим у варіанті з внесенням кремнієвмісних сполук порівняно із контролем (рис. 6. 29). Результати досліджень Hailemariam, & Wudineh (2020) свідчать, що рослини *Brassica carinata* здатні накопичувати аскорбінову кислоту до 50 мг/100 мл у фазі квітування.

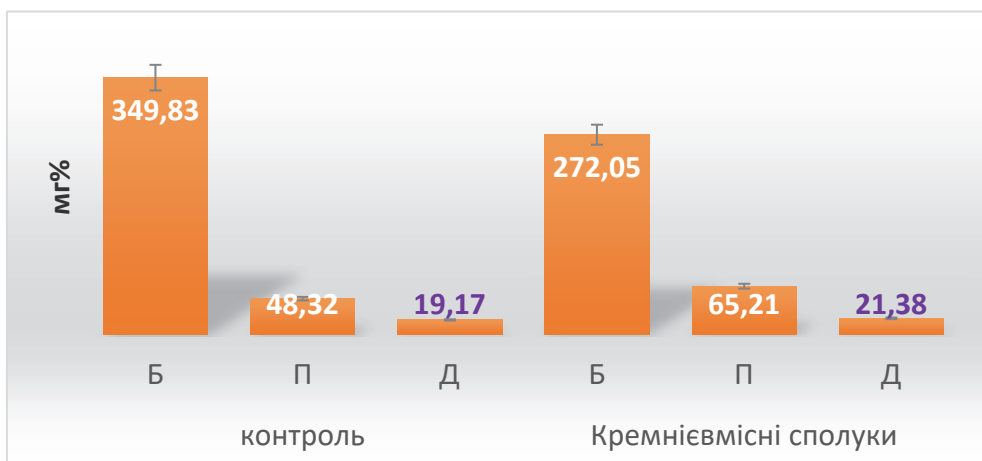


Рис. 6. 29. Вміст аскорбінової кислоти у рослин *Brassica carinata* (ВФ-відібрана форма) залежно від фази розвитку та використання кремнієвмісних сполук (Б – бутонізація; П – плодоношення; Д – дозрівання насіння)

Протилежні результати порівняно з вище дослідженими видами забезпечували рослини *Brassica napus annua* D.C., cv. Rimal (рис. 6. 30). Так у варіанті з внесенням кремнієвмісних сполук спостерігаємо зростання вмісту аскорбінової кислоти у фазі квітування та плодоношення. Разом із тим варто зазначити, що з отриманими даними Ahmad та інших (2021), рослини в наших дослідженнях вирізнялися підвищеним вмістом вітаміну С у надземній частині.

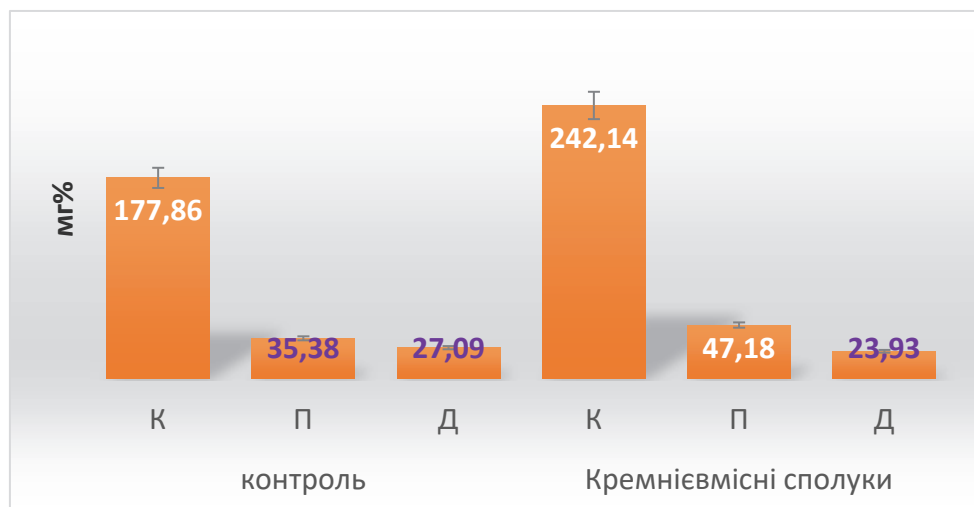


Рис. 6. 30. Вміст аскорбінової кислоти у рослин *Brassica napus annua* D.C., cv. Rimal залежно від фази розвитку та використання кремнієвмісних сполук (К – квітування; П – плодоношення; Д – дозрівання насіння)

Виявлено, що за внесення кремнієвмісних сполук у рослин *Camelina sativa* Crantz f. annua, cv. Peremoha зростає вміст дубильних речовин та знижується титрована кислотність у фазі квітування – початок плодоношення, в інші фази ці показники менші у порівнянні із контролем (рис. 6. 31). Відомо, що вміст дубильних речовин і титрованої кислотності коливається в межах від 0,5 до 1,5 %, що повною мірою цілком співставне з вмістом цих сполук у наших варіантах дослідів (Mondor, & Hernández Álvarez, 2022).

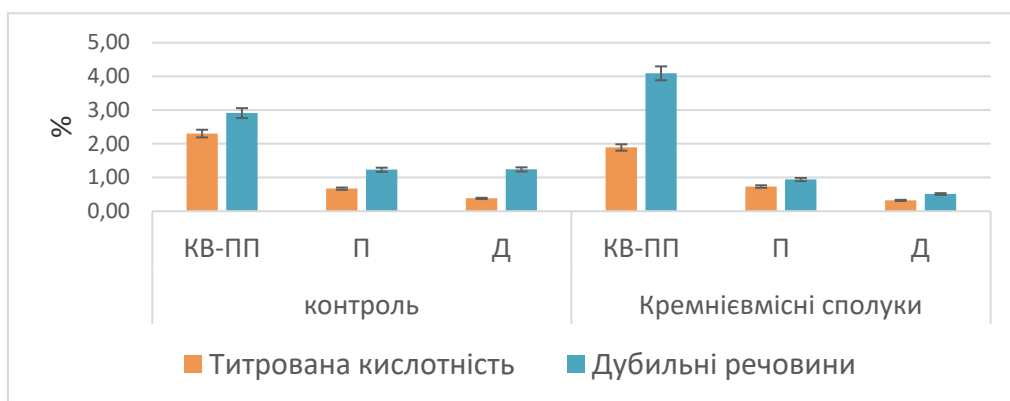


Рис. 6. 31. Титрована кислотність та вміст дубильних речовин у рослин *Camelina sativa* Crantz f. *annua*, cv. Peremoha залежно від фази розвитку та використання кремнієвмісних сполук (КВ-ПП – квітання-початок плодоношення; П – плодоношення; Д – дозрівання насіння)

Встановлено, що рослини *Brassica carinata* (ВФ-відібрана форма) по іншому накопичували дубильні речовини та титровану кислотність у надземній частині (рис. 6. 32). Так у варіанті з внесенням кремнієвмісних сполук спостерігали зростання у порівнянні з контролем титрованої кислотності та навпаки – зменшення вмісту дубильних речовин. Щоб зрозуміти причинно-наслідкові зв'язки, варто провести повторні дослідження і випробувати різні концентрації речовини. Також варто зазначити, що подібних досліджень в сучасній науковій літературі ми не знайшли.

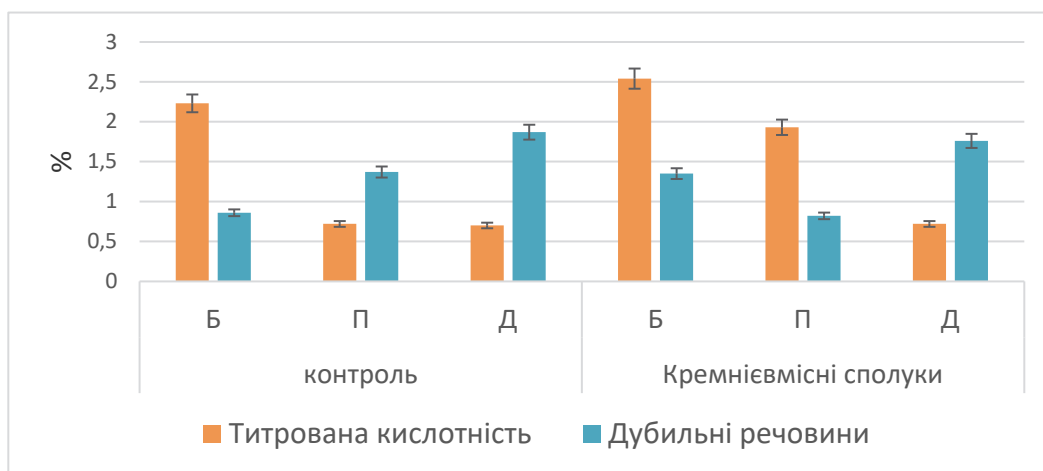


Рис. 6. 32. Титрована кислотність і вміст дубильних речовин у рослин *Brassica carinata* (ВФ-відібрана форма) залежно від фази розвитку та використання кремнієвмісних сполук (Б – бутонізація; П – плодоношення; Д – дозрівання насіння)

Так само, як у випадку з накопиченням інших структурно-функціональних та біологічно активних речовин спостерігаємо позитивний вплив кремнієвмісних сполук на накопичення дубильних речовин і титрованої кислотності у рослин *Brassica napus annua* D.C., cv. Rimal (рис. 6. 33).

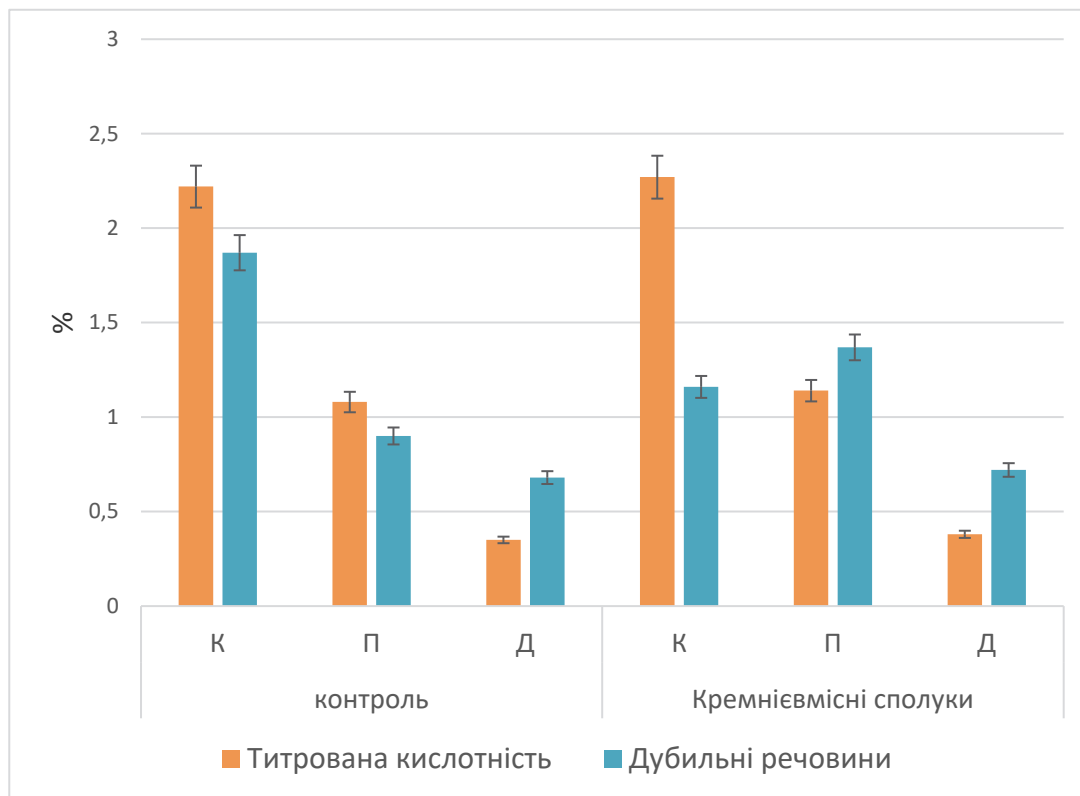


Рис. 6. 33. Титрована кислотність і вміст дубильних речовин у рослин *Brassica napus annua* D.C., cv. Rimal залежно від фази розвитку та використання кремнієвмісних сполук (К – квітування; П – плодоношення; Д – дозрівання насіння)

Простежено, що рослини *Camelina sativa* Crantz f. annua, cv. Peremoha також активніше накопичують мінеральні сполуки у варіанті без внесення кремнієвмісних сполук, що може свідчити про блокування певних механізмів обміну речовин між рослиною та довкіллям (рис. 6. 34). Як свідчать результати досліджень Juodka та інших (2022), вміст цих речовин подібний до отриманих даних у наших дослідженнях.

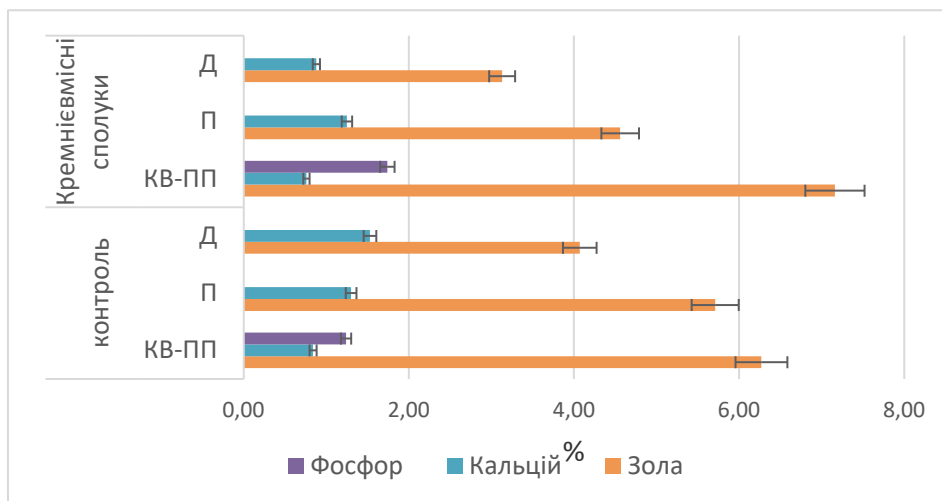


Рис. 6. 34. Накопичення мінеральних речовин у рослин *Camelina sativa* Crantz f. *annua*, cv. *Peremoha* залежно від фази розвитку та використання кремнієвмісних сполук (КВ-ПП – квітування-початок плодоношення; П – плодоношення; Д – дозрівання насіння)

Рослини *Brassica carinata* (ВФ-відібрана форма), на відміну від *Camelina sativa* Crantz f. *annua*, cv. *Peremoha*, більше накопичували мінеральних речовин у варіанті з внесенням кремнієвмісних сполук, лише у фазі бутонізації вміст золи у надземній частині був вищим, ніж у варіанті без внесення мікродобрих (рис. 6. 35). Отримані результати цілком співставні з результатами досліджень Nauman та інших (2021).

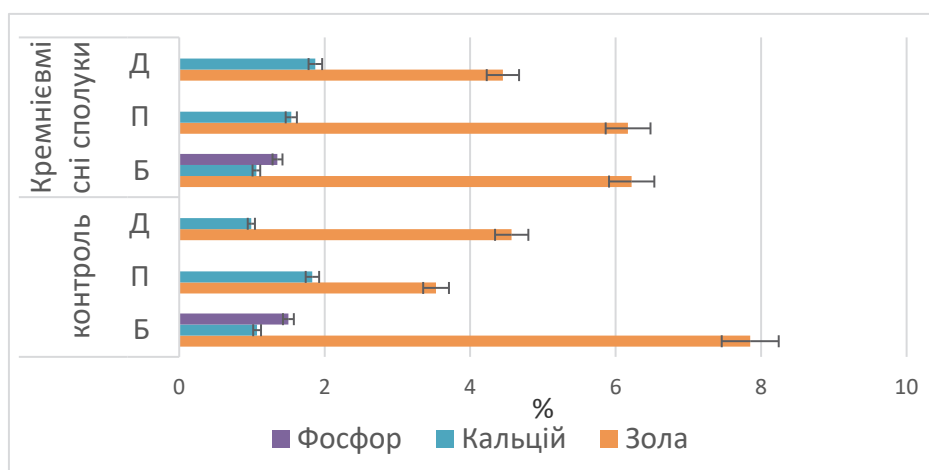


Рис. 6. 35. Накопичення мінеральних речовин у рослин *Brassica carinata* (ВФ-відібрана форма) залежно від фази розвитку і використання кремнієвмісних сполук (Б – бутонізація; П – плодоношення; Д – дозрівання насіння)

Дослідження вмісту мінеральних речовин у *Brassica napus annua* D.C., cv. Rimal показав незначну різницю у їх накопиченні – у варіантах із внесенням кремнієвмісних сполук та без внесення (контроль) (рис. 6. 36). Це може підтверджувати припущення про позитивну реакцію організму рослин цього виду до дії кремнієвмісних добрив.

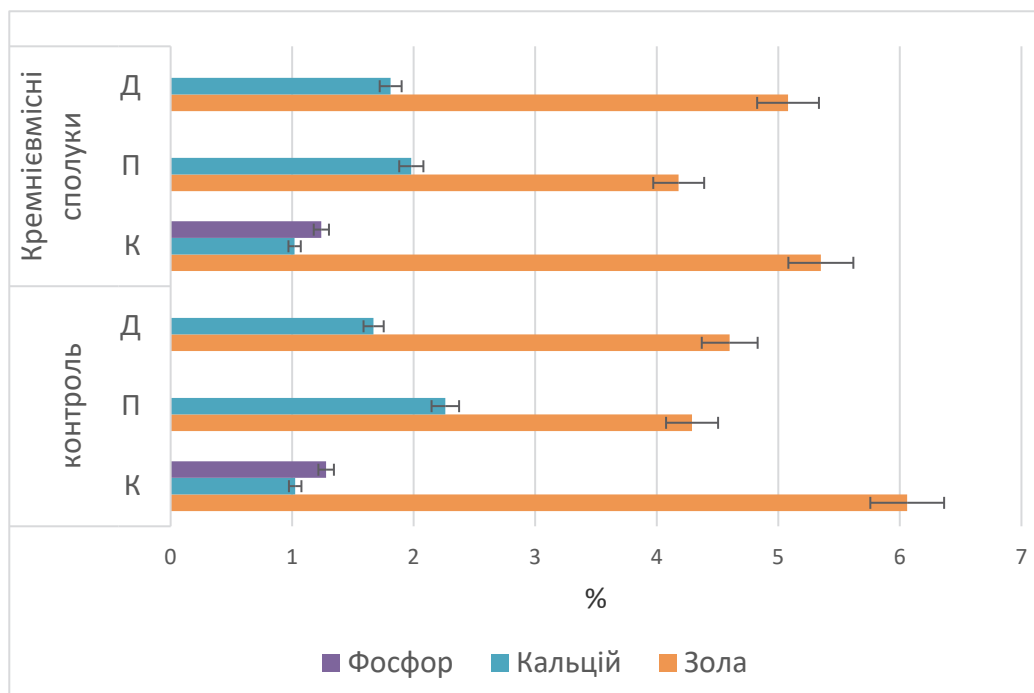


Рис. 6. 36. Накопичення мінеральних речовин у рослин *Brassica napus annua* D.C., cv. Rimal залежно від фази розвитку та використання кремнієвмісних сполук (К – квітування; П – плодоношення; Д – дозрівання насіння)

Вміст ліпідів у надземній частині найвищим був у варіанті без внесення кремнієвмісних сполук у фазі плодоношення, а щодо вільного азоту – спостерігали зростання за умови внесення добрив (рис. 6. 37). За результатами досліджень Ahmad та інших (2021) відомо, що рослини *Camelina sativa* у фазі плодоношення здатні забезпечувати близько 20 % ліпідів і до 2 % вільного азоту.

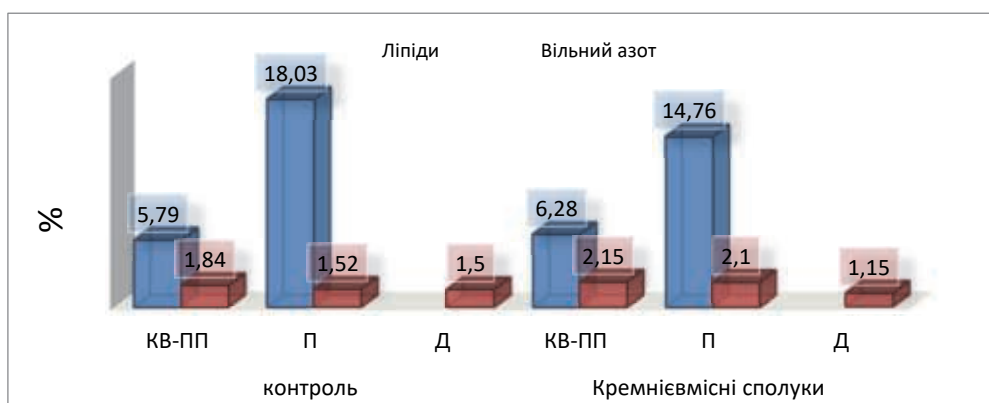


Рис. 6. 37. Вміст ліпідів та вільного азоту у рослин *Camelina sativa* Crantz f. annua, cv. Peremoha залежно від фази рослин і використання кремнієвімісних сполук (КВ-ПП – квітання-початок плодоношення; П – плодоношення; Д – дозрівання насіння)

З'ясовано, що у рослин *Brassica carinata* (ВФ-відібрана форма) вміст ліпідів і вільного азоту майже не залежав від внесення кремнієвімісних сполук, хоча незначне зростання цих речовин зафіксовано у варіанті з внесенням добрива (рис. 6. 38). Дослідженню вмісту ліпідів і вільного азоту у надземній фітомасі рослин мало приділено уваги, наявні дані в основному спрямовані на виявлення цих речовин у насінні, тому відомо, що рослини *Brassica carinata* здатні акумулювати від 27 до 40 % ліпідів – у межах 1 % вільного азоту (Mohdaly, & Ramadan, 2022).

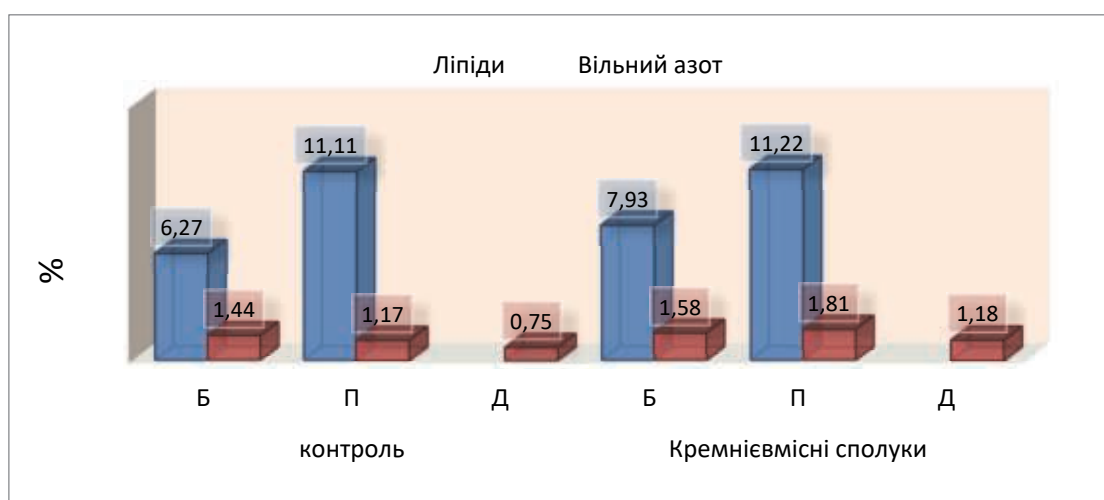


Рис. 6. 38. Вміст ліпідів та вільного азоту у рослин *Brassica carinata* (ВФ-відібрана форма) залежно від фази і використання кремнієвімісних сполук (Б – бутонізація; П – плодоношення; Д – дозрівання насіння)

За використання кремнієвмісних сполук зафіксовано незначне зростання вмісту вільного азоту в надземній частині рослин *Brassica napus annua* D.C., cv. Rimal, натомість відбувається зменшення вмісту ліпідів (рис. 6. 39). Отримані нами дані цілком корелюють з даними Gagour та інших (2022).

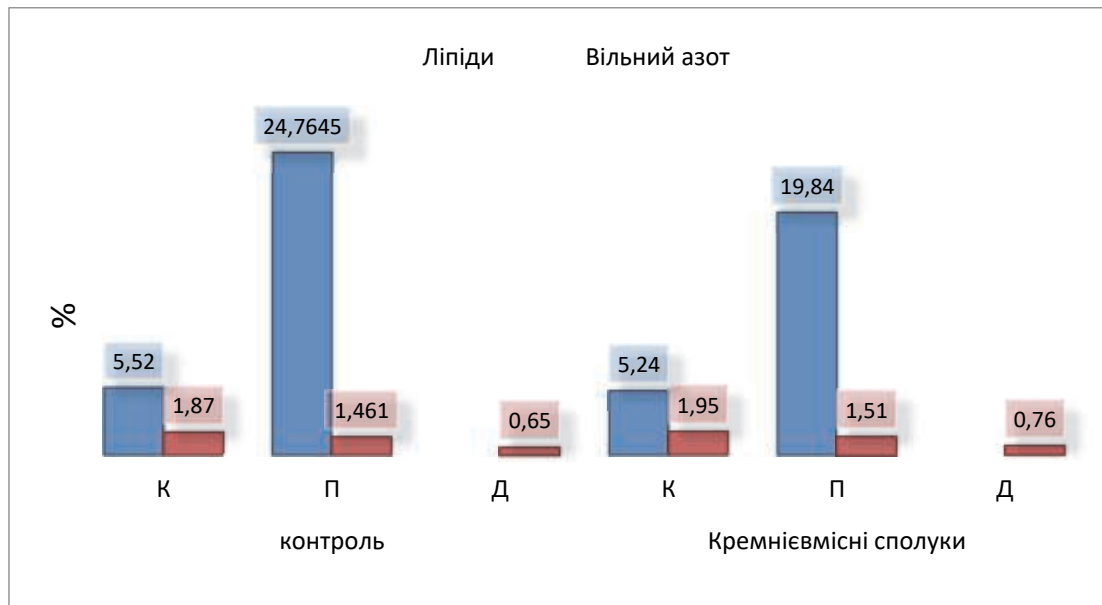


Рис. 6. 39. Вміст ліпідів і вільного азоту в рослин *Brassica napus annua* D.C., cv. Rimal залежно від фази розвитку і використання кремнієвмісних сполук (К – квітування; П – плодоношення; Д – дозрівання насіння)

Таким чином, результати досліджень біохімічного складу рослин трьох культур родини *Brassicaceae* (*Camelina sativa* Crantz f. *annua*, cv. Peremoha, *Brassica carinata* (ВФ-відібрана форма) і *Brassica napus annua* D.C., cv. Rimal) дозволили виявити, що використання добрив на основі кремнієвмісних сполук по різному впливає на проходження фізіолого-біохімічних процесів в організмі. Таким чином, найбільш сприятливий вплив кремнієвмісних сполук простежувався у *Brassica napus annua* D.C., cv. Rimal, для решти культур використання цих сполук спричиняло чутливість до стресових чинників довкілля, що відображалось у різкій відмінності накопичення окремих БАС у надземній фітомасі впродовж вегетаційного періоду.

6. 3. Післядія кремнієвмісних добрив на другий рік після внесення на ростові та фізіолого-біохімічні особливості рослин родини Brassicaceae

Аналіз лінійних розмірів надземної та підземної частини представників Brassicaceae дозволив здійснити загальний розподіл генотипів на групи рослин за довжиною кореня (рис. 6. 40): з коротким коренем (до 12 см) – рижій посівний (КС), ріпак ярий (К); з коренем середньої довжини (від 12,1 до 13,9 см) – рижій посівний (К), ріпак ярий (КС); з довгим коренем (від 14 см і більше): гірчиця ефіопська (К), гірчиця ефіопська (КС).

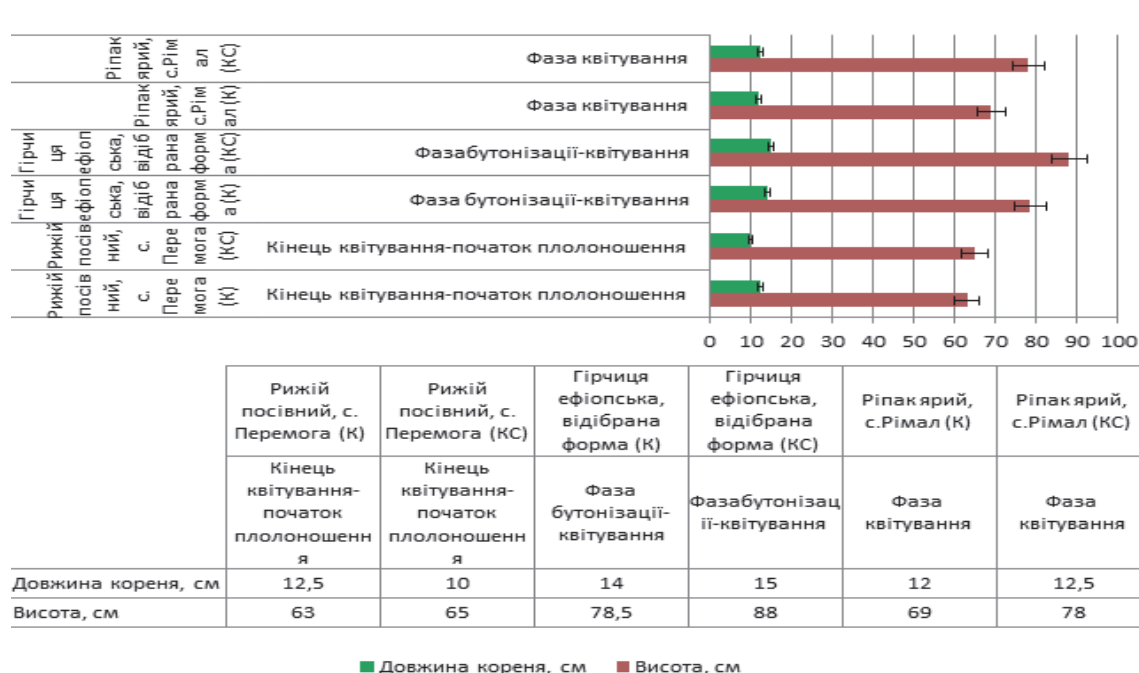


Рис. 6. 40. Висота та довжина кореня рослин рижію, гірчиці та ріпаку залежно від фази розвитку і застосування кремнієвмісного добрива (КС – внесення кремнієвмісних добрив, К – контроль)

Також здійснено розподіл генотипів на три групи за показником висоти надземної маси: низькорослі (до 70 см) – рижій посівний (К), рижій посівний (КС), ріпак ярий (К); середньорослі (від 71 до 80 см) – ріпак ярий (КС), гірчиця ефіопська (К); високорослі (понад 80 см) – гірчиця ефіопська (КС).

Встановлено, що у рослин котрі були вирощені з внесенням кремнієвмісних добрив, за одним виключенням, а саме за показником довжини ко-

рення у рижію посівного, який вирощений без внесення добрива, переважає рослини з внесенням добрив на 25 %. Інші рослини за цим показником мають меншу різницю (з перевагою в бік рослин вирощених із внесенням добрив), а саме ріпак ярий – на 4 %, гірчиця ефіопська – на 6,67 %.

За показником висоти надземної частини рослин різниця є більш помітною та становить у рижію посівного – на 3,08 %, гірчиці ефіопської – на 10,79 %, ріпаку ярого – на 11,54 %.

Дослідження морфометричних показників листків дозволили встановити ряд закономірностей і здійснити розподіл генотипів рослин за показником довжини листка на наступні групи (рис. 6. 41): з коротким листком (до 7 см) – рижій посівний (КС); з середнім листком (від 7,1 до 9 см) – рижій посівний (К), гірчиця ефіопська (К), гірчиця ефіопська (КС); з довгим листком (понад 9 см) – ріпак ярий (К), ріпак ярий (КС).

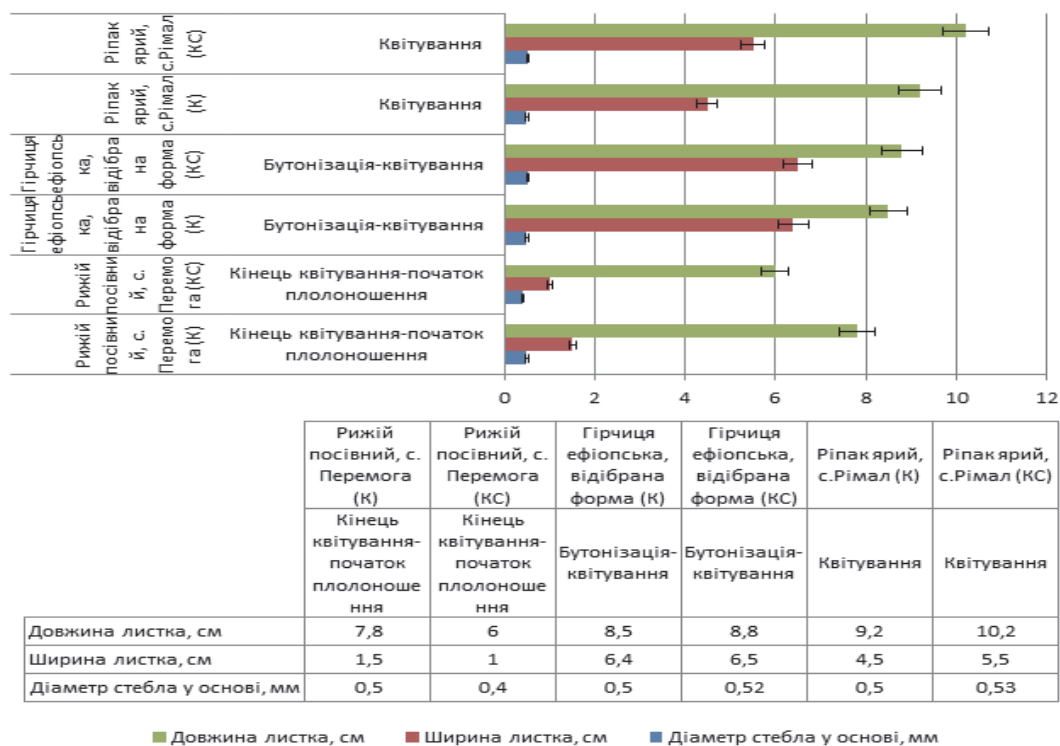


Рис. 6. 41. Розмір листової пластинки та діаметр стебла рослин рижію, гірчиці та ріпаку залежно від фази розвитку і застосування кремнієвмісного добрива (КС – внесення кремнієвмісних добрив, К – контроль)

За шириною листка рослини було розподілено наступним чином: вузьколисті (до 4,4 см) – рижій посівний (КС), рижій посівний (К); середньої ширини листка (від 4,5 до 5,5 см) – ріпак ярий (К), ріпак ярий (КС); широколисті (понад 5,5 см) – гірчиця ефіопська (К), гірчиця ефіопська (КС).

Аналізуючи отримані дані щодо показників розміру листків можна помітити, що внесення кремнієвмістних добрив позитивно впливає на розмір листків у гірчиці ефіопської та ріпаку ярого. У гірчиці ефіопської ця перевага незначна, за довжиною – на 3,41 % та шириною – на 1,54 %. А от ріпак показує значну різницю, яка становить 9,8 % за показником довжини та 18,18 % за показником ширини.

На противагу цим рослинам у рослин рижію посівного вирощеного з внесенням добрив спостерігається доволі значне зменшення розмірів листків (довжини – на 23,08 % та ширини – на 33,33 %).

За показником діаметру стебла рослини розподілено на дві групи: тонкостебельні (до 0,5 мм включно) – рижій посівний (КС), рижій посівний (К), гірчиця ефіопська (К), ріпак ярий (К); товстостебельні (понад 0,5 мм) – гірчиця ефіопська (КС), ріпак ярий (КС).

За цим показником зберігається тенденція щодо вище наведених показників, а саме внесення кремнієвмістних добрив стимулює кращий розвиток гірчиці ефіопської та ріпаку ярого, але погіршує показники рижію посівного (окрім показника висоти надземної частини рослини).

Встановлено, що внесення кремнієвмістних добрив сприяло підвищенню накопиченні сухої речовини у рослин *Brassica carinata*, у решти представників спостережено збільшення вмісту вуглеводів (моно- та загальних цукрів) за цих же умов (рис. 6. 42). Накопичення сухої речовини у рослинах виду *Brassica carinata* спостерігалось на рівні досліджень, проведених іноземними дослідниками (Seepaul et al., 2019). За даними

досліджень Coquerel (2024) з'ясовано, що в умовах України вміст сухої речовини у рослин *Brassica napus* такий самий, як в умовах Франції.

З'ясовано, що в умовах України вміст цукрів у рослинах виду *Brassica carinata* відрізняється, і є вищим – порівняно з дослідженнями у Kumar et al. (2020). У рослин *Camelina sativa* ці показники є вищими, ніж у дослідженнях Zahoor Ahmad. При тому цей самий показник у наших дослідженнях *Brassica napus* є дуже подібним на результат дослідження цієї рослини вищезгаданим автором (Ahmad, et al., 2021).

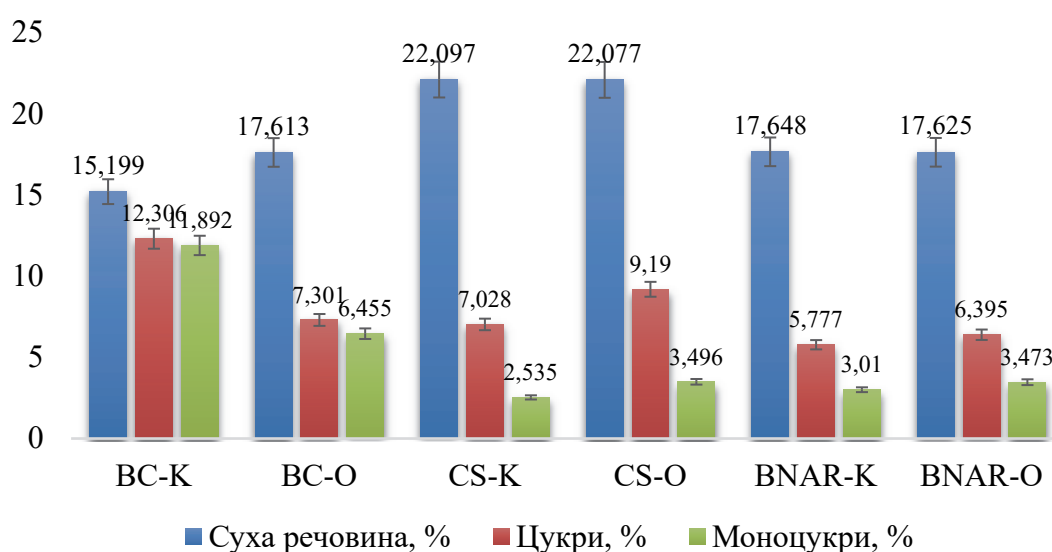


Рис. 6. 42. Загальний вміст цукрів, моноцукрів та сухої речовини залежно від фази розвитку рослин та варіанту дослідження (BC – *Brassica carinata* A. Braun, CS – *Camelina sativa* (L.) Crantz f. annua, cv. Peremoha, BNAR – *Brassica napus* f. annua D.C., cv. s. Rimal; K – контроль, O – внесення кремнієвмісних добрив)

Виявлено, що вміст органічних кислот у фітомасі *Camelina sativa* та *Brassica napus* зростає за внесення кремнієвмісних добрив, у *Brassica carinata* навпаки спостерігали зменшення рівня за цих же умов. Що стосується накопичення дубильних речовин, то їхній вміст зростає у *Brassica carinata* та *Camelina sativa* – у варіантах із внесенням добрив, і знижувався у *Brassica napus* (рис. 6. 43).

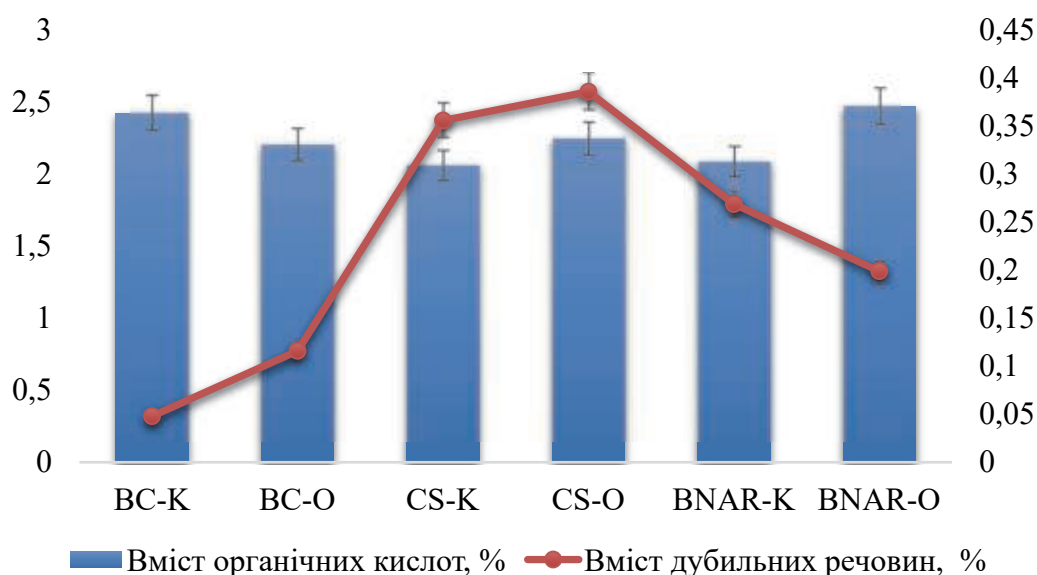


Рис. 6. 43. Загальний вміст органічних кислот та дубильних речовин залежно від фази розвитку рослин та варіанту досліді (BC – *Brassica carinata* A. Braun, CS – *Camelina sativa* (L.) Crantz f. annua, cv. Peremoha, BNAR – *Brassica napus* f. annua D.C., cv. s. Rimal; K – контроль, O – внесення кремнієвмісних добрив)

Показники вмісту дубильних речовин та органічних кислот *Camelina sativa*, отримані в результаті проведених дослідів, є співставними з аналогічними показниками інших дослідників (Juodka, et al., 2022).

З'ясовано, що кремнієвмісні добрива також суттєво підвищують накопичення аскорбінової кислоти у *Brassica carinata* та *Camelina sativa*, а у *Brassica napus* цей показник зменшується (рис. 6. 44). Аналіз наукових праць щодо накопичення аскорбінової кислоти дозволив виявити, що її вміст у рослин *Brassica carinata* вищий у наших умовах порівняно із отриманими даними (Hailemariam et al., 2020). Цю ж саму закономірність помічено також у рослин виду *Brassica napus* (Ahmad et al., 2021).

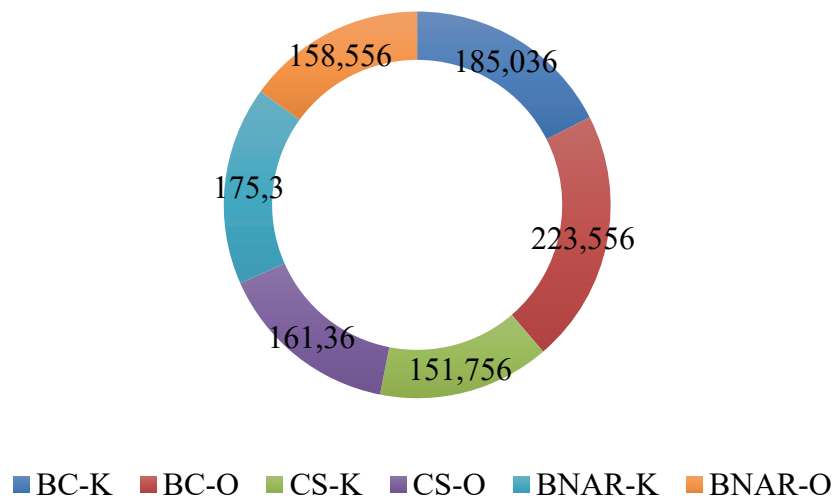


Рис. 6. 44. Загальний вміст аскорбінової кислоти залежно від фази розвитку рослин та варіанту досліджу (BC – *Brassica carinata* A. Braun, CS – *Camelina sativa* (L.) Crantz f. annua, cv. Peremoha, BNAR – *Brassica napus* f.annua D.C., cv. s. Rimal; K – контроль, O – внесення кремнієвмісних добрив)

З огляду на отримані вище наведені дані біохімічних досліджень надземної фітомаси можна зробити висновок, що кремнієвмісні добрива в цілому позитивно сприяють накопиченню структурно-функціональних та біологічно активних сполук у рослин *Brassica carinata*, *Camelina sativa* та *Brassica napus*. Тому їх можна в майбутньому використовувати для підвищення продуктивності культурфітоценозів цих представників.

За результатами проведених досліджень виявлено особливості зміни показників інтенсивності індукції флуоресценції хлорофілу у трьох різних видів рослин родини Brassicaceae (*Camelina sativa* Crantz f. annua, сорт Перемога, *Brassica carinata* A. Braun (ВФ-відібрана форма) та *Brassica napus* f. annua DC., сорт Rimal) за використання кремнієвмісних сполук.

Одним із найважливіших завдань сучасної біологічної науки (зокрема інтродукції, рослинництва, біотехнології, селекції тощо) є збільшення асортименту нових культур задля забезпечення продовольчої, біологічної, екологічної та енергетичної безпеки людства. Вирішення цього завдання

можна досягти шляхом найбільш повної мобілізації фізіологічних процесів у рослин за рахунок об'єктно-орієнтованої стратегії підбору технологічного регламенту їх вирощування (зокрема, добрив, гербіцидів, інсектицидів тощо). Сьогодні доведено, що нерозумне (неконтрольоване) застосування органічних та мінеральних добрив призводить до забруднення довкілля, порушення нормального функціонування агроєкосистем, зменшення врожаїв сільськогосподарських культур (Craswell, 2021; Ren et al., 2022). Ця проблема спонукає до пошуку не тільки оптимального дозування наявних на ринку добрив, але й розробки сучасних макро-, мікро- або нанодобрив (Chen et al., 2021; Astaneh et al., 2021).

Відомо, що мікродобрива сприяють оздоровленню ґрунтів, а також значно покращують фізіологічні процеси у рослин (Astaneh et al., 2021; Tao et al., 2021). Разом із тим, відмічено необхідність системного підходу до створення таких речовин, адже кожен рослинний організм (вид, форма, сорт) по-різному реагує на наявність того чи іншого елементу в агрофітоценозах (Astiari et al., 2019; Hanhur et al., 2021; Gorash et al., 2021; Xiong et al., 2021). Мікродобрива на основі кремнію сьогодні активно використовуються як універсальні препарати для кореневого та позакореневого підживлення олійних, зернобобових, злакових, овочевих та плодових культур. Але з огляду на останні дослідження виявлено, що кремнієвмісні сполуки досить вибірково впливають на фізіолого-біохімічний стан і продуктивність рослин, у тому числі представників родини капустяні (Brassicaceae).

Родина Brassicaceae є однією з найпоширеніших груп рослин, представники якої здавна культивуються та мають важливе економічне і господарське значення (Raza et al., 2020; Jabeen, 2020). Серед різноманіття відомих та широкоживаних культур цієї родини особливої уваги заслуговують *Camelina sativa* (L.) Crantz, *Brassica carinata* A. Braun та *Brassica napus* f. *annua* DC. як високопродуктивні олійні, цінні харчові, лікарські,

кормові, медоносні культури (Sydor et al., 2022; Seepaul et al., 2021; Blume et al., 2021; Raboanatahiry, et al., 2021). Незважаючи на різні центри походження (*B. carinata* – гірські райони Африки, *C. sativa* – Північна Європа та Південно-Східна Азія, *B. napus* f. *annua* – північно-західні райони Європи та Середземномор'я) в культурі ці види поширені майже по всіх континентах і використовуються людством багато тисячоліть (<https://www.gbif.org/uk>; Salehi et al., 2021). Вони є відмінним джерелом поживних речовин (вуглеводів, ліпідів, білків, вітамінів і мінералів) та біохімічних речовин, що сприяють зміцненню здоров'я (фенолів, флавоноїдів і глюкозинолатів), мають антимікробну, антизапальну, протионкологічну й антидіабетичну дію (Raza et al., 2020; Ayadi et al., 2022; Mandrich & Caputo, 2020). Завдяки високому вмісту олії у насінні (30–50%) представники родини Brassicaceae викликають значний інтерес у світі як джерело олії для створення лакофарбових покриттів, біодизелю, а також лікарських препаратів (Mandrich & Caputo, 2020; Alberghini et al., 2022; Hagos et al., 2020; Raj et al., 2022). Макуху, отриману після віджиму олії, використовують для годівлі тварин та виробництва біологічних добрив (Raj et al., 2022).

В умовах України рослини *C. sativa*, *B. carinata*, та *B. napus* f. *annua* виявили високу продуктивність і стійкість. Вони можуть бути перспективними олійними культурами за використання відповідних молекулярно-генетичних та біотехнологічних методів для створення цінних генотипів і сортів із заданими кількісними та якісними характеристиками олії. Зважаючи на високий адаптивний і продуктивний потенціал рослин *C. sativa*, *B. carinata*, та *B. napus* f. *annua*, а також враховуючи потреби вітчизняного енергетичного і продовольчого ринку, є необхідність у залученні до всебічних інтродукційних досліджень в умовах України широкого спектра генотипів цих рослин для введення їх у промислову культуру та розширення вітчизняної сировинної бази.

З огляду на аналіз вітчизняної і світової літератури, а також зібрану в Національному ботанічному саду імені М.М. Гришка НАН України унікальну за якісними та кількісними показниками генотипову колекцію рижію посівного (*Camelina sativa*), капусти (гірчиці) ефіопської (*Brassica carinata*), ріпаку (*Brassica napus*), сформувався важлива наукова мета – встановити закономірності проходження фізіолого-біохімічних процесів у сортів та сортозразків власної селекції на різних фазах розвитку рослин за впливу кремнієвмісних добрив.

Упродовж вегетаційного періоду (фази бутонізації, цвітіння, цвітіння–початок плодоношення, плодоношення, дозрівання насіння) проводили відбір рослинних зразків (*Camelina sativa* Crantz f. *annua*, сорт Перемога, *Brassica carinata* A. Braun (ВФ-відібрана форма) та *Brassica napus* f. *annua* DC., сорт Rimal) для фізіолого-біохімічних досліджень.

Численні функції кремнію в біології рослин, включно захист від абіотичних і біотичних стресів, надають рослинним організмам ряд переваг, пов'язаних із фізіологічними процесами формування їхньої продуктивності. На жаль, інформація щодо участі кремнію в структурно-функціональній організації системи ґрунт–рослина, його ролі в біології та екології представників родини Brassicaceae дуже обмежена. Тому особливої актуальності набувають дослідження, пов'язані з аналізом фізіолого-біохімічних процесів у рослин *Camelina sativa*, *Brassica carinata* та *Brassica napus* за впливу кремнієвмісного добрива.

Аналіз параметрів флуоресценції хлорофілу є потужним інструментом вивчення впливу найрізноманітніших екологічних чинників на рослинні організми (Seliutina et al., 2021; Rohacek & Bartak, 1999; Hrusha, 2015). Біотичні та абіотичні чинники часто є інгібіторами й активаторами біоенергетичних процесів, що протікають у клітинах рослин та мають виражений вплив на параметри кінетики і спектральні особливості

флуоресценції, а також на її стаціонарний рівень (Hrusha, 2015; Maxwell & Johnson, 2000). Метод індукції флуоресценції хлорофілу (ІФХ) дає змогу продемонструвати адаптаційні зміни фотосинтетичного апарату, які виникають у зв'язку з підвищенням рівня антропогенного навантаження (Maxwell & Johnson, 2000; Mazura et al., 2021).

Крива індукції флуоресценції хлорофілу відображає фізіологічний стан усього електронтранспортного ланцюга фотосинтезу та кінетику його різних частин. Як показано на рис. 6.45, інтенсивність індукції флуоресценції залежала від генотипових особливостей та внесення кремнієвмісного добрива.

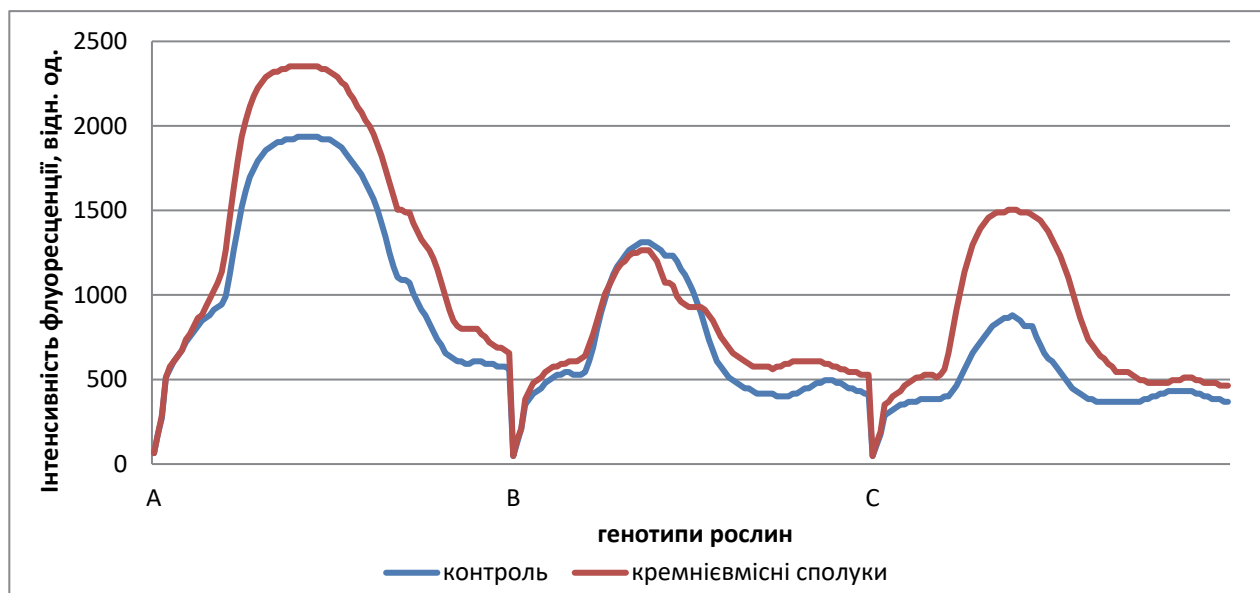


Рис. 6. 45. Інтенсивність індукції флуоресценції хлорофілу у рослин родини Brassicaceae: А – *Camelina sativa* Crantz f. *annua*, сорт Перемога, В – *Brassica carinata* A. Braun (ВФ-відібрана форма), С – *Brassica napus* f. *annua* DC., сорт Rimal залежно від генотипових особливостей та використання кремнієвмісного добрива (фаза цвітіння)

Рослини *C. sativa*, сорту Перемога і *B. carinata* (ВФ-відібрана форма) мали вищу ІФХ, що свідчить про високу активність фотосинтетичного апарату порівняно з *B. napus* сорту Rimal. У випадку наявності кремнію зафіксовано зростання F_m у *C. sativa* сорту Перемога та *B. napus* сорту Rimal, що свідчить про позитивний вплив кремнієвмісного добрива на формування та

функціонування хлоропластів. На фізіологічний стан рослин *B. carinata* спостерігався менший вплив кремнієвмісного добрива.

У фазі плодоношення в контролі і в подальшому спостерігали кращу ІФХ у рослин *C. sativa* сорту Перемога і *B. carinata* (ВФ-відібрана форма) – порівняно з рослинами *B. napus* сорту Rimal. Використання кремнієвмісного добрива позитивно впливало на фізіологічний стан рослин *B. napus* сорту Rimal (рис. 6. 46).



Рис. 6. 46. Інтенсивність індукції флуоресценції хлорофілу у рослин родини Brassicaceae: А – *Camelina sativa* Crantz f. *annua*, сорт Перемога, В – *Brassica carinata* A. Braun (ВФ-відібрана форма), С – *Brassica napus* f. *annua* DC., сорт Rimal залежно від генотипових особливостей та використання кремнієвмісного добрива (фаза плодоношення)

На даній фазі розвитку рослин встановлено вирівнювання цих показників у *C. sativa* сорту Перемога, що може свідчити про стійку діяльність фотосинтетичного апарату, а у *B. carinata* (ВФ-відібрана форма) спостерігалось зростання ІФХ за використання кремнію.

Таким чином, дослідження інтенсивності індукції флуоресценції хлорофілу у рослин трьох культур родини Brassicaceae (*Camelina sativa* Crantz f. *annua*, сорт Перемога, *Brassica carinata* A. Braun (ВФ-відібрана форма) та *Brassica napus* f. *annua* DC., сорт Rimal) виявили, що використання кремнієвмісних добрив по-різному впливає на проходження фізіолого-біохімічних процесів в

організмі. Найбільш сприятливий вплив кремнію простежувався у *Brassica napus* f. *annua* DC. сорту Rimal, для решти культур використання цього добрива спричиняло чутливість до стресових чинників довкілля, що відображалось в різкій відмінності накопичення окремих біологічно активних сполук у надземній масі упродовж вегетаційного періоду (Рахметов та ін., 2024).

Аналіз кривих індукції флуоресценції хлорофілу з'ясував, що рослини *C. sativa* сорту Перемога, *B. carinata* (ВФ-відібрана форма) характеризуються кращою роботою фотосинтетичного апарату порівняно з *B. napus* сорту Rimal. Показано значний позитивний вплив кремнію на фізіологічний стан рослин *B. napus* сорту Rimal. Дещо менший ефект кремнієвмісного добрива зафіксовано для рослин *C. sativa* сорту Перемога і *B. carinata* (ВФ-відібрана форма).

За результатами проведених досліджень виявлено особливості зміни показників інтенсивності індукції флуоресценції хлорофілу в трьох різних видів рослин родини Brassicaceae (*Camelina sativa* Crantz f. *annua*, сорт Перемога, *Brassica carinata* A. Braun (ВФ-відібрана форма) та *Brassica napus* f. *annua* DC., сорт Rimal) за використання кремнієвмісних сполук. Встановлено, що найбільш сприятливий вплив кремнієвмісних сполук простежувався у *Brassica napus* f. *annua* DC. сорту Rimal, для решти видів використання цих сполук спричиняло чутливість до стресових чинників довкілля, що виявлялося у різкій відмінності накопичення окремих біологічно активних сполук у надземній масі впродовж вегетаційного періоду. У всіх досліджуваних зразків у цілому відмічено покращення роботи фотосинтетичного апарату, разом із максимальним проявом для рослин *B. napus* f. *annua* DC. сорту Rimal за використання мікродобрив.

РОЗДІЛ 7.

НАУКОВО-МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ПОЛІПШЕННЯ БІОТРОФНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ҐРУНТУ ТА БЕЗВІДХОДНОЇ УТИЛІЗАЦІЇ ПОБІЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ

Зміна кліматичних умов і зростання чисельності населення становлять велику загрозу для продуктивності сільськогосподарських культур у всьому світі. Ризосферна зона рослин містить корисні мікроорганізми, які допомагають рослинам протистояти стресовим умовам та імпровізувати поглинання поживних речовин. Відомо, що взаємодія рослин і мікробів покращує агрофізичний стан ґрунту, підвищує його родючість, водоутримуючу спроможність і поглинання поживних речовин рослинами (Puranik et al., 2023).

Біотрофія стосується тісних, часто мутуалістичних відносин між рослиною та мікроорганізмом, при яких мікроорганізм отримує поживні речовини від рослини-господаря. У свою чергу, мікроорганізм забезпечує рослину необхідними поживними речовинами, мінералами або водою. Взаємодії рослин і мікроорганізмів можуть набувати різних форм, але деякі з найбільш відомих прикладів включають мікоризний симбіоз, фіксацію азоту та фіторемедіацію. Кожен тип взаємодії приносить унікальні переваги як рослині, так і мікроорганізму. Наприклад, мікоризний симбіоз допомагає рослинам засвоювати необхідні поживні речовини, такі як фосфор, а також забезпечує гриби джерелом вуглеводів. Азотфіксуючі бактерії, з іншого боку, стимулюють ріст рослин, забезпечують їх азотними сполуками. Фіторемедіація – це взаємодія рослин та мікроорганізмів, що включає використання рослин для видалення забруднювачів із ґрунту або води. Цей тип взаємодії рослин і мікроорганізмів корисний, оскільки допомагає очищувати забруднене середовище без використання шкідливих хімікатів.

Існує безліч інших типів взаємодії рослин та мікроорганізмів, кожен із яких має свої унікальні переваги.

Взаємодія рослин та мікроорганізмів необхідна для стимуляції розвитку як рослин, так і мікроорганізмів. Мікроорганізми забезпечують рослини необхідними поживними речовинами, а рослини є джерелом існування для мікроорганізмів. В останні роки зростає інтерес до біотрофних досліджень, які дозволяють потенційно підвищити врожайність сільськогосподарських культур у всьому світі. Дослідники досягають прогресу в розумінні того, яким чином можна використовувати взаємодію рослин та мікроорганізмів для покращення їхнього росту і продуктивності. Наприклад, маніпулюючи мікроорганізмами сільськогосподарських культур, фермери потенційно спроможні підвищити врожайність і скоротити втрати врожаю через шкідників та хвороби. Одночасно науковці працюють над розробкою інокулянтів на основі мікроорганізмів, які можна використовувати для покращення живлення рослин і підвищення їх стійкості до посухи.

Заселення суші рослинами близько 400 мільйонів років тому було пов'язане з колонізацією їх примітивних коренів ґрунтовими нитчастими грибами (Nicolson, 1975; Simon et al., 1993; Taylor et al., 1995). Сьогодні від 90% до 95% наземних рослин все ще зберігають певний тип мікоризної асоціації, так що мікориза, а не коріння, є головним органом поглинання поживних речовин наземними рослинами (Smith and Read, 2000). Деякі біотрофи надають переваги своїм господарям і вважаються мутуалістами. Мікоризні гриби підтримують наземні екосистеми за допомогою мутуалізму з корінням, до них відносяться ектомікоризи, переважно на деревах, арбускулярні мікоризи на більшості рослин і ерикаційні мікоризи на рослинах, що ростуть на бідних поживними речовинами ґрунтах.

З мікоризних симбіонтів найпоширенішою є арбускулярна мікориза. Арбускулярні мікоризні гриби – багатофункціональні симбіонти, екологічно

важливі для більш ніж 80% наземних рослин, які формують кореневі асоціації з цими грибами (Kim et al., 2022). Арбускулярна мікориза взаємодіє з різноманітними рослинами-господарями (разом із покритонасінними, голонасінними, крилоподібними, а також деякими мохами, плауноподібними та псиловитими) і порівняно невеликою групою асептичних нитчастих грибів порядку *Glomales* (Bago et al., 2000). Як рослина, так і гриб отримують поживну користь в арбускулярному мікоризному симбіозі: рослина-господар покращує поглинання мінералів, а гриб отримує фіксований вуглець. У цьому обміні поглинання, метаболізм і транслокація вуглецю мікоризою вивчені недостатньо. Таким чином, дослідження арбускулярних мікоризних грибів має принципове і практичне значення. По-перше тому, що в більшості середовищ «коренева біологія» насправді є «біологією мікоризи», а по-друге, через практичну важливість арбускулярної мікоризи у таких різноманітних сферах, як стале сільське господарство, садівництво, лісовідновлення та екосистемне управління (Bethlenfalvay and Schuepp, 1994; Barea and Jeffries, 1995).

Облігатна біотрофна природа арбускулярних мікоризних грибів давно визнана (Azcon-Aguilar et al., 1999), хоча її абсолютна поява у природних умовах ніколи не була доведена. Сапрофітну здатність арбускулярних мікоризних грибів оцінювали на підставі спостережень за тривалим незалежним ростом цих грибів *in vitro* (Hepper, 1983; Mosse, 1988; Strullu et al., 1997; Azcon-Aguilar et al., 1999), але всі спроби культивування цих організмів у асептичних умовах були невдалими. Важливим питанням як на фундаментальний, так і прикладний погляд, є з'ясування причин того, що робить арбускулярні мікоризні гриби облігатними ендосимбіонтами. З одного боку, оскільки симбіоз арбускулярної мікоризи є спадковою асоціацією рослина-гриб (Simon et al., 1993), з'ясування клітинних і молекулярних механізмів, які лежать в основі облігатної біотрофії грибного партнера, передбачає розуміння інших біотрофних відносин між рослинами

та мікроорганізмами. З іншого боку, це пояснення є необхідною умовою для кращого використання арбускулярної мікоризи. Зокрема, залежно від обставин, мікотрофну роль рослини доречно мінімізувати для підвищення продуктивності рослин, або, навпаки, штучно інтенсифікувати розвиток грибів та синтез інокулята. Можна припустити, що розуміння облігатної біотрофності арбускулярних мікоризних грибів дозволить вирощувати ці організми у чистій культурі.

С. Herper (1987) звернув увагу на три аспекти, розглядаючи питання щодо біотрофності арбускулярних мікоризних грибів: 1) харчування, оскільки ріст гриба може залежати від певних поживних речовин, що постачаються господарем, 2) фізичні аспекти, оскільки деякі умови росту *in vivo* можуть бути необхідними для росту *in vitro* і 3) генетика, оскільки гриб може втратити частину свого генетичного потенціалу. Останні дані, отримані на більш ретельному вивченні росту грибів під час пресимбіотичної стадії, а також С-метаболізму гриба під час стадій ізолюваного існування в умовах симбіозу, надали непрямі докази того, що гриб повинен тісно взаємодіяти зі своїм господарем для того, щоб повністю проявити свій генетичний потенціал. Наприклад, екстрарадикальний міцелій *Glomus intraradices* Smith & Schenck утворює розгалужені поглинаючі структури одразу після проникнення гриба у корінь господаря *Lycopersicum esculentum* Mill. для симбіотичної взаємодії (Bago et al., 1998). Коли життя рослини-господаря закінчується, кінцева консервативна форма гриба – у вигляді спор – чекає на створення симбіотичної асоціації з новим господарем. Спори у більшості арбускулярних мікоризних грибів у стані спокою можуть спонтанно проростати у воді та за відсутності кореня-господаря (асимбіотичний ріст) за відповідних абіотичних умов. Іноді проростання можна значно покращити за допомогою атмосфери, збагаченої CO₂, або попередньої інкубаційної обробки при низькій температурі. Багато арбускулярних мікоризних грибів

також продукують внутрішньорадикальні везикули, які можуть служити структурами збереження та розмноження, але фізіологія цих везикул, на жаль, не досліджена (Bago and Bécard, 1998).

S. Smith і D. Read (2010) після аналізу ізотопно мічених субстратів у арбускулярній мікоризі *Daucus carota*, колонізованої *G. intraradices*, дійшли висновку, що: 1) мічені C^{13} глюкоза та фруктоза (але не маніт або сукцинат) ефективно поглинаються грибом у корені та метаболізуються з утворенням мічених вуглеводів і ліпідів, 2) екстрарадикальний міцелій не використовує екзогенні цукри для катаболізму, зберігання або передачі до господаря, 3) гриб перетворює цукри, що поглинаються коренем, на ліпіди, які потім переміщуються до екстрарадикального міцелію, 4) гексоза у гриба значно активніша через окислювальний пентозофосфатний шлях, ніж гексоза рослини-господаря.

Біотрофні гриби, взаємодіючи з рослинами, встановлюють довгострокові відносини зі своїми господарями для життєдіяльності. На відміну від некротрофів, їм доводиться боротися із захисними механізмами рослини, аби розвиватися всередині господаря та харчуватися живими клітинами. Вважається, що мікробні патогени продукують і транспортують міріади ефektorних білків для захоплення клітинної програми своїх господарів (Klorppholz et al., 1999). Дані, отримані G. Smith та іншими, свідчать про те, що здатність до факультативних біотрофних відносин у вільноживучих сапротрофних базидіоміцетів може бути більшою, ніж передбачалося раніше. Ці особливості свідчать про активний функціональний симбіоз між грибом і рослиною (Smith et al., 2017).

Щоб використовувати рослини як живі субстрати, біотрофні гриби розвинули специфічні варіації своїх трубчастих клітин – гіфи. Вони утворюють інфекційні структури, такі як аппресорії, гіфи проникнення та гіфи інфекції, для вторгнення у рослину з мінімальним пошкодженням клітин господаря.

Для встановлення сумісності з господарем необхідна контрольована секреторна активність та чіткі рівні інтерфейсу. Наприклад, види *Colletotrichum* переходять від початкового біотрофного до некротрофного росту, а облігатні біотрофні іржаві гриби можуть утворювати найбільш спеціалізовану гіфу – гаусторій. Експресія генів та імуноцитологічні дослідження з іржавими грибами підтверджують ідею про те, що гаусторій є апаратом для тривалого поглинання поживних речовин господаря (Bécard et al., 1990).

Рослини та гриби мають багаторічну конкуренцію за ресурси та якість життя. У результаті різноманітні патосистеми розвинули численні стратегії в поєднанні з появою мультиваріантного патогенного і сапрофітного способу життя. М. Kabbage та інші при дослідженні фізіологічних реакцій для переходу від біотрофії до некротрофії у симбіотрофів, роблять висновок, що як контроль імунних реакцій рослин, так і потреба у більш ефективному способі засвоєння поживних речовин є можливими тригерами переходу до некротрофії (Kabbage et al., 2015).

Відомо, що фенольні сполуки – це індуктори генів вірулентності у взаємодіях між рослинами та патогенами, наприклад, за участю *Agrobacterium*, а флавоноїди, як відомо, є індукторами або інгібіторами генів Nod у симбіозі *Rhizobium* та бобових. Останні дослідження показують, що деякі з цих сполук слугують молекулярними сигналами у розвитку везикулярно-арбускулярної мікоризи. Вважається, що сполуки всередині кореня та вивільнені коренем, такі як флавоноїди, відіграють певну роль у цій комунікації рослин і грибів, як це вже було продемонстровано в інших симбіотичних асоціаціях (наприклад, *Rhizobium-Leguminosae*) (Vierheilig et al., 1998). Також існують свідчення, що на ріст гіф везикулярно-арбускулярної мікоризи гриба *Gigaspora margarita* Becker & Hall, впливають як стимулюючі, так і інгібуючі флавоноїди разом на тлі оптимального рівня CO₂. Усі стимулюючі сполуки були флавонолами (кемпферол, кверцетин і морін) і мали принаймні одну

гідроксильну групу в кільці В. Навпаки, два ізофлавонони (біоханін А та геністеїн), один флаванон (гесперетин) і дві сполуки без будь-якої гідроксильної групи в кільці В, галангін (флавонол) і хризин (флавонол), були інгібіторами розвитку гіф (Chabot et al., 1992).

Крім того, останнім часом з'являється все більше доказів того, що кореневі ендоефітні асоціації, які через свою непомітну природу доволі часто ігноруються, можуть мати мутуалістичний характер і відігравати важливу роль у природному та штучному середовищі. Нещодавні дослідження біології та геноміки корневих асоціацій виявили захоплююче розуміння фенотипової і трофічної пластичності цих грибів та підкреслили геномні ознаки, пов'язані з біотрофією і сапротрофією (Zuccaro et al., 2014). Особливе значення на даний час мають дослідження ендоефітів трав, що передаються вертикально, захищають своїх господарів від комах і трав'яїдних тварин, харчуються за допомогою токсичних вторинних метаболітів (Watkinson, 2016).

Майбутнє вивчення біотрофічних взаємодій дуже перспективне, оскільки результати цієї роботи безпосередньо вплинуть на сільське господарство. Завдяки подальшим дослідженням передбачається розробка більш ефективних та стійких методів ведення сільського господарства, які покращать урожайність і зменшать потребу у хімічних речовинах. Це принесе користь як сільському господарству, так і навколишньому середовищу. Крім того, біотрофічні дослідження можуть також призвести до розробки нових продуктів, таких як добрива та пестициди, які будуть більш ефективними та екологічно чистими. Майбутнє дослідження біотрофічних взаємодій є багатообіцяючим і є ключем до поліпшення здоров'я рослин і людей. Зрештою, біотрофічні дослідження можуть здійснити революцію у сільському господарстві та допомогти прогодувати зростаюче населення світу.

Матеріали і методи. Зразки ґрунту відбирали у ювенільній фазі, бутонізації-цвітіння та плодоношення рослин ріжю, гірчиці та ріпаку. Контролем слугував ґрунт за межами дослідних ділянок.

Алелопатичний аналіз ґрунту здійснювали методом прямого біотестування з використанням проростків крес-салату (*Lepidium sativum* L.) та амаранту (*Amaranthus paniculatus* L.) як тест-об'єктів (Сучасні методи ..., 2021).

Алелопатичну активність гідрофільних сполук ґрунту вивчали методом біологічних проб за допомогою проростків огірка (*Cucumis sativus* L.) як рослини-акцептора (Сучасні методи..., 2021). Цитостатичну дію гідрофільних сполук ґрунту досліджували шляхом підрахунку кількості бічних коренів проростків *C. sativus* (Сучасні методи..., 2021).

Фенольні речовини виділяли з ґрунту методом іонного обміну (десорбції), використовуючи іонообмінник КУ-2-8 (H⁺) як модель кореневої системи з розчинюючою і поглинальною здатністю стосовно рухливих органічних сполук (Сучасні методи ..., 2021).

Окисно-відновний потенціал (ОВП, редокс-потенціал) визначали потенціометричним методом у суспензії, яка моделює ґрунтовий розчин при співвідношенні ґрунту до дистильованої води 1:1 (Fiedler et al., 2007; Labuda, Vetchinnikov, 2011).

Вміст біогенних елементів у рослинних тканинах і ґрунті аналізували за методикою Г.Я. Рінкиса і В.Ф. Ноллендорфа на оптичному емісійному спектрометрі з індуковано зв'язаною плазмою ICAP 6300 DUO (Сучасні методи..., 2021).

Мікробіологічні дослідження здійснювали методом посіву ґрунтових суспензій у відповідних розведеннях на селективні агаризовані живильні середовища згідно із загальноприйнятими у мікробіології методиками (Сучасні методи..., 2021; Радченко та ін., 2011; Андреюк та ін., 2001). Мікроміцети враховували на середовищі Чапека, актиноміцети – на крохмаль-

аміачному агарі (КАА), амоніфікатори – на м'ясо-пептонному агарі (МПА), мікроорганізми, що споживають переважно мінеральні сполуки азоту – на КАА.

Вміст фотосинтетичних пігментів (хлорофілів і каротиноїдів) в листках рослин визначали спектрофотометрично на приладі Specord 2000 (Analytic Jena, 2003 р.). Виміри проводили при довжинах хвиль 644 нм (хлорофіл *a*), 662 нм (хлорофіл *b*) і 440 нм (каротиноїди) згідно (Wellburn, 1994). Екстракцію пігментів здійснювали DMSO (диметилсульфоксид) протягом 4 годин у термостаті за температури 70°C згідно методики (Hiscox & Israelstam, 1979).

Флавоноїди екстрагували 70%-ним етанолом зі свіжозібраних листків упродовж доби в холодильнику. Кількісний вміст флавоноїдів визначали спектрофотометрично на приладі Specord 2000 (Analytic Jena, 2003 р.) за довжини хвилі 410 нм застосовуючи якісну реакцію з 2%-ним розчином $AlCl_3$ у 98%-ному етанолі (Сучасні методи ..., 2021). Антоціани екстрагували 96%-ним етиловим спиртом з 1%-ним вмістом хлористо-водневої кислоти. Кількісний вміст визначали спектрофотометрично на приладі Specord 2000 (Analytic Jena, 2003 р.) за довжини хвилі 546 нм (Сучасні методи ..., 2021). Таніни екстрагували киплячою дистильованою водою з наступним настоюванням на водяній бані протягом години. Кількісний вміст визначали шляхом титрування 0,1% розчином перманганату калію суміші відфільтрованого екстракту з індигокарміном (Мардар та ін., 2008).

Для аналізу ендогенних брасиностероїдів проводили екстракцію з рослинних зразків в два етапи: перший етилацетат (3 рази по 5 мл) з водної витяжки тканин (1 г тканини + 5 мл екстракції розчину). Фракцію з етилацетатом упарювали у вакуумі і екстрагували залишок циклогексаном (5мл). Другий етап екстракції проводили сумішшю етанол:вода (4:1). Екстракт етанолу упарювали у вакуумі, залишок розчиняли в невеликій кількості

етилацетату. Виміри вмісту брасиноїдів проводили на спектрофотометрі при довжині хвилі 450 нм (Kravets et al., 2011).

Науково-методичні засади поліпшення біотрофних властивостей ґрунту. Внесення кремнієвмісного добрива позитивно позначилось на показниках активності лакази та кількісних показниках лабільних форм Гумусу (табл. 7.1).

Таблиця 7.1

Вміст лабільних форм Гумусу та активності
лакази ґрунту за внесення кремнієвмісного добрива

Культура	Варіант досліджу	Лабільні форми Гумусу, %	Активність лакази, mU/г ґрунту
Ювенільна фаза розвитку			
Рижій	КС	5,27	107,58
	К	5,08	96,45
Гірчиця	КС	5,11	108,56
	К	4,83	101,38
Ріпак	КС	5,34	113,78
	К	4,61	104,32
Фаза бутонізації-цвітіння			
Рижій	КС	5,01	101,50
	К	4,72	85,88
Гірчиця	КС	4,85	103,41
	К	4,51	93,24
Ріпак	КС	5,07	107,25
	К	4,81	75,79
Фаза плодоношення			
Рижій	КС	4,58	95,76
	К	4,06	79,34
Гірчиця	КС	4,63	98,57
	К	4,15	86,55
Ріпак	КС	4,84	100,23
	К	4,27	88,31

Примітка: КС – кремнієвмісне добриво,

К – контроль

Необхідно зауважити, що найвищий рівень Гумусу зафіксовано у варіантах з кремнієвмісним добривом за вирощування ріпаку, що пов'язано, на нашу думку, з найвищою активністю лакази та депонуванням Карбону в результаті азотфіксації. Крім того, контрольна ділянка ґрунту, на якій були відсутні дослідні рослини, відрізнялась дуже низькими показниками, зокрема: вміст лабільних форм Гумусу впродовж вегетації рослин був у межах 2,1-3,1%, а активність лакази відповідно – 85,67 – 92,34 mU/г ґрунту.

Максимальний вміст органічної речовини простежувався на початку вегетаційного періоду рослин. Ці результати узгоджуються з даними, отриманими при визначенні лакази. У подальшому спостерігається поступове зменшення кількісних параметрів лабільних форм Гумусу за рахунок утворення стабільних форм, про що свідчить зниження як активності лакази, так і концентрації HCO_3 . Зростання рівня HCO_3 у фазі бутонізації – цвітіння пояснюється підвищенням температури повітря та активізацією розвитку ґрунтових мікроорганізмів, особливо мікроміцетів, задіяних в синтезі лакази і деструкції лігніну (табл. 7.2).

Таблиця 7.2

Вплив кремнієвмісного добрива на показники електропровідності та концентрації HCO_3

Культура	Варіант досліду	HCO_3 , мг-екв/л H_2O	Електропровідність $\mu\text{S}/\text{cm}$
1	2	3	4
Ювенільна фаза розвитку			
Рижій	КС	0,27	456
	К	0,32	184
Гірчиця	КС	0,24	179
	К	0,31	146
Ріпак	КС	0,16	172
	К	0,25	138
Фаза бутонізації-цвітіння			
Рижій	КС	1,15	185
	К	1,36	140
Гірчиця	КС	0,26	164
	К	0,38	118

1	2	3	4
Ріпак	КС	0,21	132
	К	0,33	105
Фаза плодоношення			
Рижій	КС	0,22	200
	К	0,28	141
Гірчиця	КС	0,40	312
	К	0,56	183
Ріпак	КС	0,21	147
	К	0,25	118

Оцінка чисельності таксономічних і функціональних груп мікроорганізмів прикореневого ґрунту досліджуваних видів рослин, а також спрямованість процесів мінералізації/іммобілізації органічної речовини засвідчила зростання кількісних параметрів мікроміцетів за внесення кремнієвмісного добрива (рис. 7. 1).

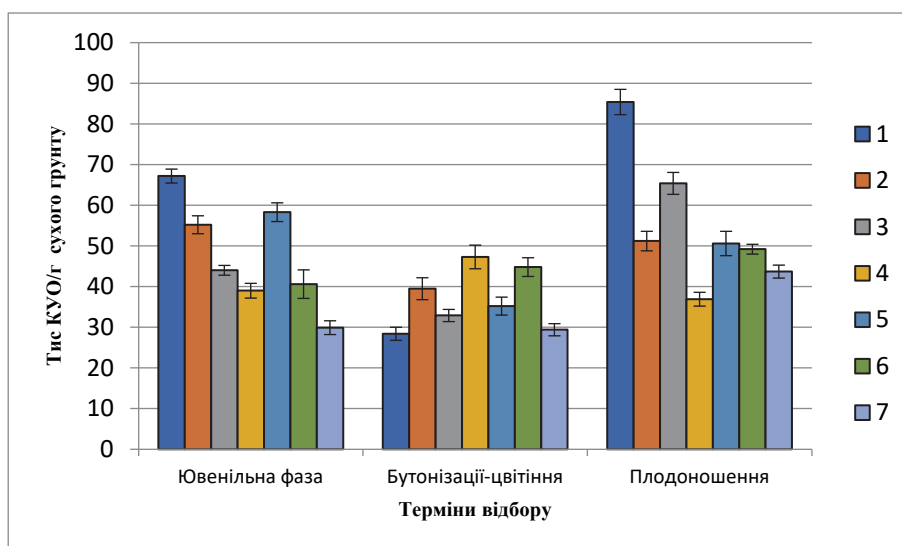


Рис. 7. 1. Чисельність мікроміцетів у ґрунті під культурами за внесення кремнієвмісного добрива:

1 – рижій + кремній; 2 – рижій, контроль; 3 – гірчиця + кремній; 4 – гірчиця, контроль; 5 – ріпак + кремній; 6 – ріпак, контроль; 7 – контроль ґрунту

Різниця порівняно з контролем складала 21,7 %, 12,8 % та 43,6 % під рижієм, гірчицею та ріпаком відповідно.

У фазі бутонізації-цвітіння зафіксовано, навпаки, зменшення чисельності мікроміцетів у дослідних варіантах, зокрема різниця складала від

20,4 до 30%. Кількісні показники мікроміцетів у фазі плодоношення переважали у дослідних зразках із додаванням кремнію, особливо для ріжю та гірчиці, і становили 66,7 % та 77,2 % відповідно.

Мікроорганізми групи актиноміцетів найкраще розвивались у ґрунті упродовж усього періоду вегетації культур із додаванням кремнієвмісного добрива (рис. 7. 2).

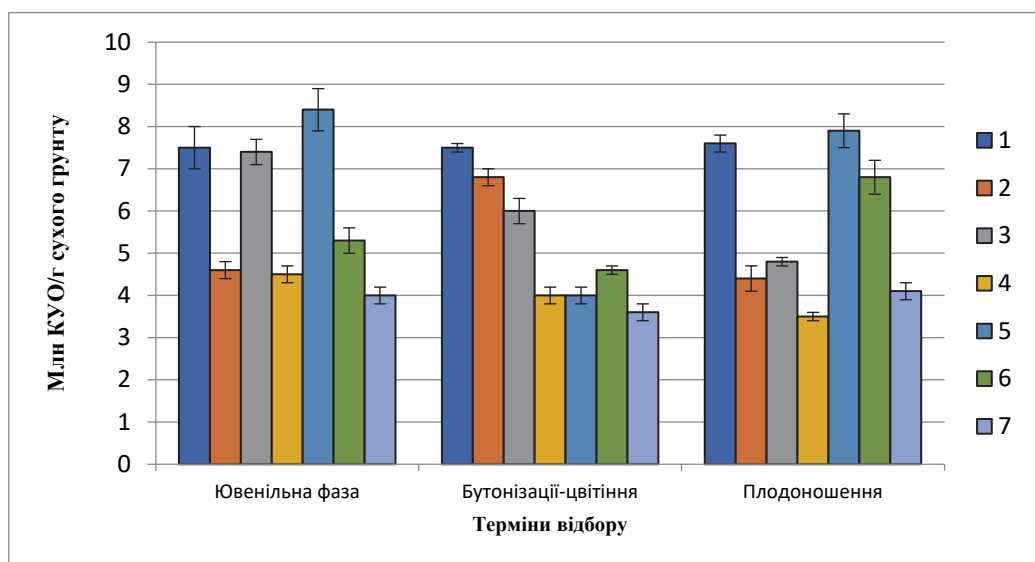


Рис. 7. 2. Чисельність актиноміцетів у прикореневому ґрунті за внесення кремнієвмісного добрива:

1 – ріжій+кремній, 2 – ріжій, контроль, 3 – гірчиця+кремній, 4 – гірчиця, контроль, 5 – ріпак+кремній, 6 – ріпак, контроль, 7 – контроль ґрунту

Їхню найбільшу чисельність виявлено у ґрунті дослідних варіантів ріжю і ріпаку на початку вегетації та у фазі цвітіння у зразках гірчиці й ріпаку. Необхідно зауважити, що різниця в чисельності між дослідними та контрольними варіантами для гірчиці зростала впродовж вегетації на 14,2 – 63,6 – 166,6 % відповідно.

Амоніфікатори здійснюють деструкцію органічних сполук, які надходять у ґрунт з корневими виділеннями або рослинними рештками. Чисельність мікроорганізмів цієї групи у дослідних зразках перевищувала контрольні варіанти (рис. 7. 3). На початку вегетації збільшення чисельності амоніфікаторів встановлено у ґрунтових зразках з-під ріжю, гірчиці та ріпаку

на 58,5-63,0-64,4 % відповідно. Гетеротрофні мікроорганізми переважають у дослідних ґрунтових зразках гірчиці на 64,4-50,0-37,1 % упродовж вегетації.

Мікроорганізми, які споживають мінеральний азот, також відрізнялись кращим розвитком у ґрунті всіх дослідних культур у ювенільній фазі та у фазі плодоношення (рис. 7. 4).

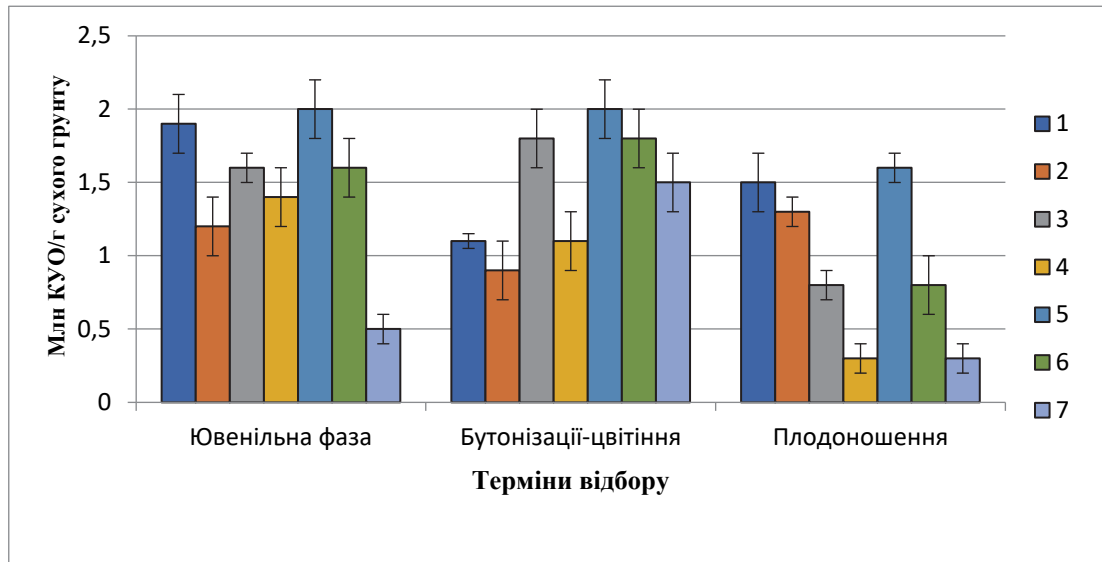


Рис. 7. 3. Чисельність амоніфікаторів у прикореневому ґрунті за внесення кремнієвмісного добрива:
1 – ріжій+кремній, 2 – ріжій, контроль, 3 – гірчиця+кремній, 4 – гірчиця, контроль, 5 – ріпак+кремній, 6 – ріпак, контроль, 7 – контроль ґрунту

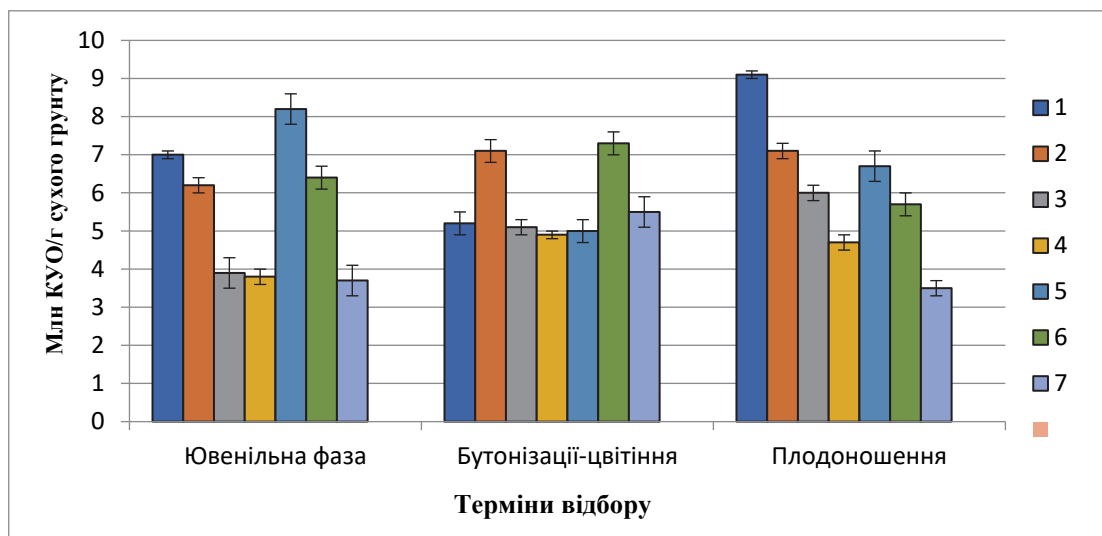


Рис. 7. 4. Чисельність мікроорганізмів, що споживають мінеральний азот у прикореневому ґрунті за внесення кремнієвмісного добрива:
1 – ріжій+кремній, 2 – ріжій, контроль, 3 – гірчиця+кремній, 4 – гірчиця, контроль, 5 – ріпак+кремній, 6 – ріпак, контроль, 7 – контроль ґрунту

У фазі бутонізації-цвітіння найвищий відсоток їхньої чисельності зафіксовано для зразків ґрунту під гірчицею, тоді як у зразках рижію та ріпаку чисельність мікроорганізмів, іммобілізаторів мінерального азоту, зменшувалась.

У контрольному варіанті ґрунту, що не зазнав впливу дослідних рослин, виявилось менша чисельність усіх досліджуваних груп мікроорганізмів упродовж вегетації.

Співвідношення окремих показників чисельності трофічних груп мікроорганізмів дозволяє визначити спрямованість мікробіологічних процесів мінералізації-іммобілізації органічної речовини ґрунту. Значення коефіцієнтів мінералізації у дослідних зразках усіх експериментальних культур упродовж вегетації виявились меншими за контрольні, що свідчить про переважання процесів накопичення органічної речовини (табл. 7. 3). Процеси мінералізації найактивніше відбувались у зразках ґрунту рижію (ювенільна фаза та фаза плодоношення) та ріпаку (фаза бутонізації-цвітіння) без внесення кремнію.

Таблиця 7. 3

Спрямованість мікробіологічних процесів
мінералізації/ іммобілізації органічної речовини ґрунту

Варіант досліджу	Коефіцієнт мінералізації-іммобілізації		
	ювенільна фаза	бутонізація-цвітіння	плодоношення
Рижій + кремній	0,9	0,69	1,2
Рижій, контроль	1,3	1,0	1,6
Гірчиця + кремній	0,5	0,8	1,2
Гірчиця, контроль	0,8	1,2	1,3
Ріпак + кремній	0,9	1,2	0,8
Ріпак, контроль	1,2	1,5	0,8
Контроль ґрунту	0,9	1,5	0,9

Накопичення органічних речовин переважало у дослідних варіантах, найбільше – під гірчицею та ріжієм, що свідчить про позитивний вплив внесення кремнієвмісного добрива.

Отже, мікробіологічний моніторинг ґрунту дослідних культур за присутності сполук кремнію засвідчує збагачення чисельності мікроорганізмів у більшості дослідних варіантів. Виключенням стала чисельність мікроміцетів у фазі бутонізації-цвітіння, а також аммоніфікаторів у ґрунті під ріжієм та ріпаком. Процеси перетворення органічної речовини у зразках ґрунту за внесення кремнію переважно були спрямовані на її накопичення порівняно з контрольними варіантами.

Методом прямого біотестування ґрунту по відношенню до проростків крес-салату показано наявність органічних сполук з алелопатичними властивостями під усіма досліджуваними культурами, причому додавання кремнію сприяло зниженню їхньої фітотоксичності на 6-25 % залежно від фази вегетації.

Алелопатична активність ґрунту як із додаванням кремнію, так і без нього підвищувалася упродовж вегетації, що очевидно є наслідком акумуляції рослинних екзометаболітів. Проте алелопатична напруженість ґрунту була нижчою за внесення кремнієвмісного добрива. Максимальне послаблення алелопатичної активності при внесенні кремнію спостерігалось в кінці вегетації під рослинами ріжію та ріпаку, на 20 % та 25 % відповідно (рис. 7.5). У той же час, у ювенільній фазі розбіжності у алелопатичних властивостях ґрунту з додаванням кремнію та за відсутності останнього були мінімальними.

На відміну від крес-салату для амаранту як рослини-акцептора була притаманна вища чутливість до кремнію, що виявлялося в більшій інтенсифікації ростових процесів за його внесення на всіх фазах розвитку досліджуваних культур (рис. 7. 6). При цьому, найбільше зниження алело-

патичної активності на тлі кремнію встановлено у фазі бутонізації-цвітіння (на 27 %) та плодоношення (21 %) для гірчиці, а також для ріпаку в кінці вегетаційного періоду (на 25 %).

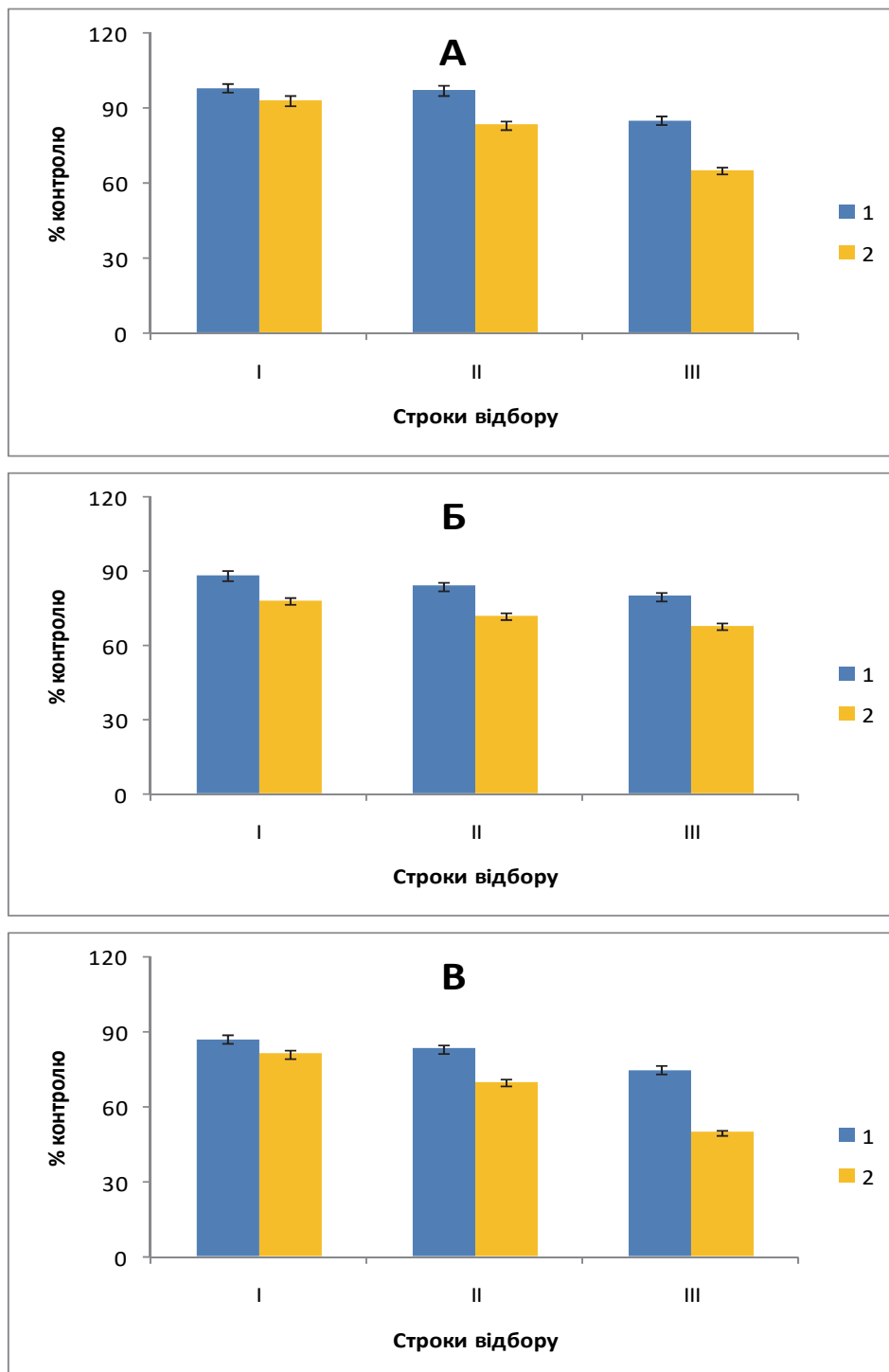


Рис. 7.5. Алелопатична активність ґрунту з-під ріжю (А), гірчиці (Б) й ріпаку (В) (біотест – приріст коренів *Lepidium sativum*), % контролю (за межами ділянки): 1 – ґрунт + кремній; 2 – ґрунт без кремнію.
I – ювенільна фаза; II – бутонізація-цвітіння; III – плодоношення.

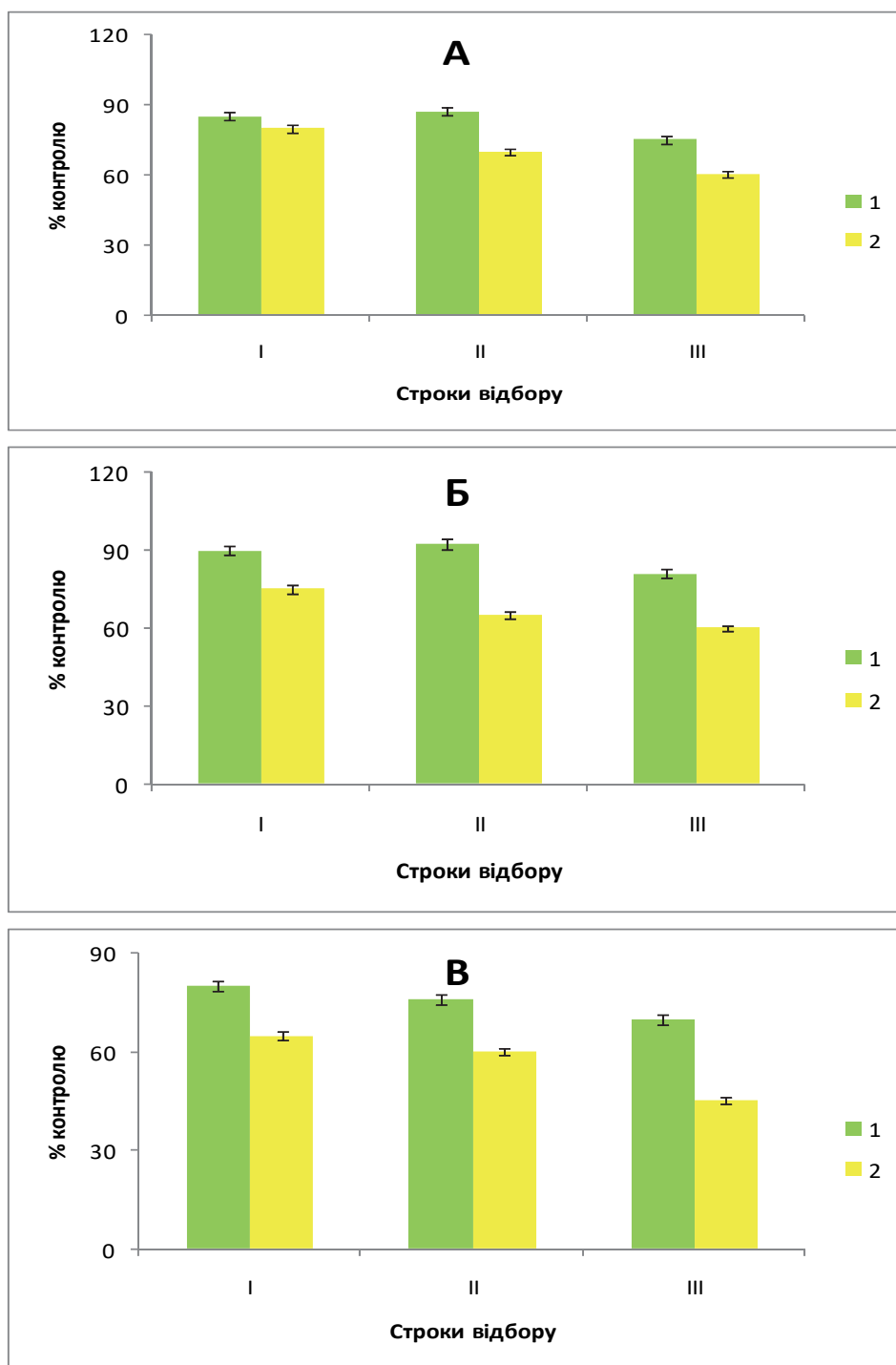


Рис. 7.6. Алелопатична активність ґрунту з-під рижію (А), гірчиці (Б) й ріпаку (В) (біотест – приріст коренів *Amaranthus paniculatus*), % контролю (за межами ділянки): 1 – ґрунт + кремній; 2 – ґрунт без кремнію. I – ювенільна фаза; II – бутонізація-цвітіння; III – плодоношення.

Оскільки більшість дослідників надають важливого значення гідрофільним сполукам у створенні алелопатичного потенціалу прикореневого середовища (Гродзинский, 1991; Матвеев, 1994; Salehi-lisar et al., 2014; Gomes et

al., 2017), з'ясовувався їхній вплив як на фітотоксичні, так і на цитостатичні властивості ґрунту під експериментальними рослинами.

Алелопатичне оцінювання гідрофільних сполук ґрунту з-під дослідних культур виявило посилення ростових процесів по відношенню до рослини-акцептора, а саме, огірка (рис. 7. 7) на тлі застосування кремнію, особливо для ріпаку у фазі бутонізації-цвітіння (на 20 %) та гірчиці у період плодоношення (на 23 %).

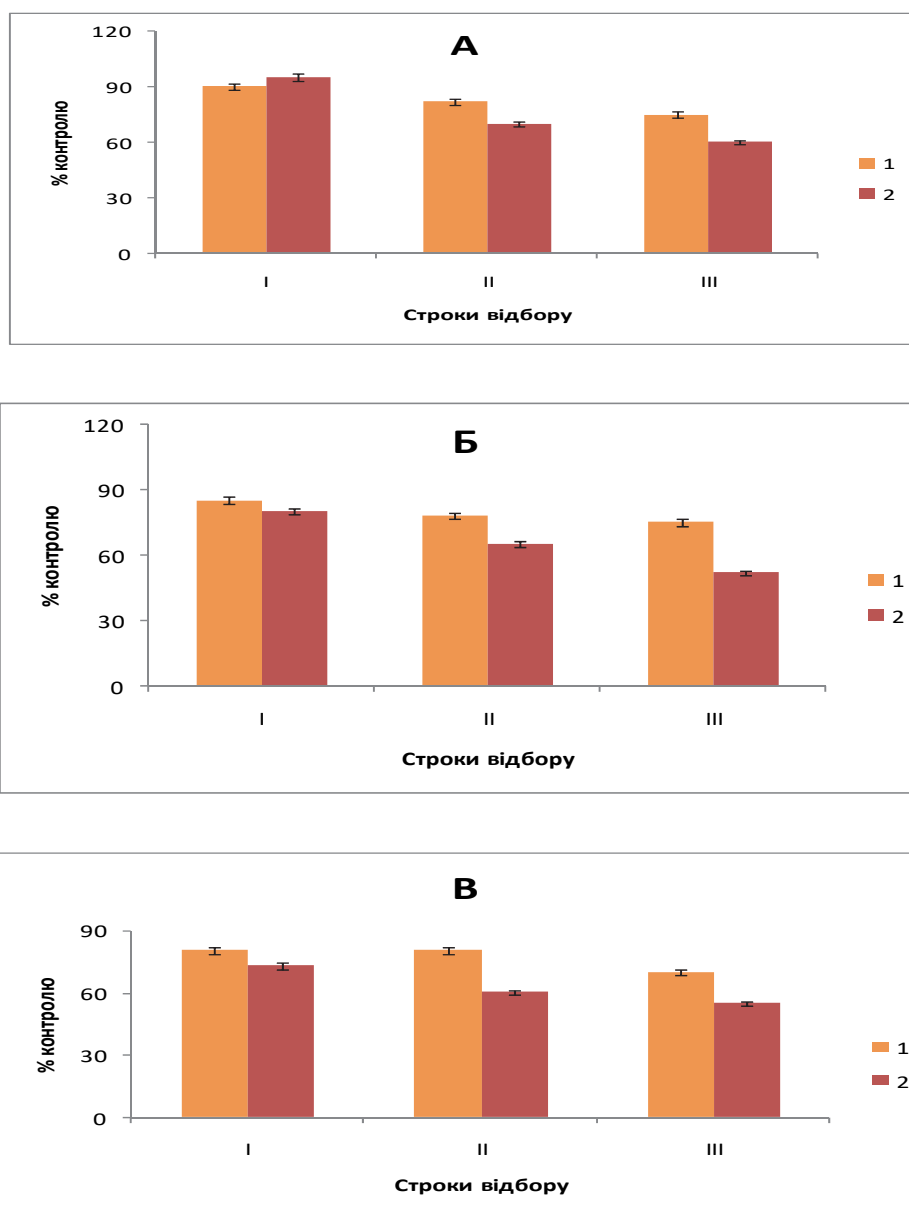


Рис. 7. 7. Алелопатична активність гідрофільних сполук ґрунту з-під ріжю (А), гірчиці (Б) й ріпаку (В) (біотест – приріст коренів *Cucumis sativus*), % контролю (за межами ділянки): 1 – ґрунт + кремній; 2 – ґрунт без кремнію. I – ювенільна фаза; II – бутонізація-цвітіння; III – плодоношення

Дослідження цитостатичних властивостей ґрунту показало посилення проліферації клітин бічних коренів *C. sativus* на 7-25 % на тлі кремнію, особливо в кінці вегетації (рис. 7. 8). Причому внесення кремнію найбільше сприяло підвищенню проліферації для ріжю у фазі плодоношення (на 25 %).

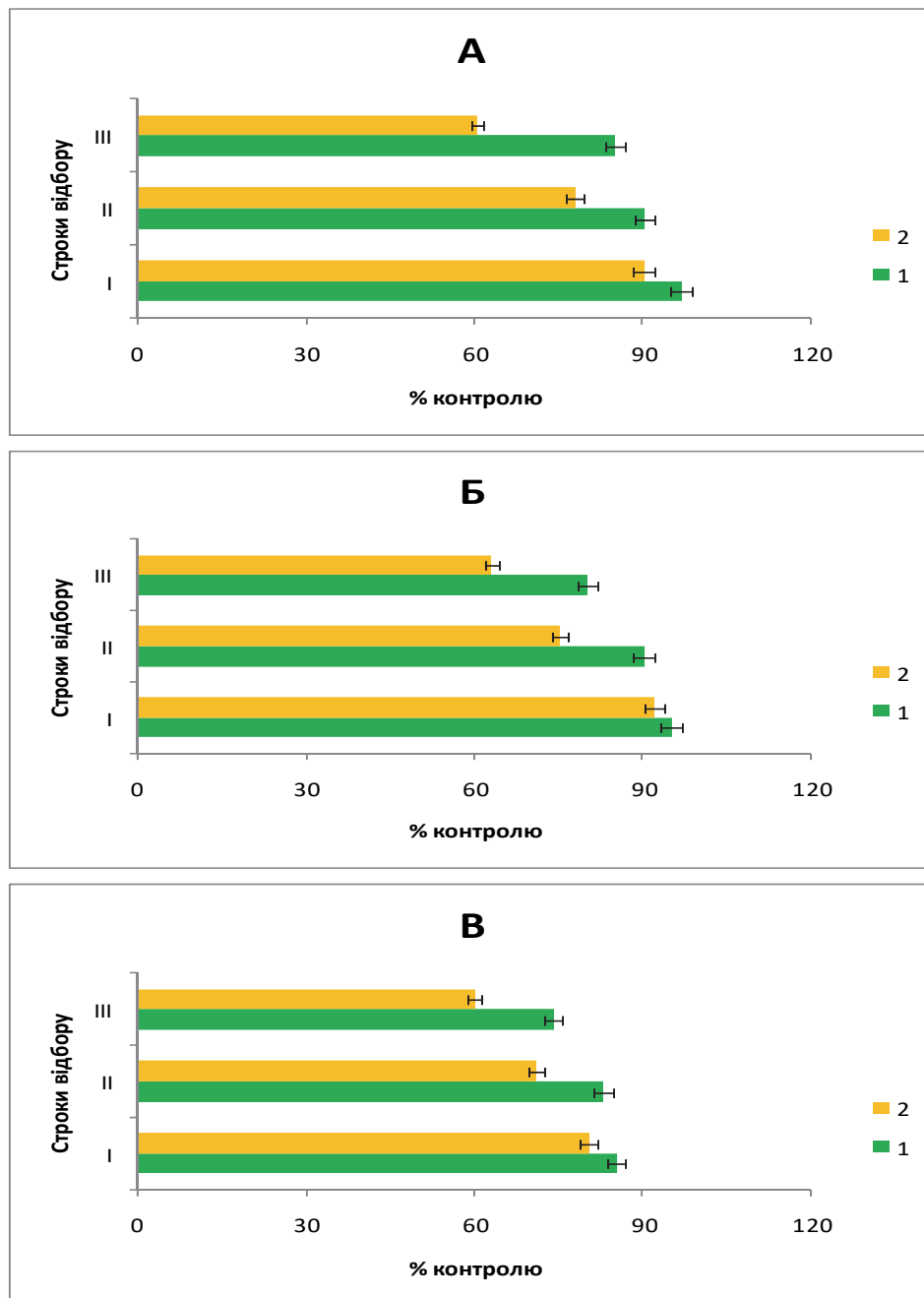


Рис. 7. 8. Цитостатична дія гідрофільних сполук ґрунту з-під ріжю (А), гірчиці (Б) й ріпаку (В) (біотест – кількість бічних коренів *Cucumis sativus*), % контролю (за межами ділянки): 1 – ґрунт + кремній; 2 – ґрунт без кремнію. I – ювенільна фаза; II – бутонізація-цвітіння; III – плодоношення.

Присутність кремнію в ґрунті сприяла зростанню значень окисно-відновного потенціалу у 1,1-1,3 рази (рис. 7. 9).

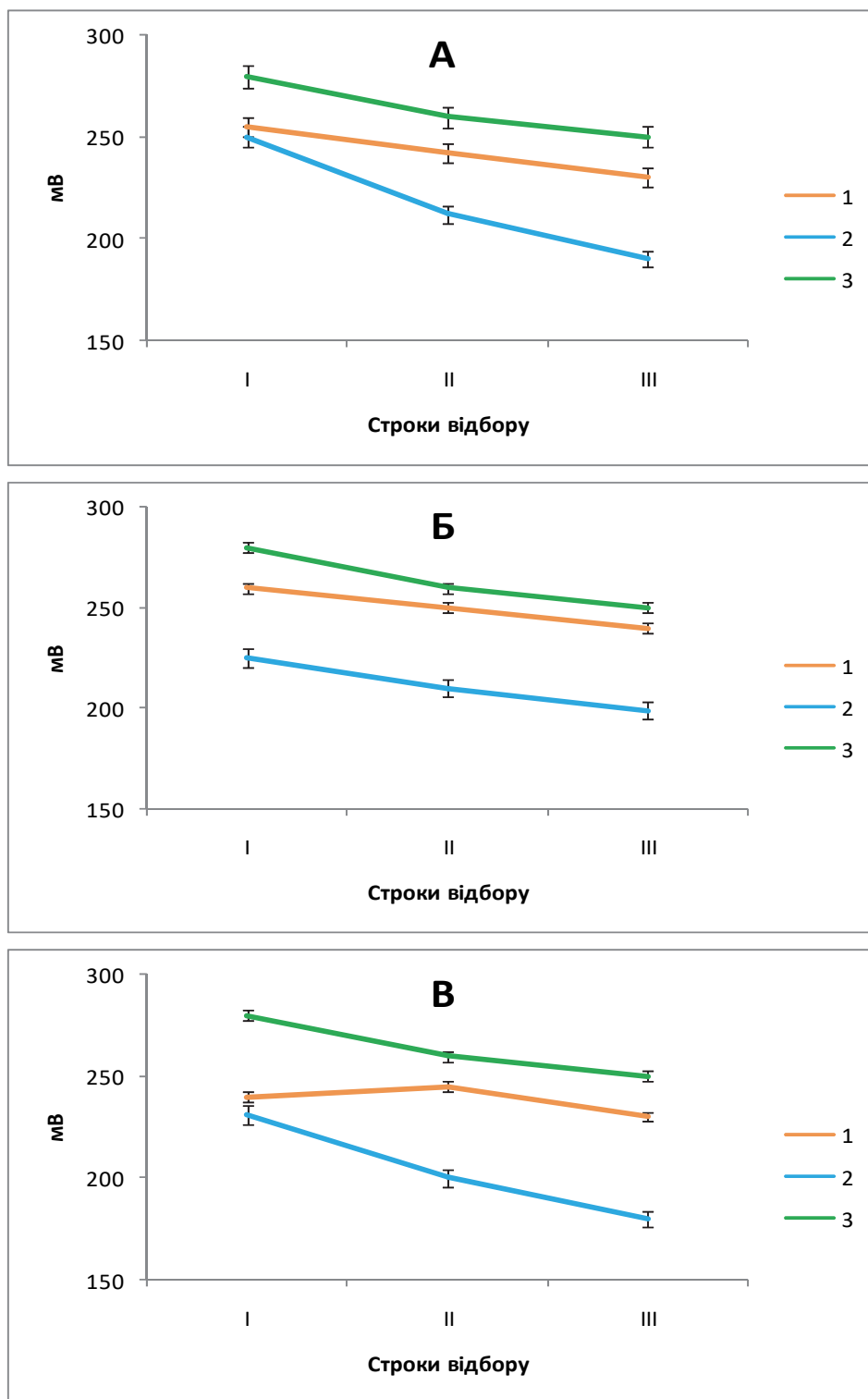


Рис. 7. 9. Значення окисно-відновного потенціалу (ОВП) в ґрунті з-під рижію (А), гірчиці (Б) й ріпаку (В), мВ: 1 – ґрунт + кремній; 2 – ґрунт без кремнію; 3 – контроль (за межами ділянки). I – ювенільна фаза; II – бутонізація-цвітіння; III – плодоношення.

Характер процесів був здебільшого помірно відновний, окрім інтенсивно відновного для усіх культур без додавання кремнію в кінці вегетації, що, очевидно, пов'язано з надмірною кількістю мобільних органічних сполук. Треба сказати, що найвищі значення окисно-відновного потенціалу фіксувалися для контрольного ґрунту за межами ділянок з досліджуваними культурами.

Фенольні сполуки є важливим компонентом фізіолого-біохімічної взаємодії рослин та, водночас, слугують попередниками гумусових речовин (Гродзинский, 1991; Li et al., 2010). Оскільки акумуляція та біотрансформація фенольних сполук залежить від численних абіотичних та біотичних чинників (Min et al., 2015), аналізували динаміку їхнього вмісту в прикореневому ґрунті дослідних рослин.

Концентрація фенольних сполук збільшувалася упродовж вегетаційного періоду, але меншою мірою – за присутності кремнію. Так, рівень фенолів був нижчим у 1,1-1,5 рази за умов надходження кремнію, причому максимально – для гірчиці в кінці вегетації (рис. 7. 10). Вміст фенольних сполук у ґрунті за межами ділянок дослідних рослин був найменшим упродовж усього періоду спостереження.

Отже, внесення кремнієвмісного добрива змінювало алелопатичні та цитостатичні властивості фізіологічно активних сполук прилеглого ґрунту в бік посилення процесів росту та підвищення проліферації клітин рослин-акцепторів, зниження концентрації рухливих органічних сполук, зокрема фенольних, та зменшення інтенсивності відновних процесів. У цілому, спостерігався позитивний вплив кремнію на алелопатичний режим прикореневого середовища рижю, гірчиці та ріпаку впродовж вегетаційного періоду.

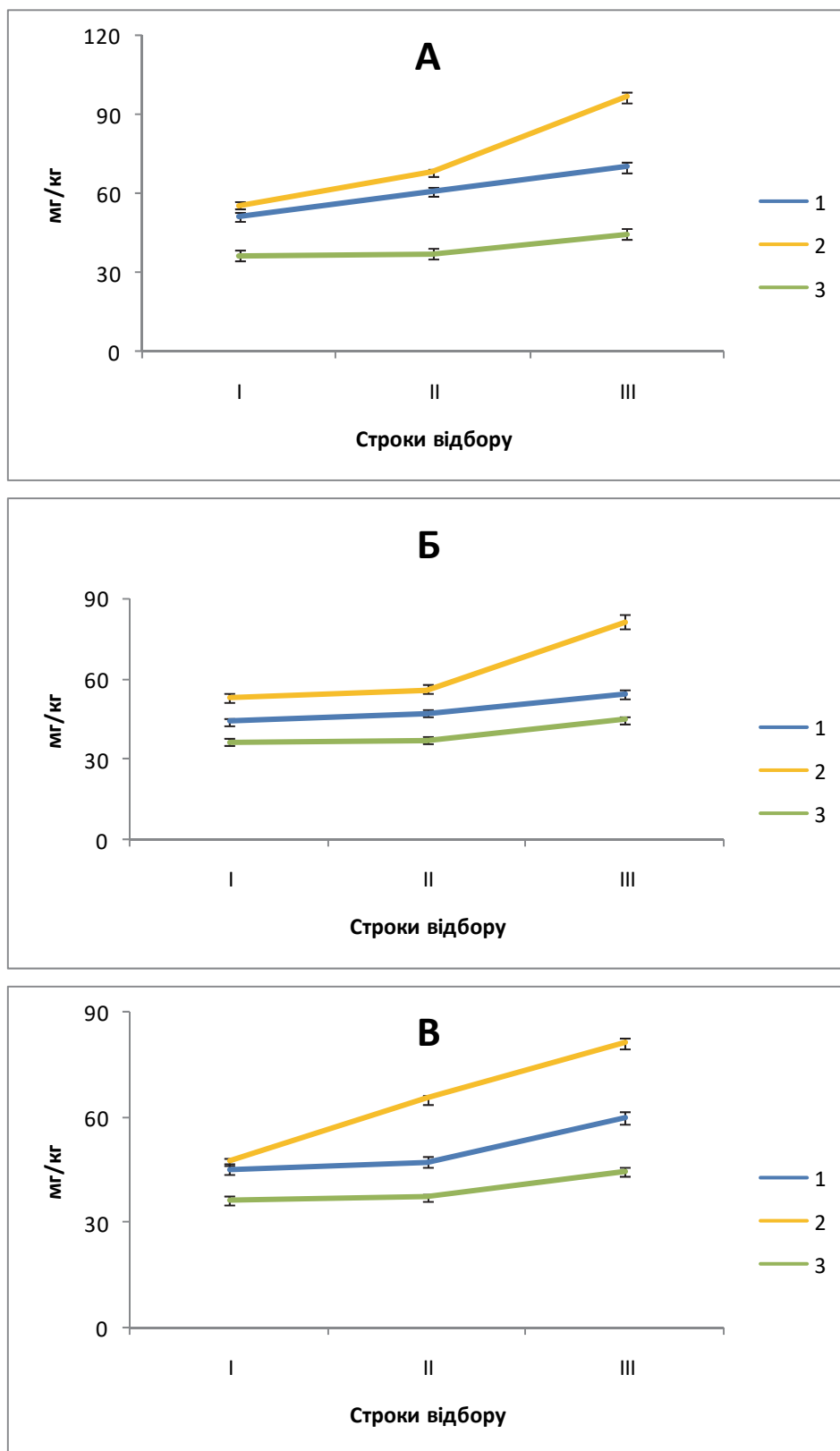


Рис. 7. 10. Вміст фенольних сполук в ґрунті з-під ріжю (А), гірчиці (Б) та ріпаку (В), мг/кг: 1. – ґрунт + кремній; 2. – ґрунт без кремнію; 3. – контроль (за межами ділянки). I – ювенільна фаза; II – бутонізація-цвітіння; III – плодоношення.

Виявлено зростання в 1,2-2,5 рази показників електропровідності ґрунту, які визначають концентрацію розчинних хімічних елементів, за присутності сполук кремнію. Відповідно зафіксовано зростання в ґрунті вмісту Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, P (табл. 7.4).

Таблиця 7.4

Вміст біогенних елементів у ґрунті за
внесення кремнієвмісного добрива, мг/кг

Культура	Варіант дослідів	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P
Ювенільна фаза розвитку								
Рижій	КС	9059	13,6	11850	2224	2040	209,2	12,2
	К	6714	12,5	10366	2015	1902	166,7	9,9
Гірчиця	КС	7072	19,6	11310	2316	2014	177,5	12,1
	К	5834	11,8	10470	2120	1852	167,2	10,0
Ріпак	КС	9572	23,5	16060	4725	3515	169,8	12,8
	К	6030	11,8	11190	2021	1647	155,1	11,4
Фаза бутонізації-цвітіння								
Рижій	КС	6914	11,1	121,85	21,07	19,03	199,2	4,0
	К	6322	7,5	10560	1950	1826	190,5	3,7
Гірчиця	КС	6132	10,2	12776	1852	1856	189,0	3,8
	К	5205	9,4	10605	1659	1720	175,3	2,9
Ріпак	КС	5466	10,8	11850	1889	1836	192,1	3,5
	К	5040	9,3	10352	1609	1671	179,9	2,1
Фаза плодоношення								
Рижій	КС	7527	12,6	13590	2365	1932	207,3	193,1
	К	6580	10,7	12410	2069	1728	184,9	111,0
Гірчиця	КС	8198	14,8	13680	2398	2024	226,0	234,2
	К	5473	13,1	8777	1752	1522	159,1	85,6
Ріпак	КС	7451	12,5	14940	2162	1929	216,2	202,1
	К	5433	11,0	9689	1825	1621	181,4	99,5

Заслужує на увагу факт різкого зростання фосфору в ґрунті у фазі плодоношення, особливо за присутності кремнієвмісного добрива. Нашими попередніми дослідженнями доведено, що внесення кремнію в ґрунт стабілізує фосфатний режим і призводить до збільшення рухомих форм

фосфору за рахунок активізації фосфатаз та вивільнення фосфору з малодоступних фосфатів III і IV груп.

Зафіксовано зменшення в ґрунті Ba, Cd, Cr, Na, S, Pb і Sr за внесення сполук кремнію, причому суттєвих флуктацій в концентрації елементів упродовж вегетації рослин не виявлено (табл. 7. 5).

Таблица 7. 5

Вміст важких металів у ґрунті за внесення кремнієвмісної суміші, мг/кг

Культура	Варіант досліджу	Ba	Cd	Cr	Na	S	Pb	Sr
Ювенільна фаза розвитку								
Рижій	КС	62,4	1,1	17,2	117,5	239,4	7,8	36,3
	К	71,6	1,2	19,8	139,1	356,1	8,9	39,1
Гірчиця	КС	65,3	1,2	18,5	121,6	329,5	7,6	35,9
	К	72,8	1,3	19,7	140,8	398,6	8,5	40,2
Ріпак	КС	63,9	0,2	18,3	100,6	133,2	6,9	15,1
	К	71,4	1,2	26,7	154,2	378,5	9,2	37,5
Фаза бутонізації-цвітіння								
Рижій	КС	61,6	0,9	13,5	146,8	5018	9,3	29,3
	К	73,3	1,2	15,9	151,7	7560	10,7	32,1
Гірчиця	КС	59,2	0,6	12,0	118,8	7775	8,6	27,2
	К	75,8	0,8	13,7	149,1	10943	9,8	31,9
Ріпак	КС	60,9	0,7	12,1	150,3	10683	8,3	25,6
	К	68,3	0,9	15,3	454,3	12447	9,7	29,0
Фаза плодоношення								
Рижій	КС	65,4	0,8	10,5	679,8	656	9,5	44,6
	К	98,1	1,2	12,4	752,1	776	10,2	53,2
Гірчиця	КС	63,3	0,9	12,5	577,2	765	11,7	37,9
	К	116,8	1,5	15,8	818,4	3804	13,4	63,8
Ріпак	КС	65,7	0,8	10,3	696,2	652	9,5	38,3
	К	97,0	1,0	12,7	791,8	894	11,6	59,0

Необхідно зауважити, що значне підвищення вмісту кремнію в ґрунті дослідних ділянок спостерігається на тлі зростання органічної речовини. Формується кремнієва матриця, для якої притаманні інформаційно-ресурсні властивості (табл. 7. 6).

Таблиця 7.6

Вміст Si, Zn, Ti і Mn у ґрунті та брасиностероїдів у листках дослідних видів рослин за внесення кремнієвмісного добрива, мг/кг

Культура	Варіант досліджу	Елементи, мг/кг				Брасиностероїди, мкг/г с.р.м.
		Si	Zn	Ti	Mn	
Ювенільна фаза розвитку						
Рижій	КС	1034	22,4	207,2	28,5	0,09
	К	874	20,3	192,5	26,2	0,07
Гірчиця	КС	1128	24,8	213,6	18,3	0,1
	К	913	17,2	199,4	17,4	0,09
Ріпак	КС	1056	19,3	248,6	27,9	0,08
	К	974	17,5	206,3	26,3	0,07
Фаза бутонізації-цвітіння						
Рижій	КС	963	35,8	355,9	21,7	0,08
	К	815	28,7	321,3	18,2	0,05
Гірчиця	КС	1014	19,2	388,8	29,6	0,09
	К	756	14,1	302,6	21,4	0,05
Ріпак	КС	995	28,4	336,9	28,4	0,06
	К	823	22,9	292,4	27,9	0,04
Фаза плодоношення						
Рижій	КС	1678	28,6	328,0	147,6	1,37
	К	1480	24,2	277,5	138,2	0,87
Гірчиця	КС	1749	50,7	342,8	215,8	1,014
	К	1344	28,6	257,1	155,3	0,76
Ріпак	КС	1882	38,3	319,0	184,2	0,97
	К	1734	26,4	275,6	100,8	0,64

З одного боку, за рахунок цього забезпечується збалансованість системи ґрунт-рослина-ґрунт, а з іншого – підвищується адаптивний потенціал рослин до абіотичних та біотичних стрес-факторів. Підтвердженням цьому слугують високі концентрації титану і цинку, які відповідають за стійкість рослин до фітопатогенів та температурних коливань.

Крім того, виявлено зростання показників брасиностероїдів у листках дослідних видів, присутність яких свідчить про стійкість імунної системи рослин до високих і низьких температур, посух, гіпоксії, засолення та забруднення ґрунтів, хвороб, впливу пестицидів. Доведено плейотропний

характер дії брасиностероїдів у регуляції ростових процесів, фотосинтезу, дихання, транспірації, оводненості тканин, гормонального та іонного балансу в експериментальних умовах зростання, а також у захисті проти хвороб. Брасиностероїди відіграють важливу роль у регуляції розвитку рослин, активізують поділ клітин, стимулюють розгортання листків, диференціацію ксилеми. За їхньої нестачі не формуються стовбчастий мезофіл, а також утворюється менша кількість провідних пучків у листовій пластинці. Брасиностероїди також задіяні у формуванні продуктивності рослин за рахунок підвищення концентрації РуБісКо та покращення засвоєння макро- і мікроелементів, що сприяє суттєвому підвищенню врожайності сільськогосподарських культур.

Значні розбіжності виявлено також у розподілі хімічних елементів у листках дослідних видів рослин. За внесення кремнієвмісного добрива виявлено зростання у тканинах вмісту Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, P, B, Si, Ti і Zn (табл. 7. 7).

Таблиця 7. 7

Вміст біогенних елементів у листках
дослідних видів рослин за внесення кремнієвмісного добрива, мг/кг

Культура	Варіант досліджу	Елемент					
		Ca	Cu	Fe	K	Mg	Ti
1	2	3	4	5	6	7	8
Ювенільна фаза розвитку							
Рижій	КС	32940	10,2	1150	35950	2802	18,5
	К	31690	7,0	1031	32070	2415	17,2
Гірчиця	КС	21060	11,8	602,7	13277	2634	14,1
	К	22788	10,9	551,4	12570	2512	11,4
Ріпак	КС	40180	3,5	671,9	20560	4066	12,9
	К	27100	3,1	612,4	19010	3335	10,5
Фаза бутонізації-цвітіння							
Рижій	КС	43770	10,8	297,2	38940	3707	37,1
	К	38330	8,7	279,8	35670	2759	28,5
Гірчиця	КС	28050	9,2	301,9	28500	3374	26,7
	К	19810	7,7	186,1	26340	3156	15,4
Ріпак	КС	23760	7,2	178,9	22660	3573	18,9
	К	15740	6,7	163,2	18540	2986	15,3

1	2	3	4	5	6	7	8
Фаза плодоношення							
Рижій	КС	35260	18,3	732,4	20060	4679	30,2
	К	32710	16,1	691,5	18670	4366	26,1
Гірчиця	КС	34240	14,4	673,3	20950	5037	28,5
	К	31610	13,8	502,9	19380	4653	24,2
Ріпак	КС	25100	7,5	363,5	17640	4432	19,2
	К	22250	6,6	324,7	14690	3625	16,1

Суттєво, що концентрація бора зростала в 14,5-49,1 рази у фазі плодоношення, а марганцю і кремнію відповідно у 1,6-12,4 і 8,9-14,4 рази (табл. 7. 8).

Таблиця 7. 8

Вміст В, Р і S у листках дослідних видів рослин
за внесення кремнієвмісного добрива, мг/кг

Культура	Варіант досліду	Елемент		
		В	Р	С
Ювенільна фаза розвитку				
Рижій	КС	10,0	88,1	5777
	К	7,8	74,8	5145
Гірчиця	КС	3,8	41,4	5025
	К	2,4	38,0	4987
Ріпак	КС	12,2	70,4	8073
	К	8,3	62,2	6451
Фаза бутонізації-цвітіння				
Рижій	КС	21,8	86,0	7560
	К	19,0	71,9	5818
Гірчиця	КС	30,7	107,5	10775
	К	29,2	87,3	7943
Ріпак	КС	33,2	130,4	11447
	К	21,1	127,0	10683
Фаза плодоношення				
Рижій	КС	145,3	7,8	1085
	К	136,8	7,5	1016
Гірчиця	КС	137,7	7,7	1041
	К	111,8	7,2	612
Ріпак	КС	96,4	9,8	948
	К	82,0	9,1	175

Протилежна закономірність спостерігається щодо фосфору та сірки, вміст яких зменшувався наприкінці вегетації відповідно у 11,3-13,9 і 9,9-13,3 рази. Отримана залежність пов'язана з формуванням насіння та синтезом органічних сполук, зокрема, олії, білку та фітину. Тканини дослідних рослин відрізнялись меншим вмістом важких металів порівняно з контрольним варіантом. За присутності кремнію надходження до рослин Ba, Cr, Cd, Pb, Sr зменшувалось у середньому в 3,1-7,6 рази (табл. 7. 9).

Таблиця 7. 9

Вміст важких металів у листках дослідних видів рослин за внесення кремнієвмісного добрива, мг/кг

Культура	Варіант досліджу	Елемент				
		Ba	Cr	Cd	Pb	Sr
Ювенільна фаза розвитку						
Рижій	КС	13,6	2,9	0,38	1,5	102,8
	К	14,5	3,3	0,49	1,9	113,4
Гірчиця	КС	6,4	2,4	0,14	1,2	71,4
	К	6,9	3,0	0,21	1,4	79,6
Ріпак	КС	11,4	1,8	0,20	1,1	94,1
	К	12,8	2,3	0,26	1,3	144,9
Фаза бутонізації-цвітіння						
Рижій	КС	12,6	8,3	0,32	6,9	119,0
	К	13,2	9,0	0,38	8,5	150,5
Гірчиця	КС	4,5	6,1	0,18	4,5	50,8
	К	6,6	8,4	0,23	5,2	65,3
Ріпак	КС	7,1	6,2	0,22	6,7	54,7
	К	8,0	7,9	0,27	7,8	69,8
Фаза плодоношення						
Рижій	КС	18,3	9,1	1,2	1,9	172,4
	К	21,6	11,4	1,5	2,2	183,6
Гірчиця	КС	20,5	8,6	1,0	0,5	139,5
	К	24,8	10,7	1,4	1,8	172,7
Ріпак	КС	18,9	8,2	1,1	1,1	88,3
	К	23,4	9,9	1,5	2,3	91,2

Суттєві відмінності спостерігаються також у розподілі фотосинтетичних пігментів у листках. Зокрема, внесення кремнієвмісного добрива в ґрунт стимулювало синтез хлорофілу *a* в листках ріжю, гірчиці та ріпаку впродовж всього періоду вегетації (табл. 7. 10). Це підтверджує наявні у науковій літературі відомості про те, що біологічно активний кремній стимулює ріст та фотосинтетичну продуктивність у вищих рослин (Zaimenko et al., 2018). Внесення кремнієвмісного добрива помітно стимулювало розвиток листкової пластинки у гірчиці та ріпаку (рис. 7. 11).

Таблиця 7.10

Вміст фотосинтетичних пігментів у листках
ріжю, гірчиці та ріпаку за внесення кремнієвмісного добрива та у контролі
(середнє арифметичне $\pm$ стандартна похибка)

Культура	Термін відбору	Хлорофіл <i>a</i>		Хлорофіл <i>b</i>		Каротиноїди	
		контроль	кремній	контроль	кремній	контроль	кремній
Ріжю	Фаза ювенільного розвитку	7,4 $\pm$ 0,40	8,2 $\pm$ 0,28	2,7 $\pm$ 0,02	2,8 $\pm$ 0,01	1,2 $\pm$ 0,01	1,6 $\pm$ 0,01
	Бутонізації-цвітіння	11,7 $\pm$ 0,32	12,5 $\pm$ 0,29	3,7 $\pm$ 0,01	3,4 $\pm$ 0,02	2,4 $\pm$ 0,01	2,4 $\pm$ 0,01
	Плодоношення	-	-	-	-	-	-
Гірчиця	Фаза ювенільного розвитку	8,0 $\pm$ 0,25	10,3 $\pm$ 0,28	2,9 $\pm$ 0,01	3,6 $\pm$ 0,01	1,3 $\pm$ 0,02	1,7 $\pm$ 0,01
	Бутонізації-цвітіння	12,9 $\pm$ 0,22	13,8 $\pm$ 0,31	4,2 $\pm$ 0,02	5,0 $\pm$ 0,01	2,8 $\pm$ 0,01	2,8 $\pm$ 0,02
	Плодоношення	10,5 $\pm$ 0,28	14,4 $\pm$ 0,32	7,0 $\pm$ 0,02	6,4 $\pm$ 0,02	4,2 $\pm$ 0,01	4,6 $\pm$ 0,02
Ріпак	Фаза ювенільного розвитку	9,6 $\pm$ 0,33	10,6 $\pm$ 0,27	3,5 $\pm$ 0,02	3,7 $\pm$ 0,02	1,7 $\pm$ 0,01	2,1 $\pm$ 0,01
	Бутонізації-цвітіння	15,5 $\pm$ 0,25	16,8 $\pm$ 0,41	5,5 $\pm$ 0,01	3,5 $\pm$ 0,02	3,6 $\pm$ 0,02	2,1 $\pm$ 0,02
	Плодоношення	-	-	-	-	-	-

* У фазі плодоношення ріжю та ріпаку зелені листки були вже відсутні



Рис. 7. 11. Листки рослин гірчиці (А) та ріпаку (Б) в контролі (1) та за внесення кремнієвмісного добрива (2), фаза цвітіння

Для хлорофілу *b* спостерігалось суттєве зростання біосинтезу пігменту в листках за внесення кремнієвмісного добрива порівняно з контролем у ювенільній фазі розвитку.

У фазі бутонізації-цвітіння в листках ріпаку, а також у фазі плодоношення у листках гірчиці вміст хлорофілу *b* дещо знижувався за присутності кремнію. Подібну тенденцію спостерігали також для каротиноїдів. Хлорофіл *b* і каротиноїди є відомими захисними біомолекулами, вміст яких зростає у відповідь на стресові умови середовища, зокрема на підвищену температуру або посуху. Оскільки другий і третій відбір було зроблено упродовж найспекотнішого та посушливого періоду вегетації, виявлене зниження вмісту хлорофілу *b* і каротиноїдів можна розглядати як ознаку менш напруженого стресового стану у дослідних рослин за внесення кремнієвмісного добрива порівняно з контролем.

Пом'якшення стресових умов за внесення кремнієвмісного добрива підтверджують також результати аналізу вмісту вторинних метаболітів (флавоноїдів, антоціанів, танінів) у листках дослідних видів (табл. 7. 11).

Таблиця 7. 11

Вміст вторинних метаболітів у листках ріжю, гірчиці та ріпаку за внесення кремнієвмісного добрива і в контролі (середнє арифметичне $\pm$ стандартна похибка)

Культура	Термін відбору	Флавоноїди, мг/г сир. маси		Антоціани, % до сир. маси		Таніни, % до сух. маси	
		контроль	кремній	контроль	кремній	контроль	кремній
Рижю	Фаза ювенільного розвитку	8,58 $\pm$ 0,3	8,25 $\pm$ 0,5	0,11 $\pm$ 0,01	0,04 $\pm$ 0,01	27,2 $\pm$ 1,1	8,0 $\pm$ 0,6
	Бутонізації-цвітіння	11,56 $\pm$ 0,2	8,76 $\pm$ 0,2	0,13 $\pm$ 0,01	0,07 $\pm$ 0,01	16,2 $\pm$ 0,8	12,4 $\pm$ 0,4
	Плодоношення	-	-	-	-	-	-
Гірчиця	Фаза ювенільного розвитку	13,86 $\pm$ 0,4	12,80 $\pm$ 0,3	0,07 $\pm$ 0,01	0,05 $\pm$ 0,01	11,4 $\pm$ 0,9	9,3 $\pm$ 0,7
	Бутонізації-цвітіння	17,64 $\pm$ 0,4	15,27 $\pm$ 0,2	0,18 $\pm$ 0,01	0,08 $\pm$ 0,01	8,3 $\pm$ 0,6	7,2 $\pm$ 0,8
	Плодоношення	7,99 $\pm$ 0,2	5,64 $\pm$ 0,3	0,13 $\pm$ 0,01	0,06 $\pm$ 0,01	7,3 $\pm$ 0,5	6,4 $\pm$ 0,7
Ріпак	Фаза ювенільного розвитку	13,90 $\pm$ 0,2	13,25 $\pm$ 0,4	0,09 $\pm$ 0,01	0,04 $\pm$ 0,01	17,4 $\pm$ 0,8	11,1 $\pm$ 0,6
	Бутонізації-цвітіння	17,83 $\pm$ 0,3	18,29 $\pm$ 0,5	0,11 $\pm$ 0,01	0,06 $\pm$ 0,01	15,3 $\pm$ 0,9	11,2 $\pm$ 0,8
	Плодоношення	-	-	-	-	-	-

* У фазу плодоношення у рижю та ріпаку зелені листки були вже відсутні

У фазі бутонізації-цвітіння (липень), період, коли рослини найбільше відчували на собі вплив високих температур та посухи, спостерігалось зростання вмісту флавоноїдів та антоціанів у листках рижю, гірчиці й ріпаку. Це свідчить про зростання напруженості стресового стану в цих рослин, оскільки флавоноїди та антоціани є відомими маркерами стресового стану, біосинтез яких підвищується у відповідь на несприятливі умови середовища (Chalker-Scott, 1999; Калита, 2013). За внесення кремнієвмісного добрива вміст флавоноїдів та антоціанів в листках суттєво знижувався.

Таніни також задіяні у захисних реакціях рослин до біотичних і абіотичних стресів та розглядаються як маркери стресового стану (Григорюк & Нестерова, 2017). Крім того, ці сполуки регулюють процеси росту і розвитку рослин. Механізм їхньої дії на рослинний організм остаточно не з'ясований, проте відомо, що таніни здатні гальмувати розпад ІОК, а також виступати у ролі антагоністів і регуляторів гіберелінів. Зростання вмісту танінів також може свідчити про зниження метаболічної активності та процесів росту, пов'язаних, наприклад, з підготовкою до періоду спокою (Григорюк & Нестерова, 2017). Сезонна динаміка вмісту танінів у листках ріжю, гірчиці та ріпаку була схожою і характеризувалась максимумом у ювенільній фазі розвитку, з наступним зниженням у фазі бутонізації-цвітіння та плодоношення (у гірчиці). Очевидно це пов'язано зі зменшенням активності вегетативного росту та активізацією синтезу гормонів цвітіння (гіберелінів), які є антагоністами танінів. За внесення кремнієвмісного добрива простежується суттєве зниження вмісту танінів у листках, що свідчить про зниження напруженості стресового стану та більш активний перебіг ростових процесів у дослідних рослин (рис. 7. 12).



Рис. 7. 12. Дослідна ділянка рослин ріжю, гірчиці та ріпаку за внесення кремнієвмісного добрива (Si) та у контролі (K)

Таким чином максимальний вміст органічної речовини в ґрунті характерний для початкового періоду вегетації рослин. У подальшому спостерігається поступове зменшення кількісних параметрів лабільних форм Гумусу в результаті формування стабільних форм, що свідчить про зменшення активності лакази та концентрації HCO_3 .

Найвищий рівень Гумусу зафіксовано у варіантах з кремнієвмісним добривом за вирощування ріпаку, що пов'язано зі зростанням активності лакази та депонуванням CO_2 за рахунок стимуляції азотфіксації.

Мікробіологічний моніторинг ґрунту експериментальних культур за присутності сполук кремнію засвідчує збільшення чисельності мікроорганізмів у дослідних варіантах. Виключенням стала чисельність мікроміцетів у фазі бутонізації-цвітіння, також амоніфікаторів у ґрунті під рижієм та ріпаком.

Доведено позитивний вплив кремнію на алелопатичний режим прикореневого середовища рижію, гірчиці та ріпаку впродовж вегетаційного періоду. Рівень фенолів знизився у 1,1-1,5 рази за умов надходження кремнію, причому, максимально для гірчиці в кінці вегетації.

Виявлено суттєве підвищення вмісту кремнію в ґрунті дослідних ділянок, завдяки чому на тлі зростання органічної речовини формується кремнієва матриця, для якої притаманні інформаційно-ресурсні властивості. З одного боку, в результаті цього забезпечується збалансованість системи ґрунт-рослина-ґрунт, з іншого – підвищується адаптивний потенціал рослин до абіотичних та біотичних стрес-факторів.

Показано зростання концентрації титану і цинку за внесення кремнієвмісного добрива, які відповідають за стійкість рослин до фітопатогенів і температурних коливань.

Встановлено підвищення показників брасиностероїдів у листках дослідних видів, присутність яких свідчить про підтримку імунної системи

рослин до високих та низьких температур, посух, гіпоксії, засолення та забруднення ґрунтів, хвороб, впливу пестицидів.

Заслугує на увагу факт різкого зростання фосфору в ґрунті дослідних ділянок у фазі плодоношення за рахунок активізації фосфатаз і вивільнення фосфору з малодоступних фосфатів III і IV груп.

Внесення кремнієвмісного добрива в ґрунт стимулювало синтез хлорофілу *a* у листках ріжю, гірчиці та ріпаку впродовж вегетаційного періоду, для хлорофілу *b* виявлено зростання його концентрації у ювенільну фазу розвитку.

Пом'якшення стресових умов за внесення кремнієвмісного добрива підтверджується зростанням вмісту вторинних метаболітів у листках, зокрема флавоноїдів, антоціанів і танінів.

Опрацювання методів безвідходної утилізації побічної продукції. На 2022 рік загальна площа посівів ріпаку по Україні становить 1,4 млн. га, гірчиці відповідно 19,6 тис. га. Згідно технологічного регламенту рослинну масу цих культур після збирання врожаю залишають на поверхні ґрунту, що негативно позначається на формуванні лабільних форм Гумусу.

Проведені нами дослідження засвідчили, що внесення кремнієвмісних добрив у кількості 400 кг/га під культури ріпаку та гірчиці позитивно позначилось на мікробіологічній і ферментативній активності ґрунту, простежується зменшення його фітотоксичності, особливо в кінці вегетаційного періоду рослин. Присутність рухливих форм кремнію забезпечує зростання органічної речовини, в результаті чого формується кремнієва матриця, для якої притаманна інформаційно-ресурсна властивість. Це позитивно позначається на збалансованості системи ґрунт-рослина-ґрунт та сприяє підвищенню адаптивного потенціалу рослин до абіотичних і біотичних чинників.

Вперше виявлено, що у варіантах з кремнієвмісним добривом спостерігається зростання активності лакази, пов'язаної зі швидкістю

деструкції лігнінвмісних рослинних решток та розвитку меланінвмісних мікроміцетів, задіяних у трансформації целюлози. За рахунок цього відбувається депонування CO₂ в ґрунті, який у подальшому використовується для формування стабільних форм Гумусу. Підтвердженням цьому слугує зростання чисельності азотфіксуючих мікроорганізмів та вмісту аміачної форми азоту.

З огляду на викладене вище, було проведено лабораторні експерименти по дослідженню кремнієвмісної суміші, до складу якої входять подрібнені до фракції 1-2 мм рослинні рештки ріпаку та гірчиці. Кремнієвмісна суміш містить кремнієвмісний мінерал анальцим як мінеральну складову; у якості органічної складової – рослинні відходи, попередньо оброблені культуральною рідиною штаму *Trichoderma lignorum*. У результаті поєднання рухливих форм кремнію з органічними відходами рослинного походження забезпечується синтез полі- та монокремнієвих кислот, які дозволяють оптимізувати агрохімічні, агрофізичні та біологічні показники ґрунту, а також стимулювати фізіолого-біохімічні процеси в рослинах, підвищити їхню стійкість до фітопатогенів. Сама присутність кремнію в складі суміші активізує розвиток мікроорганізму – деструктора, за рахунок чого в 3,5 рази скорочується термін трансформації рослинних решток.

Планується продовження проведення дослідження з вивчення впливу кремнієвмісної суміші на розкладання побічної продукції ріпаку та гірчиці.

РОЗДІЛ 8.

РОЛЬ КРЕМНІЮ В МЕХАНІЗМАХ ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ В СИСТЕМІ ҐРУНТ-РОСЛИНА-ҐРУНТ

Спроможність рослин поглинати кремній з ґрунту, накопичувати його в тканинах і повертати за рахунок опаду формує складну мережу зворотніх зв'язків у екосистемах. У поглинанні та накопиченні Si рослинами задіяні екосистемні послуги, пов'язані зі структурно-функціональною організацією ґрунту, накопиченням біомаси та секвестрацією вуглецю. Багаточисельні функції кремнію в біології рослин передбачають захист від абіотичних і біотичних стресів та є ключовим фактором структурно-функціональної організації ґрунтової екосистеми.

У ґрунті кремній перебуває в різних формах: у вигляді твердих кристалічних форм первинних (кварцу, польові шпати, слюди) і вторинних силікатних мінералів (глини), а також мікрокристалічних мінералів (алофан, імоголіт, опал). Аморфний кремнезем містить як кремній мінерального походження, який входить до складу педогенних оксидів, в першу чергу, заліза, так і біогенний кремній, зокрема фітолітів (Matichenkov et al., 2001). Всі ці форми і сполуки є джерелом розчинних моно- і полікремнієвих кислот, доступних для рослин (Opfergelt et al., 2009). Полікремнієва кислота мобілізується під час розчинення твердих кристалічних мінералів і трансформується в монокремнієву кислоту, якщо концентрація Si набагато нижча насичення, але зі збільшенням концентрації кремнієвої кислоти в розчині відбувається полімеризація монокремнієвої в полікремнієву кислоту (Belton et al., 2009).

Відомо, що зростання доступності кремнію в ґрунті призводить до мобілізації оксидів заліза Fe (II) на поверхні мінеральних часток, тим самим збільшуючи доступність фосфору для рослин (Ma et al., 1991). Кремнієва

кислота є незарядженим бідентатним лігандом при рН ґрунту <7. Молекула монокремнієвої кислоти знаходиться у прямій конкуренції залежно від рН з моно- і бідентатними лігандами молекули фосфата (Taylor, 1995; Meunier, et al., 2018; Schaller et al., 2020). Хоча у кремнієвої кислоти більш слабка енергія зв'язків з оксидами заліза, ніж у фосфата, вона може витіснити фосфат, якщо її концентрація в розчині достатньо висока. Другою важливою ознакою кремнієвої кислоти є те, що вона спроможна полімеризуватися при високих концентраціях як у розчині, так і на поверхні оксида заліза, синтезуючи олігомерні зв'язки Si-O-Si (Pokrovski et al., 2003). Здатність сорбції у полікремнієвої кислоти вища, ніж у монокремнієвої, чим пояснюється спроможність кремнієвої кислоти при більш високих концентраціях витіснити фосфат зі зв'язаних форм. Не лише поживні сполуки P і N мобілізуються кремнієм з ґрунту, але й важкі метали, зокрема Al, Cr, Cd, Pb, Zn (Bhat et al., 2019). Отже, в ґрунтових системах з високою концентрацією рухливих форм кремнію осідання аморфного кремнезему на поверхні мінералів впливає на іммобілізацію важких металів (Gutiérrez-Castorena et al., 2005). Крім того, аморфний кремнезем сприяє підвищенню водоутримуючої спроможності ґрунту за рахунок формування сілікогеля з полікремнієвої кислоти або колоїдного аморфного кремнію (Iler et al., 1973). Збільшення частки аморфного кремнезема на 1-5% підвищувало вміст води на 40-60% (Liang et al., 2005). Участь аморфного кремнезема у підвищенні водоутримуючої спроможності ґрунту поки не з'ясована.

Таксони рослин відрізняються за кількісними показниками Si, які проявляються в зміні вмісту кремнію, механізмах поглинання, формах і місцях відкладу. Зокрема, якщо кількість Si в рослині значно вища, ніж у ґрунтовому розчині, рослина поглинає кремній активніше; якщо кількість Si в рослині значно нижча, ніж у ґрунтовому розчині, рослина не поглинає кремній; якщо вміст Si в рослині та ґрунті однаковий, поглинання пасивне (Henriet et al.,

2006). Динамічний підхід більш прийнятний, оскільки свідчить про реакцію рослин на різну доступність кремнію в ґрунті і, до того ж, може вказувати на внутрішні фізіологічні драйвери цих реакцій (Richmond et al., 2003). Зокрема, деякі види збільшують активне поглинання Si за умови, коли доступність його в ґрунті нижча, ніж передбачено потребою в ньому для рослин (Faisal et al., 2012). У деяких випадках це відбувається за рахунок експресії генів-транспортерів Si та їхньої щільності в умовах низької доступності, що свідчить про дійсно активне поглинання, яке залежить не тільки від механізмів активного поглинання, але й від прояву фізіологічних реакцій цих механізмів. Крім того, поглинання Si також залежить від швидкості транспірації, при цьому деякі види демонструють пасивне (обумовлене транспірацією) поглинання Si в доповнення до активного (кероване транспортером) поглинання (Faisal et al., 2012).

У даний час досліджено декілька транспортерів і генів, які задіяні в поглинанні та накопиченні кремнію. Хоча вивчення транспортерів Si зосереджено на рослинах рису та інших злаків, перший рослинний ген, задіяний в регуляції його накопичення, було виявлено у гарбуза *Cucurbita* sp., зокрема утворення фітомів у скоринці плоду (Ma et al., 2006). У подальшому для злаків було відкрито чотири транспортери Lsi, які належать до аквапоринів NIP. Першим із відкритих транспортерів був транспортер притоку Lsi 1, розташований в дистальній плазматичній мембрані клітин екзодерми і ендодерми кореня (Ma et al., 2007). Транспортер відтоку на проксимальній плазматичній мембрані тих же клітин (Lsi 2) переносить кремній із епідерми в кортекс і далі завантажує його з епідерми в ксилему (Yamaji et al., 2008). Третій транспортер (Lsi 6) знаходиться у пагонах і відповідає за розвантаження ксилеми (Ma & Yamaji, 2015). У вузлах пагонів злаків Lsi 6 і Lsi 3 задіяні в розподілі Si між гілками (Yamaji & Ma, 2014; Yamaji et al., 2015). Разом ці транспортери утворюють складну кооперативну систему поглинання

і розподілу кремнію в рослинах з деякими варіаціями в деталях того, де саме локалізований кожний транспортер у межах певного виду (Sahebi et al., 2015; Deshmukh et al., 2013). Оскільки, на даний час, транспортери Si ідентифіковані не лише у злаків, але і в інших видів рослин доречно припустити, що походження цих механізмів таке ж стародавнє, як і походження наземних видів (Yamaji & Ma, 2014). Хоча залишається не з'ясованим питання транспорту Si у нетрав'яних видів.

Окрім внутрішніх транспортерів, на поглинання і накопичення Si в рослинах впливають також зовнішні чинники, до яких належать як пасивні механізми поглинання, залежні від транспіраційного потоку, так і активні механізми, викликані біотичними стресорами. Оскільки кремній поглинається з ґрунтового розчину у вигляді монокремнієвої кислоти, його пасивне надходження залежить від транспіраційного потоку. З'ясовано, що концентрація кремнію в рослинах зростає відповідно до збільшення запасів вологи в ґрунті (Hattori et al., 2005; de Melo et al., 2003; Mayland et al., 1991; Jenkins et al., 2011; Rosen & Weiner, 1994; Katz et al., 2018). З іншого боку, транспірація розглядається як діюча сила поглинання води і в такий спосіб вміст кремнію може бути індикатором транспіраційного стресу в рослинах (Yamaji et al., 2015; Euliss et al., 2005; Katz et al., 2013, 2014, 2018; Johnston et al., 1967). Крім того, високий рівень Si в рослинах за умов посухи, пов'язаний також з активним його поглинанням через наявність стресової ситуації.

Дискусійним залишається питання участі кремнію в депонуванні CO₂ та його ролі в регулюванні вуглецевого циклу (Takahashi et al., 2008; Li et al., 2014).

Отже, питання штучного поділу рослин за спроможністю поглинати і накопичувати кремній потребує детального вивчення, оскільки, по-перше, не існує чіткого кількісного визначення його концентрації в тканинах, хоча вважається, що поріг складає 1% Si на суху вагу або 1000 фітолітів на 1 г сухої

речовини (Cooke & Degabriel, 2016). По-друге, хоча мінливість вмісту Si має чітку таксономічну визначеність, яка коливається у межах 70%, філогенетичний аналіз свідчить про значно більшу флуктацію його концентрації (Prychid et al., 2003). На даний час існує інформація відносно розподілу кремнію в органах лише 29 родин вищих рослин і фрагментарні відомості щодо мохоподібних і папоротеподібних (Mazumdar, 2011; Nguyen et al., 2019; Golokhvast et al., 2014).

Як зазначалося, після поглинання коренями монокремнієва кислота транспортується нагору до пагону через ксилему, при цьому транспіраційний потік є основною рушійною силою (Schoelynck et al., 2016; Sahebi et al., 2015; Mitani & Ma, 2005; Katz et al., 2013). Всередині рослинних тканин великий відсоток монокремнієвої кислоти полімеризується спочатку в полікремнієву кислоту, а потім – в аморфний кремнезем, за участі амінів, амінокислот і пролінів (Coradin et al., 2001; Mann, et al., 1986; Perry et al., 2000; Currie & Perry, 2007). Існує багато форм біогенного кремнію в рослинах, найбільш досліджені з яких представлені у подвійному шарі кутикули, зв'язані з клітинною стінкою і фітоліти, присутні всередині клітини (Peleg et al., 2010; Hodson, 2019; Sakai & Thom, 1979; Zhang et al., 2013; He et al., 2015; Ueno & Agarie, 2005; He et al., 2013; Rudall et al., 2014). Залишається нез'ясованим питання відмінностей у процесах, задіяних у формуванні різних форм аморфного кремнезему та швидкості їх утворення (Neumann et al., 2019).

Зокрема, деякі науковці використовують термін фітоліти для опису біогенного кремнію, зосередженого в коротких епідермальних клітинах і трихомах, інші – для визначення будь-якої форми аморфного кремнезему використовують поняття довгих епідермальних клітин, фітоліти яких поєднанні з кремнієвими скелетами (Katz et al., 2018). Розподіл Si серед цих форм досить умовний, оскільки більш ранні дослідження свідчать, що фітоліти складають до 90%, а більш сучасні посилення твердять, що лише 15-80%

складають фітоліти, а інші форми рослинного кремнію представлені полікремніевою кислотою (Matichenkov et al., 2008; Motomura et al., 2004).

Не зважаючи на багаторічне вивчення механізмів розподілу Si в тканинах рослин, яке присвячено в основному злакам, все ще існує брак знань з цього питання. Оскільки, по-перше, накопичення кремнію не відбувається в усіх клітинах і тканинах одночасно та з однаковою швидкістю. Типове накопичення Si в спеціалізованих клітинах, зокрема в коротких епідермальних, є конституційним і відбувається упродовж усього росту, причому цьому передують факультативне атипове відкладення Si в неспеціалізованих клітинах, а саме: довгих епідермальних і продихових клітинах, функціонування яких залежить від достатньої кількості води, кремнію та транспірації (Fernández Honaine et al., 2012; Hodson et al., 1985). По-друге, епідермальні короткі клітини зазнають диференціації для того, щоб бути спеціалізованими клітинами, які накопичують Si, а потім зазнають анатомічних та фізіологічних змін, зокрема лігніфікації та апоптозу, для його розміщення (Kaufman et al., 1970; Hodson et al., 1986). Загалом, спочатку Si відкладається в клітинній стінці та інших зовнішніх частинах клітини, а заповнення клітинного простору кремнієм відбувається пізніше (Lanning et al., 1983).

Необхідно зауважити також на відмінностях у концентрації кремнію в різних органах рослин. Більшість інформаційних відомостей свідчить про те, що епідермальні тканини трав'яних видів рослин, зокрема листків і суцвіть, містять більшу концентрацію Si та фітолітів – у порівнянні з коренями і стеблами. При цьому, для деревних видів притаманний більш високий вміст Si у деревині та корі (Fernández Honaine et al., 2017; Schaller et al., 2012; Albert et al., 2008; Tsartsidou et al., 2007; Portillo et al., 2014; Das et al., 2014; Schoelynck et al., 2012). Суцвіття відрізняються вищим рівнем кремнію порівняно з іншими вегетативними органами рослин.

Розглянуті три типи мінливості (між таксонами, між формами і між частинами рослин), проявляються у морфології фітолітів та морфотипів (Novello & Barboni, 2015; Mercader et al., 2010; Golokhvast, 2014; Ackermann et al., 2014). На даний час залишаються нез'ясованими питання щодо цих типів мінливості на фізіологічному, онтогенетичному та екологічному рівнях, потребують детального вивчення процеси накопичення Si в органах рослин різного екоморфотипу, які розкривають механізми фізіологічної і онтогенетичної мінливості в часі та просторі еволюційного розвитку (Katz, 2020; Zhu & Gong, 2014). Крім того, недостатньо досліджено функціональну роль кремнію у формуванні екосистем і управлінні процесами ґрунтоутворення.

Відомо, що кремній підвищує стійкість рослин до стрес-факторів, зокрема посухи та засолення (Coskun, et al., 2016; Wilkinson, 2000; Munns, 2002; 2003). Si сприяє розвитку коренів і покращує поглинання води, за рахунок чого рослини підтримують продихову провідність (Steudle & Peterson, 1998). Хоча механізми та форми Si, які задіяні в цих процесах, до кінця не з'ясовані, однак накопичення кремнію в стінках епідермальних клітин частково покращує поглинання води (Gao et al., 2006). Кремній, присутній у клітинній стінці, також задіяний у регуляції руху та провідності продихів і в такий спосіб управляє втратами води через продихи (Gao et al., 2004; Agarie et al., 1999; Shakoор, 2014). Підкутикулярний шар Si зменшує втрати води з кутикули на 23%. Отже, кремній у розчинній формі активізує внутрішні фізіологічні механізми, які пом'якшують окислювальне пошкодження поверхні, викликане посухою, і призводять до зростання швидкості процесів фотосинтезу (Shen et al., 2010; Thorne et al. 2020; Wang et al., 2019; Gong et al., 2005; Detmann et al., 2012; Agarie et al., 1996). Зокрема, епідермальні фітоліти діють як призми, що збирають більше світла у мезофілі. Крім того, аморфний кремнезем у ґрунті збільшує його водоутримуючу спроможність та відповідне зростання надходження води до рослин.

Потребує детального аналізу функціональна роль кремнію у захисті рослин від патогенів та шкідників, яка полягає як у відштовхуванні, так і в перешкоджанні їхнього проникнення в тканини. Фізичне відштовхування, пов'язане з трихомами і короткими епідермальними клітинами, які містять кремній, відбувається за рахунок зростання шорсткості поверхні листка. Якщо відштовхування не відбувається або недостатньо ефективно, кремній попереджає проникнення фітопатогенів у рослинні тканини завдяки фітолітам епідермальних клітин і армованих Si клітинних стінок (Kvedaras et al., 2007; Grime et al., 1968; Samuels et al., 1991; 1994; Hall et al., 2020; Li et al., 2018).

З огляду на багаточисленні фізичні, хімічні та фізіологічні функції кремнію у життєдіяльності рослин, а також переваги, які отримують рослинні організми за його присутності, постає питання щодо спроможності Si частково заміщувати вуглець. Відомо, що Si в рослинах компенсується за рахунок лігніну, целюлози, фенолів і поживних речовин (Neu et al., 2017; Schaller et al., 2012). Показано, що трави накопичують меншу кількість Si за більш високих концентрацій CO₂ в повітрі (Carey & Fulweiler, 2012; Maguire et al., 2017). Хоча для інших видів рослин, зокрема для цукрової тростини та деяких видів дерев, які накопичують кремній, виявленої тенденції щодо атмосферного вуглецю не встановлено (Hartley & DeGabriel, 2016). Відсутня також інформація щодо відмінностей у накопиченні Si у рослин з різним вуглецевим метаболізмом, зокрема C₃ і C₄ (Cooke & Degabriel, 2016).

Мінеральне вивітрювання – це кінцеве джерело Si в наземних екосистемах, яке знаходиться під контролем клімату, ґрунтових умов та рослинності (Cornelis et al., 2010; Opfergelt et al., 2009). Розчинення мінералів відбувається значно повільніше, ніж аморфного кремнезему, зокрема фітоліти в 10²-10⁴ рази більш реактивні порівняно з глинистими мінералами і первинними силікатами при рН ґрунту в межах 4-8 (Dürr, et al., 2011). Біодоступний кремній накопичується, в основному, в біомасах лісів (11,7 Тмоль

рік⁻¹), степів (13,3 Тмоль рік⁻¹), агроценозів (29,4 Тмоль рік⁻¹), що складає від загальної кількості Si у всіх наземних екосистем 84 Т моль рік⁻¹ (Müller, et al., 2013). Антропогенний вплив безпосередньо впливає на колообіг Si через інтенсифікацію землекористування в результаті змін властивостей ґрунту і рослинності (Vandevenne, et al., 2015 a,b; Clymans et al., 2011).

Викиди парникових газів та кліматичні зміни мають негативний вплив на потоки кремнію, зокрема загальний аморфний пул Si в ґрунтах помірної зони зменшився близько 10% за останні 5000 років через людську діяльність (Sommer et al., 2013). А враховуючи те, що аморфний кремнезем підвищує водоутримуючу спроможність ґрунтів, безпосередньо впливає на доступність елементів мінерального живлення та органічних сполук, забезпечує стійкість рослин до абіотичних і біотичних стрес-факторів, питання оптимізації запасів біогенного Si набуває величезної актуальності. Необхідно зауважити, що концентрація аморфного кремнію значно нижча в ґрунтах сільськогосподарського призначення порівняно з природними лісовими і степовими екосистемами. Це пов'язано з виносом Si врожаєм (Meunier et al., 2008; Vandevenne et al., 2012; Schaller & Puppe, 2021), хоча деякі технології спроможні збільшити його доступність з ґрунту, зокрема в результаті підпалів (Haynes, 2019), використання кремнієвмісних добрив (Ehrenberg, 1854) або вапнування (Savant et al., 1996).

У глобальному масштабі близько 35% Si накопичується у сільськогосподарській продукції, і ця цифра буде збільшуватися з нарощуванням виробничих потужностей упродовж наступних десятиліть. На противагу природним екосистемам, в яких великі об'єми Si надходять з опадом, щорічні його втрати в агроценозах не компенсуються. При цьому, цілеспрямоване управління циклом кремнію за рахунок використання кремнієвмісних добрив і рослинних решток може бути багатообіцяючою стратегією як для запобігання втрат Si в системі рослина-ґрунт, так і для

підвищення стійкості сільськогосподарських культур до стрес-факторів різної етіології, а також посилення секвестрації вуглецю в біогеоценозах для пом'якшення змін клімату (Li et al., 2018). Депонування вуглецю в ґрунтах сільськогосподарських угідь може бути забезпечене за рахунок регулювання вивітрювання (внесення кремнієвмісних мінералів), органічної стабілізації С (використання кремнієвмісних добрив і біовугілля) та фітолітокислювального вуглецю (повернення рослинних решток).

Доведено, що підвищення рН ґрунту через періодичне вапнування збільшує розчинність аморфного кремнезему та є основним фактором зростання поглинання Si рослинами (Puppe et al., 2021). Водночас, доступність кремнію визначається складною взаємодією різних чинників, тому позитивна роль вапнування на рухливість Si потребує більш детальних досліджень.

Довготривалі польові експерименти засвідчили, що близько 40-60% кремнію можна заощадити в ґрунті за рахунок внесення трансформованих рослинних решток (Kaczorek et al., 2019; Puppe et al., 2021). Внесення рослинних відходів, особливо соломи, сприяє збільшенню вмісту фітолітів за умови одночасного додаткового внесення кремнієвмісних добрив, перетворюється на багатообіцяючу стратегію для відновлення родючості ґрунтів і підвищення стійкості рослин у сучасних реаліях сільськогосподарського виробництва. Внесення мінеральних добрив, а також надходження органічної речовини при трансформації рослинних решток сприяє підвищенню мобілізації Si в ґрунті та призводить до його накопичення у біомасі рослин (Carey & Fulweiler, 2012). З'ясовано, що комбіноване добриво Si-P збільшує концентрацію доступного для рослин кремнію і забезпечує більш високу продуктивність та зростання фітолітів у біомасі. При цьому, взаємодія Si-P у системі ґрунт-рослина обумовлена складними біохімічними процесами, які, на жаль, практично не вивчені (Ma et al., 1991).

Потребує всебічного дослідження питання узгодженості між поглинанням Si рослинами, їхнього філогенетичного положення з факторами довкілля (Prychid et al., 2003). Крім того, необхідно зауважити, що концентрація фітогенного кремнезему в лісових ґрунтах залежить від обсягу рослинних решток, які надходять в ґрунт, і втрати фітолітів через вирубку дерев, ерозію, переміщення і розчинення (Cornelis et al., 2010; Opfergelt et al., 2009; Maguire et al., 2017). У цьому випадку надходження фітолітів обумовлене не лише опадом, але й хімічним складом корневих ексудатів (Turpault et al., 2018; Puppe & Leue, 2018). Вирубка лісів, ерозії та пожежі призводять до великих втрат Si, зменшуючи концентрацію аморфного кремнезему, хоча рослини здатні активно підвищувати біодоступність кремнію в результаті біовивітрювання (Hinsinger, 2001; Gattullo et al. 2016; Puppe, 2020.).

Біодоступність кремнію в ґрунті контролюється трьома ключовими факторами: 1) концентрацією Si в ґрунтовому розчині; 2) запасами в твердій фазі (педогенний, біогенний, адсорбований або з добрив); 3) сорбційною спроможністю ґрунту утримувати Si (Savant et al., 1996; Crusciol et al., 2018). На даний час фактично не існує загальної стандартної процедури для оцінки доступного для рослин Si у ґрунтах, оскільки наявна інформація стосується дуже обмеженого переліку культур, розглядається з позиції різних ґрунтово-кліматичних умов їхнього вирощування. Для отримання реальних відомостей щодо доступності Si в природних екосистемах і агроценозах необхідно отримати узагальнюючі відомості стосовно стану кремнію в ґрунтах (його концентрація, кількість і якість твердих біогенних та педогенних фаз Si, збереження доступних для рослин форм, впливу клімату й рослинності) і результати лабораторних та польових експериментів для виявлення факторів впливу на доступність Si у різних ґрунтах, баланс колооберту Si в системі рослина-ґрунт.

Через багаточисленну функціональну роль Si та переваги, які цей елемент надає, доречно зауважити, що кремній впливає на пристосування

рослин до стрес-факторів, міжвидової взаємодії рослина-ґрунт і рослина-рослина, а отже задіяний у структурно-функціональну організацію біогеоценоза загалом. Дані, яким чином Si впливає на міжвидову конкуренцію фрагментарні, але не були дослідженими питання конкуренції за кремній між сільськогосподарськими культурами і бур'янами.

Конкретних доказів того, що Si виконує важливу роль в управлінні структурою екосистеми, а також впливає на її функціональне значення, досі немає. Тому, особливої актуальності набувають міждисциплінарні дослідження, пов'язані з розробкою стандартного протоколу для оцінки біодоступності Si; з'ясування механізмів, які підвищують стійкість рослин і визначення його ролі в структурно-функціональній організації екосистем різного ієрархічного рівня.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Відбір зразків та алелопатичний аналіз ґрунту. Зразки ґрунту відбирали у ювенільній, генеративній та постгенеративній фазах рослин ріжю, гірчиці та ріпаку. Контролем слугував ґрунт за межами дослідних ділянок.

Алелопатичний аналіз ґрунту здійснювали методом прямого біотестування з використанням проростків крес-салату (*Lepidium sativum* L.) й амаранту (*Amaranthus paniculatus* L.) як тест-об'єктів (Сучасні методи ..., 2021).

Алелопатичну активність гідрофільних сполук ґрунту вивчали методом біологічних проб за допомогою проростків огірка (*Cucumis sativus* L.) як рослини-акцептора (Сучасні методи ..., 2021). Цитостатичну дію гідрофільних сполук ґрунту досліджували шляхом підрахунку кількості бічних коренів проростків *C. sativus* (Сучасні методи..., 2021).

Мікробіологічний аналіз ґрунту. Мікробіологічні дослідження здійснювали методом посіву ґрунтових суспензій у відповідних розведеннях на селективні агаризовані живильні середовища згідно загальноприйнятих у

мікробіології методик (Сучасні методи ..., 2021; Радченко та ін., 2011; Андреюк та ін., 2001). Мікроміцети враховували на середовищі Чапека, актиноміцети – на крохмаль-аміачному агарі (КАА), амоніфікатори – на м'ясо-пептонному агарі (МПА), мікроорганізми, що споживають переважно мінеральні сполуки азоту – на КАА.

Біохімічний аналіз рослинного матеріалу. Вміст фотосинтетичних пігментів (хлорофілів і каротиноїдів) в листках рослин визначали спектрофотометрично на приладі Specord 2000 (Analytic Jena, 2003 р.). Виміри проводили за довжини хвиль 644 нм (хлорофіл *a*), 662 нм (хлорофіл *b*) і 440 нм (каротиноїди) відповідно (Wellburn, 1994). Екстракцію пігментів здійснювали DMSO (диметилсульфоксид) протягом 4 годин у термостаті за температури 70°C згідно методики (Hiscox & Israelstam, 1979).

Флавоноїди екстрагували 70%-ним етанолом зі свіжозібраних листків упродовж доби в холодильнику. Кількісний вміст флавоноїдів визначали спектрофотометрично на приладі Specord 2000 (Analytic Jena, 2003 р.) за довжини хвилі 410 нм, застосовуючи якісну реакцію з 2%-ним розчином $AlCl_3$ у 98%-ному етанолі (Сучасні методи..., 2021). Антоціани екстрагували 96%-ним етиловим спиртом з 1%-ним вмістом хлористо-водневої кислоти. Кількісний вміст визначали спектрофотометрично на приладі Specord 2000 (Analytic Jena, 2003 р.) за довжини хвилі 546 нм (Сучасні методи ..., 2021). Таніни екстрагували киплячою дистильованою водою з наступним настоюванням на водяній бані протягом години. Кількісний вміст визначали шляхом титрування 0,1% розчином перманганату калію суміші відфільтрованого екстракту з індигокарміном (Мардар та ін., 2008).

Для аналізу ендогенних брасиностероїдів проводили екстракцію з рослинних зразків у два етапи: перший етилацетат (3 рази по 5 мл) з водної витяжки тканин (1 г тканини + 5 мл екстракції розчину). Фракцію з етилацетатом упарювали у вакуумі та екстрагували залишок циклогексаном

(5мл). Другий етап екстракції проводили сумішшю етанол:вода (4:1). Екстракт етанолу упарювали у вакуумі, залишок розчиняли в невеликій кількості етилацетату. Виміри вмісту брасинопідів проводили на спектрофотометрі при довжині хвилі 450 нм (Kravets et al., 2011).

Біохімічний аналіз ґрунту. Зразки ґрунту висушували за кімнатної температури, просіювали через 2 мм сито. Тритерпеноїди та сапоніни екстрагували метанолом. Екстракт фільтрували, випарювали. Сухий залишок розчиняли у дихлорметані. Кількісний вміст тритерпеноїдів та сапонінів визначали із застосуванням кольорової реакції Саньє: з ваніліновим реактивом та концентрованою сульфатною кислотою на спектрофотометрі Specord 2000, за довжини хвилі 577 та 515 нм, відповідно (Сучасні методи ..., 2021).

Фенольні речовини виділяли з ґрунту методом іонного обміну (десорбції), використовуючи іонообмінник КУ-2-8 (H⁺) як модель кореневої системи з розчинюючою і поглинальною здатністю по відношенню до рухливих органічних сполук (Сучасні методи ..., 2021).

Агрохімічний аналіз ґрунту та рослинного матеріалу. Окисно-відновний потенціал (ОВП, редокс-потенціал) визначали потенціометричним методом за допомогою приладу pH/ORP Meter HI 2211 (Hanna Instruments, 2005 р.) в суспензії, яка моделює ґрунтовий розчин при співвідношенні ґрунту до дистильованої води 1:1 (Fiedler et al., 2007; Labuda, Vetchinnikov, 2011).

Біогенні елементи, які екстрагували з рослинних тканин та ґрунту, аналізували за відповідною методикою (Сучасні методи ..., 2021). Кількісний вміст визначали на оптичному емісійному спектрометрі з індуковано зв'язаною плазмою ICP 6300 DUO.

Результати та їх обговорення. У 2024 році досліджували післядію внесення кремнієвмісного добрива попереднього року на структурно-функціональну організацію ґрунтової екосистеми та фізіолого-біохімічні процеси у рослин рижію посівного с. Перемога (*Camelina sativa* (L.) Crantz f.

annua, cv. Peremoha), гірчиці ефіопської (*Brassica carinata* A. Braun) та ріпаку ярого с. з. Рімал (*Brassica napus* f. *annua* D.S., cv. s. Rimal).

Візуальна оцінка післядії внесення кремнієвмісного добрива на морфометричні показники досліджених капустяних видів показала, що рослини на дослідних ділянках раніше сходили та активніше відростали порівняно з контрольними ділянками на початку вегетації (рис. 8. 1). Спостереження протягом генеративного періоду розвитку виявили, що на тлі післядії добрива капустяні культури розвивали більш високу надземну частину з крупнішими листками та квітконосами (рис. 8. 2). Це свідчило про стимулювання фотосинтетичної продуктивності у рослин на оброблених ділянках. Порівняння насінневої продуктивності у рослин на тлі післядії добрива, а також у контролі виявило позитивний ефект від внесення кремнієвмісного добрива (рис. 8. 3).

Окреслені вище візуальні спостереження були підкріплені результатами фізіолого-біохімічних досліджень вмісту фотосинтетичних пігментів (хлорофілу *a*, *b* та каротиноїдів) в листках досліджених капустяних культур. Зокрема встановлено, що тенденція стимулювання кремнієвмісним добривом концентрації хлорофілів *a*, *b*, та каротиноїдів, яку спостерігали в 2023 році, збереглася і в 2024 році (табл. 8. 1).

Кількість цих пігментів є показником потенційної продуктивності рослин та їхньої здатності формувати біологічний урожай. Мінімальний вміст фотосинтетичних пігментів у листках досліджених рослин спостерігався в фазі ювенільного розвитку. Максимальний – у генеративній фазі. Найбільшу чутливість до впливу післядії кремнієвмісного добрива на фотосинтетичний апарат проявив ріпак, найменшу – гірчиця.



Рис. 8. 1. Вплив післядії кремнієвмісного добрива на ріст рослин рижію (1,2), гірчиці (3, 4) та ріпаку (5,6), ювенільна фаза онтогенезу. 1, 3, 5 – добриво вносилося у 2023 р. 2, 4, 6 – добриво не вносилося.

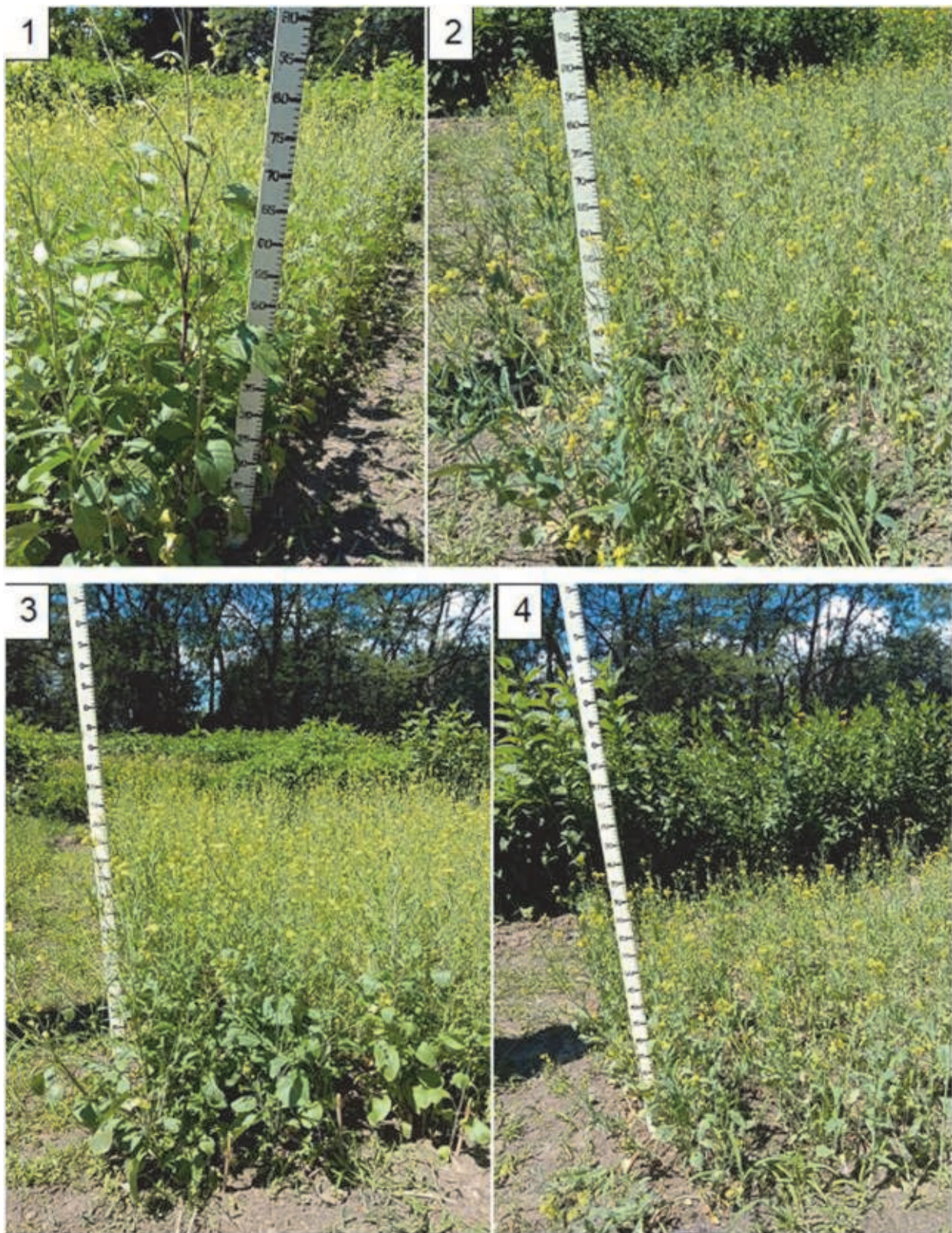


Рис. 8. 2. Вплив післядії кремнієвмісного добрива на ріст гірчиці (1, 2) та ріпаку (3, 4) у фазі цвітіння. 1,3– добриво вносилося у 2023 р.
2,4 – добриво не вносилося.

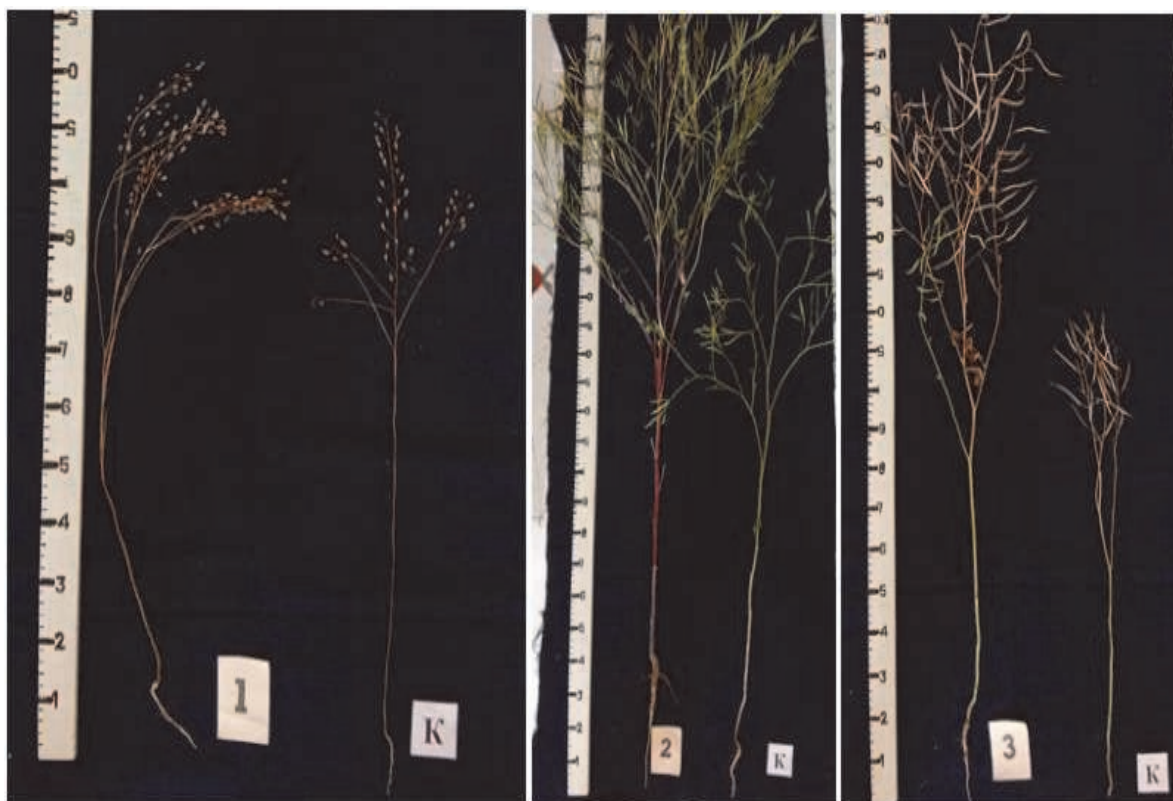


Рис. 8. 3. Вплив післядії кремнієвмісного добрива на формування насіння рижю (1), гірчиці (2) та ріпаку (3). 1, 2, 3 – добриво вносилося у 2023 р. К – добриво не вносилося.

Таблиця 8. 1

Вміст фотосинтетичних пігментів у листках рижю, гірчиці та ріпаку на тлі післядії кремнієвмісного добрива і в контролі, мг/г сухої маси (середнє арифметичне $\pm$ стандартна похибка)

Культура	Фаза онтогенезу	Хлорофіл <i>a</i>		Хлорофіл <i>b</i>		Каротиноїди	
		контроль	добриво	контроль	добриво	контроль	добриво
Рижій	Ювенільна	0,68 $\pm$ 0,02	0,84 $\pm$ 0,01	0,24 $\pm$ 0,02	0,26 $\pm$ 0,01	0,11 $\pm$ 0,01	0,13 $\pm$ 0,01
	Генеративна	1,15 $\pm$ 0,03	1,31 $\pm$ 0,02	0,29 $\pm$ 0,01	0,33 $\pm$ 0,01	0,22 $\pm$ 0,01	0,25 $\pm$ 0,01
Гірчиця	Ювенільна	0,78 $\pm$ 0,03	0,85 $\pm$ 0,03	0,26 $\pm$ 0,01	0,29 $\pm$ 0,01	0,15 $\pm$ 0,02	0,17 $\pm$ 0,01
	Генеративна	1,21 $\pm$ 0,02	1,28 $\pm$ 0,01	0,31 $\pm$ 0,02	0,35 $\pm$ 0,01	0,28 $\pm$ 0,01	0,31 $\pm$ 0,02
Ріпак	Ювенільна	0,85 $\pm$ 0,03	0,96 $\pm$ 0,02	0,33 $\pm$ 0,02	0,38 $\pm$ 0,02	0,27 $\pm$ 0,01	0,29 $\pm$ 0,01
	Генеративна	1,25 $\pm$ 0,02	1,44 $\pm$ 0,01	0,45 $\pm$ 0,01	0,52 $\pm$ 0,02	0,44 $\pm$ 0,02	0,51 $\pm$ 0,02

Результати аналізу вмісту вторинних метаболітів (флавоноїдів, антоціанів, танінів) у листках дослідних видів у 2024 році показали, що післядія внесення кремнієвмісних добрив відбилась і на цих показниках

(табл. 8.2). Проте, на відміну від 2023 року, добрива стимулювали синтез флавоноїдів і танінів, особливо у фазі ювенільного розвитку. Натомість вміст антоціанів був нижчим за 2023 рік, тож достовірно не відрізнявся між дослідними та контрольними варіантами.

Таблиця 8. 2

Вміст флавоноїдів (мг/г сух. маси), антоціанів (% до сух. маси) та танінів (% до сух. маси) у листках рижію, гірчиці та ріпаку на тлі післядії кремнієвмісних добрив (середнє арифметичне $\pm$ стандартна похибка)

Культура	Період онтогенезу	Флавоноїди		Антоціани		Таніни	
		контроль	добриво	контроль	добриво	контроль	добриво
Рижій	Ювенільна	12,6 $\pm$ 0,21	18,7 $\pm$ 0,24	0,09 $\pm$ 0,01	0,08 $\pm$ 0,01	12,2 $\pm$ 1,1	10,0 $\pm$ 0,6
	Генеративна	20,8 $\pm$ 0,27	25,0 $\pm$ 0,21	0,11 $\pm$ 0,02	0,09 $\pm$ 0,01	10,2 $\pm$ 0,8	9,4 $\pm$ 0,4
Гірчиця	Ювенільна	21,2 $\pm$ 0,28	26,9 $\pm$ 0,24	0,06 $\pm$ 0,01	0,07 $\pm$ 0,02	16,4 $\pm$ 0,9	16,3 $\pm$ 0,7
	Генеративна	27,1 $\pm$ 0,27	34,4 $\pm$ 0,29	0,08 $\pm$ 0,01	0,08 $\pm$ 0,01	12,3 $\pm$ 0,6	10,6 $\pm$ 0,8
Ріпак	Ювенільна	15,9 $\pm$ 0,26	17,0 $\pm$ 0,20	0,05 $\pm$ 0,01	0,06 $\pm$ 0,02	19,1 $\pm$ 0,8	10,1 $\pm$ 0,6
	Генеративна	20,3 $\pm$ 0,24	17,9 $\pm$ 0,22	0,04 $\pm$ 0,01	0,04 $\pm$ 0,01	14,3 $\pm$ 0,9	9,6 $\pm$ 0,8

Вміст флавоноїдів є одним із найбільш чутливих біохімічних показників до факторів оточуючого середовища. Крім того, цей показник корелює з основними фізіологічними процесами, такими як фотосинтез, мінеральне живлення, обмін білків та вуглеводнів. У зв'язку з цим вміст флавоноїдів вважається маркером успішності акліматизації та стійкості рослин до несприятливих факторів середовища (Калита, 2013). Зростання вмісту флавоноїдів й фотосинтетичних пігментів свідчить про підвищення системної стійкості досліджених капустяних культур на тлі післядії кремнієвмісного добрива. Цей висновок підтверджує зниження вмісту антоціанів у листках дослідних рослин порівняно з контролем (Chalker-Scott, 1999).

Таніни також беруть участь у захисних реакціях рослин до біотичного та абіотичного стресів, а також регулюють ріст і розвиток у рослин (Григорюк & Нестерова, 2017). Механізм їхньої дії на рослинний організм остаточно не з'ясований, проте відомо, що вони можуть гальмувати розпад ІОК, а також

виступати у ролі антагоністів та регуляторів гіберелінів (Григорюк & Нестерова, 2017). Сезонна динаміка вмісту танінів в листках ріжю, гірчиці й ріпаку була схожою і характеризувалась максимумом у ювенільній фазі, з наступним зниженням у генеративній фазі. Таку тенденцію можна пояснити фенологічними змінами, пов'язаними зі зниженням інтенсивності ростових процесів та активізацією синтезу гормонів гіберелінів. Післядії кремнієвмісного добрива проявлялась протягом 2024 року в суттєвому зниженні вмісту танінів у листках досліджених капустяних культур. Слід зазначити, що подібну тенденцію спостерігали у 2023 році. Суттєве зниження вмісту танінів у листках рослин на тлі післядії кремнієвмісного добрива підтверджує зниження напруженості стресового стану і більш активне протікання ростових процесів.

Брасиностероїди (BR) — це клас полігідроксильованих стероїдних рослинних гормонів, що беруть участь у широкому діапазоні фізіологічних, біохімічних та молекулярних реакцій рослин, таких як проростання насіння, поділ і подовження клітин, диференціація судин, морфогенез, фотосинтез, активація ферментів і старіння. Вміст брасиностероїдів у листках та зелених плодах гірчиці, ріпаку та ріжю визначали у постгенеративній фазі. Післядії кремнієвмісного добрива у 2024 році виявилась у зростанні вмісту BR у листках (різницю розраховували за формулою $\Delta_{BR} = ((BR_{Si} - BR_{Ctrl})/BR_{Ctrl}) * 100\%$). Найбільше стимулювання зафіксовано у листках рослин та зелених плодах ріжю, а найнижче — у гірчиці (табл. 8.3). Варто відмітити, що окреслена тенденція співпадає результатами, які спостерігали у 2023 році. Зростання вмісту маркерів системної стійкості рослин, таких як брасиностероїди і флавоноїди — на тлі післядії кремнієвмісного добрива — свідчить про індуковану кремнієм резистентність культурних рослин до несприятливих умов середовища.

Таблиця 8. 3

Вміст брасиностероїдів у листках (нг/г сухої речовини) протягом генеративного періоду онтогенезу рослин рижію, гірчиці та ріпаку

Культура	Добриво	Контроль	Δ_{BR} , % від К
Рижій	429,53±6,31	387,73±6,43	10,79±0,19
Гірчиця	417,34±7,39	397,16±7,52	5,09±0,07
Ріпак	383,18±7,51	357,55±6,79	7,22±0,13

Аналіз ґрунту ризосфери на дослідних ділянках на початковому етапі розвитку рослин засвідчив більш високий рівень біогенних елементів у ґрунтовому розчині на тлі післядії кремнієвмісного добрива (табл. 8.4).

Таблиця 8.4

Вплив післядії кремнієвмісного добрива на розподіл макро- і мікроелементів у ґрунті протягом ювенільного періоду онтогенезу рослин рижію, гірчиці та ріпаку, мг/кг

Елемент	Культура						Конт-роль	НІР
	рижій		гірчиця		ріпак			
	добриво	К	добриво	К	добриво	К		
Ca	13990	10100	13770	11010	11120	10015	11130	106,4
Mg	3556	3082	3816	1576	4235	2451	1514	17,2
Fe	17760	21580	19670	21920	18840	38830	19590	188,3
K	7096	6150	7322	6709	9126	6756	7322	74,4
P	42,6	28,3	53,9	33,6	30,7	25,1	24,2	4,2
S	761,5	615,0	775,1	720,3	702,6	458,1	705,4	6,5
Mn	141,5	168,3	151,7	170,7	167,3	298,5	160,2	1,8
Si	1399	1106	1790	1439	1240	1096	1027	1,7
Zn	21,9	17,1	20,3	19,2	18,4	11,7	17,9	0,6
Cu	12,8	9,5	13,1	12,3	12,7	6,8	9,2	0,8
B	1,08	0	0,27	0	0,51	0	0,27	0,1
Co	3,1	2,5	3,0	2,4	2,9	1,8	2,2	0,3

Примітка: К – без внесення добрива. НІР – найменш істотна різниця

Зокрема, зростали концентрації Ca, Mg, P, Cu, Zn, Co, Si, B, S. Тоді як концентрація біодоступних катіонів токсичних металів Al, Fe, Cr, Cd, Ti, Sr зменшувалася (табл. 8.5).

Таблиця 8. 5

Вплив післядії кремнієвмісного добрива на вміст катіонів металів у ґрунті протягом ювенільного періоду онтогенезу рослин ріжю, гірчиці та ріпаку, мг/кг

Еле- мент	Культура						Конт- роль	НІР
	рижій		гірчиця		ріпак			
	Добриво	К	Добриво	К	Добриво	К		
Al	16020	17300	16710	18600	17390	30670	17960	154,3
Cd	0,93	1,25	0,74	1,68	0,42	0,85	1,04	0,1
Cr	12,9	13,8	13,5	14,7	14,4	25,9	14,2	0,3
Na	634,7	703,6	665,3	736,1	699,5	1322,0	795,2	6,4
Ti	236,9	275,1	237,2	311,4	274,2	435,8	327,5	3,4
Sr	42,1	50,5	49,4	52,8	39,9	1,6	43,7	0,3

Примітка: К – без внесення добрива. НІР – найменша істотна різниця

Заслужують на увагу результати щодо суттєвого зростання концентрації катіонів кремнію в ґрунті ризосфери оброблених ділянок, в середньому в 1,2-1,4 рази, порівняно з необробленими. Отримана залежність свідчить про формування пулу аморфного кремнезему в ґрунті ризосфери рослин ріжю, гірчиці та ріпаку. Аморфний кремнезем відомий своєю гідрофільністю та високою сорбційною ємністю, особливо до мікроорганізмів, білків, катіонів металів, а також низки високомолекулярних та низькомолекулярних органічних речовин, зокрема фенольних сполук, які відзначаються високим алелопатичним потенціалом (Носач & Гнатишин, 2003). Аморфний кремнезем у ґрунті ризосфери перешкоджає вимиванню біогенних елементів протягом холодного періоду року, створює сприятливе середовище для розвитку агрономічно-корисної мікрофлори та мікрофауни.

Найвищий вміст аморфного кремнезему зареєстровано у ґрунті ризосфери гірчиці на тлі післядії кремнієвмісного добрива, найменший – під ріпаком. Це може бути пов'язано з підвищенням активності лакази і швидкої деструкцією лігніновмісних рослинних решток, про що свідчить зростання пулу розчинних органічних речовин у ґрунті під ріпаком (табл. 8.6).

Таблиця 8. 6

Вплив післядії кремнієвмісного добрива на вміст лабільних форм Гумусу в ґрунті та активність лакази протягом ювенільного періоду онтогенезу рослин рижію, гірчиці та ріпаку, мг/кг

Культура	Варіант	Лабільні форми Гумусу, %	Активність лакази, mU/г ґрунту
Рижій	Добриво	6,2	111,63
	К	5,1	104,71
Гірчиця	Добриво	5,0	115,32
	К	4,8	103,87
Ріпак	Добриво	6,5	127,53
	К	4,2	107,55
Контроль		5,0	101,62

Примітка: К – без внесення добрива

Слід зазначити, що вміст аморфного кремнезему негативно корелював із вмістом біодоступного заліза, оскільки останній задіяний у формуванні аморфного кремнезему, втрачаючи при цьому свою біодоступність.

Зростання вмісту кремнію в ґрунті з-під рижію і гірчиці супроводжувалося підвищенням концентрації біодоступних кальцію і фосфору в 1,3-1,6 рази (див. табл. 8.4). Крім того, на тлі післядії кремнієвмісного добрива спостерігається зростання показників рН, що також може свідчити про формування фітолітів, які оптимізують структурно-функціональну організацію ґрунтової екосистеми і позитивно впливають на стійкість рослин до стрес-факторів, у першу чергу, посухи (табл. 8. 7).

Таблиця 8. 7

Вплив післядії кремнієвмісного добрива на показники рН, електропровідності та концентрації HCO_3^- у ґрунті протягом ювенільної фази розвитку рослин рижію, гірчиці та ріпаку, мг/кг

Культура	Варіант досліджу	pH сол.	HCO_3^- , мг-екв./л H_2O	Електропровідність, $\mu\text{S}/\text{cm}$
Рижій	Добриво	7,10	0,31	215
	К	6,84	0,42	183
Гірчиця	Добриво	7,15	0,28	192
	К	6,78	0,41	158
Ріпак	Добриво	7,05	0,24	169
	К	6,80	0,40	144
Контроль		6,79	0,42	197
НІР		0,12	0,02	16,44

Примітка: К – без внесення добрива. НІР – найменш істотна різниця

Підтвердженням цьому є результати з оцінювання вмісту елементів мінерального живлення в рослинах протягом генеративного періоду (табл. 8.8).

Таблиця 8. 8

Вплив післядії кремнієвмісного добрива на вміст біогенних елементів в листках ріжій, гірчиці та ріпаку протягом генеративної фази розвитку рослин, мг/кг

Елемент	Культура						НІР
	ріжій		гірчиця		ріпак		
	добриво	К	добриво	К	добриво	К	
Ca	22910	21280	34980	27180	34920	30156	204,3
Mg	2159	2021	2912	2175	3507	3178	28,5
Fe	396	323	331	284	404	270	3,4
K	22920	21000	27000	17300	21352	20091	188,4
P	19,3	17,8	18,9	17,3	31,5	24,9	0,3
S	6242	5944	5808	4588	7695	7405	39,4
Mn	19,0	17,8	27,2	17,1	36,3	29,4	35,5
Si	637	558	522	403	879	536	86,2
Zn	27,8	25,1	25,3	22,8	33,8	20,9	1,3
Cu	13,9	12,8	10,2	9,6	8,9	8,0	0,4
B	22,7	21,3	22,1	19,8	27,8	20,1	1,8
Co	0,40	0,32	0,38	0,30	0,43	0,37	0,01

Примітка: К – без внесення добрива. НІР – найменш істотна різниця

За присутності кремнієвмісного добрива суттєво зростає надходження макро- і мікроелементів, зокрема: Ca, Mg, P, S у 1,1-1,3 рази; K, Si, Zn, Mn і Fe – в середньому у 1,1-1,6 рази. Отримана залежність, з одного боку, пояснюється позитивним впливом біогенного кремнію на збалансованість мінерального режиму ґрунту, з іншого – зниженням процесів гумусоутворення та формуванням стабільних форм Гумусу, про що свідчить зменшення активності лакази та вмісту лабільних форм Гумусу (табл. 8.9).

Таблиця 8. 9

Вплив післядії кремнієвмісного добрива на вміст лабільних форм Гумусу в ґрунті та активність лакази протягом генеративної фази розвитку рослин рижю, гірчиці та ріпаку, мг/кг

Культура	Варіант	Лабільні форми Гумусу, %	Активність лакази, mU/г ґрунту
Рижій	Добриво	5,7	105,74
	К	4,8	101,56
Гірчиця	Добриво	5,1	107,96
	К	4,3	98,55
Ріпак	Добриво	5,9	119,35
	К	4,2	101,33
Контроль		4,1	93,62

Примітка: К– без внесення добрива. НІР – найменш істотна різниця

Отримана залежність пов'язана зі стабілізацією агрофізичних, агрохімічних і біологічних показників ґрунту, в результаті набуття системою врівноваженого стану. Необхідно зазначити, що зберігається минулорічна тенденція щодо зростання рівня HCO_3 у генеративній фазі, яке пояснюється підвищенням температури повітря (табл. 8. 10).

Таблиця 8. 10

Вплив післядії кремнієвмісного добрива на показники рН, електропровідності та концентрації HCO_3 у ґрунті протягом генеративної фази розвитку рослин рижю, гірчиці та ріпаку, мг/кг

Культура	Варіант	рН _{сол.}	HCO_3 , мг-екв./л H_2O	Електропровідність, $\mu\text{S}/\text{cm}$
Рижій	Добриво	7,05	0,41	218
	К	6,82	0,48	193
Гірчиця	Добриво	7,09	0,39	175
	К	6,76	0,48	146
Ріпак	Добриво	7,0	0,32	165
	К	6,81	0,44	152
Контроль		6,80	0,43	164
НІР		0,2	0,07	2,9

Примітка: К – без внесення добрива. НІР – найменш істотна різниця

Певні відмінності простежуються також у розподілі макро- та мікроелементів у ґрунті протягом генеративного періоду онтогенезу досліджених рослин (табл. 8. 11).

Таблиця 8. 11

Вплив післядії кремнієвмісного добрива на розподіл макро- і мікроелементів у ґрунті протягом генеративної фази розвитку рослин, мг/кг

Елемент	Культура						Кон- троль	НІР
	рижій		гірчиця		ріпак			
	добриво	К	добриво	К	добриво	К		
Ca	7208	6082	15680	5070	5712	1557	4159	57,4
Mg	1962	1792	4684	1718	1865	1658	1506	26,9
Fe	12130	11710	27930	10970	12090	10960	11360	123,5
K	2581	2116	6024	2081	2230	2015	1895	22,8
P	28,5	25,3	26,4	15,8	34,0	26,6	46,4	0,4
S	674,3	653,2	428,4	382,7	695,5	644,3	522,0	8,6
Mn	198,0	173,6	483,7	180,9	203,7	173,3	169,8	2,5
Si	1058	951	856	296	1023	906	724	9,8
Cu	15,1	13,4	13,1	7,7	15,2	12,3	10,7	0,8
B	12,8	7,5	7,7	4,8	6,9	5,6	5,3	0,1
Co	4,1	3,8	3,7	2,1	3,9	3,5	3,0	0,1

Примітка: К – без внесення добрива. НІР – найменш істотна різниця

У порівнянні з ювенільною фазою розвитку рослин у ґрунті зменшується вміст Ca, K, P, Si, S, Mg, хоча зберігається тенденція щодо більш високої концентрації у варіантах за внесення кремнієвмісного добрива. Для B, Mn, Zn, Co, Cu простежується протилежна закономірність, яка пояснюється набуттям ґрунтовою екосистемою керованих ознак за рахунок збалансованості хімічного складу. Підтвердженням цьому слугує зниження вмісту катіонів токсичних металів у ґрунті (табл. 8.12). Отже, формування пулу аморфного кремнезему в ґрунті дозволяє певним чином спрямовувати колообіг біогенних елементів в біогеоценозі, і таким чином керувати інформаційно-ресурсним потенціалом останнього.

Таблиця 8. 12

Вплив післядії кремнієвмісного добрива на вміст важких металів у ґрунті у генеративній фазі рослин, мг/кг

Елемент	Культура						Контроль	НІР
	рижій		гірчиця		ріпак			
	добриво	К	добриво	К	добриво	К		
Al	10960	11780	11030	24720	11025	14170	9527	98,9
Cd	0,53	0,84	0,10	0,50	0,46	0,59	0,52	0,1
Cr	16,2	17,6	16,1	41,7	16,3	26,5	14,1	1,2
Na	694,9	721,8	715,3	1814,7	692,6	824,4	547,1	8,2
Ti	270,4	281,5	274,7	679,2	271,2	315,6	217,5	7,4
Sr	31,3	37,4	33,7	84,2	30,4	38,9	31,1	1,4

Примітка: К – без внесення добрива. НІР – найменш істотна різниця

Протягом постгенеративного періоду розвитку дослідних рослин спостерігали суттєве зростання Ca, Mg і P в листках ріпаку, рижію та гірчиці на тлі післядії кремнієвмісного добрива порівняно з контрольними ділянками (табл. 8. 13).

Таблиця 8. 13

Вплив післядії кремнієвмісного добрива на вміст біогенних елементів в рослинах протягом постгенеративного періоду розвитку, мг/кг

Елемент	Культура						НІР
	рижій		гірчиця		ріпак		
	добриво	К	добриво	К	добриво	К	
Ca	11767	10460	14290	12830	17870	16750	158,4
Mg	1503	1399	1724	1470	2248	1631	33,3
Fe	392,7	438,2	192,9	326,7	81,5	99,4	9,8
K	16503	18566	1787	18210	11370	14890	176,4
P	89,6	71,9	111,1	86,3	138,7	108,9	8,4
S	6135	6257	8723	14000	7061	8179	124,3
Mn	17,9	14,8	16,1	11,3	12,3	10,8	0,1
Si	976	525	793	263	527	258	6,7
Zn	30,9	27,5	33,2	30,1	31,3	26,5	0,4
Cu	12,0	9,8	9,1	8,1	9,8	8,4	0,9
B	26,1	19,2	18,1	16,0	18,9	15,3	0,3
Co	0,65	0,52	0,42	0,37	0,41	0,35	0,1

Примітка: К – без внесення добрива. НІР – найменш істотна різниця

Таким чином, наприкінці вегетації, на тлі післядії кремнієвмісного добрива капустяні культури акумулювали у фітомасі такі важливі макроелементи, як Ca, Mg і P, депонуючи їх таким чином у ґрунті ризосфери. Крім того, у ґрунті ризосфери на тлі кремнієвмісного добрива істотно зростала активність лакази та вміст органічного вуглецю (табл. 8. 14). Відповідно знижувався вміст мінерального вуглецю, який є джерелом емісії вуглекислого газу в атмосферу (табл. 8. 15).

Таблиця 8. 14

Вплив післядії кремнієвмісного добрива на вміст лабільних форм Гумусу в ґрунті та активність лакази у постгенеративній фазі рослин

Культура	Варіант	Лабільні форми Гумусу, %	Активність лакази, mU/г ґрунту
Рижій	Добриво	5,4	93,54
	К	4,5	87,42
Гірчиця	Добриво	4,7	99,31
	К	4,0	86,56
Ріпак	Добриво	5,2	113,57
	К	3,9	88,73
Контроль		3,1	84,65

Таблиця 8. 15

Вплив післядії кремнієвмісного добрива на показники рН, електропровідності та концентрації HCO_3 у ґрунті у постгенеративній фазі рослин, мг/кг

Культура	Варіант	рН _{сол.}	HCO_3 , мг-екв./л H_2O	Електропровідність, $\mu\text{S}/\text{cm}$
Рижій	Добриво	7,0	0,30	155
	К	6,80	0,33	116
Гірчиця	Добриво	7,04	0,32	129
	К	6,78	0,35	109
Ріпак	Добриво	6,9	0,33	141
	К	6,70	0,39	128
Контроль		6,67	0,34	130
НІР		0,17	0,03	2,9

Примітка: К – без внесення добрива. НІР – найменш істотна різниця

Вміст сірки і заліза в рослинах ріпаку, гірчиці та ріжю, навпаки зменшувався на тлі післядії кремнієвмісного добрива. Зменшення надходження до рослин заліза, пов'язане з утриманням цього металу аморфним кремнеземом ґрунту внаслідок формування олігомерних зв'язків Si-O-Si. Зниження вмісту сірки у тканинах капустяних культур на тлі кремнієвмісного добрива супроводжувалось зростанням вмісту цього елементу у ґрунті ризосфери і може бути пов'язане зі зменшенням синтезу білку в кінці вегетаційного періоду.

Протягом постгенеративного періоду розвитку капустяних культур спостерігали незначне зниження активності лакази та вмісту лабільних форм Гумусу порівняно з генеративним та ювенільним періодами (див.табл. 8.6, 8.9 та 8.14). При цьому на тлі післядії внесення добрива, сезонні коливання цих показників були менш вираженими. Це свідчило про стабілізуючу роль аморфного кремнезему в ґрунтовій екосистемі. У зразках ґрунту ризосфери, відібраних протягом постгенеративного періоду розвитку рослин ріжю, ріпаку та гірчиці простежується зростання концентрації Ca, Si, Zn, S, K та Cu порівняно з попередньою фазою розвитку (табл. 8. 16).

Таблиця 8. 16

Вплив післядії кремнієвмісного добрива на розподіл макро- і мікроелементів у ґрунті у постгенеративній фазі рослин, мг/кг

Елемент	Культура						Контроль	НІР
	ріжій		гірчиця		ріпак			
	добриво	К	добриво	К	добриво	К		
Ca	10390	8051	7869	7159	8296	7344	5691	69,4
Mg	1677	1546	1257	1086	1469	1248	1410	18,8
Fe	6482	6592	4317	4561	5865	6441	6773	63,8
K	2877	2753	2513	1884	2475	2384	2771	34,5
P	17,8	17,0	15,9	10,1	18,7	15,0	26,6	0,9
S	1000	935	995	693	958	927	906	9,8
Mn	122,1	133,6	933	117,8	125,1	129,6	130,8	15,2
Si	1122	1083	1018	644	998	917	696	12,4
Zn	29,9	25,6	25,1	20,0	27,8	24,3	25,6	0,4
Cu	17,3	16,8	14,9	11,3	15,8	13,5	14,2	0,2
B	8,9	8,1	7,7	5,9	7,4	6,2	6,7	0,1
Co	4,5	3,8	4,1	3,0	4,3	3,7	3,6	0,1

Примітка: К – без внесення добрива. НІР – найменш істотна різниця

Вміст майже всіх мікроелементів, окрім заліза, в ґрунті ризосфери досліджених капустяних видів був вищим на тлі післядії кремнієвмісного добрива – порівняно з контрольними ділянками. Отримана залежність свідчить про кращі сорбційні властивості цього ґрунту, що створює сприятливіші умови для наступних посівів сільськогосподарських культур на цих ділянках. Таким чином, застосування кремнієвмісних добрив сприяє врівноваженості ґрунтової екосистеми та її спроможності до самоорганізації – відповідно до правила І. Пригожина. Підтвердженням цьому є також іммобілізація катіонів токсичних металів у ґрунті ризосфери за внесення кремнієвмісного добрива (табл. 8. 17).

Таблиця 8. 17

Вплив післядії кремнієвмісного добрива на вміст важких металів у ґрунті у постгенеративній фазі рослин, мг/кг

Елемент	Культура						Контроль	НІР
	рижій		гірчиця		ріпак			
	добриво	К	добриво	К	добриво	К		
Al	6035	6820	4872	6249	6183	6657	6479	65,8
Cd	0,02	0,21	0,01	0,17	0,08	0,32	0,24	0,1
Cr	8,3	12,8	8,6	12,0	10,5	14,8	12,2	0,2
Na	60,9	72,4	43,2	62,1	47,7	55,9	63,4	0,6
Ti	195,6	199,2	131,7	176,8	167,4	181,5	177,2	2,4
Sr	15,7	17,2	10,5	14,9	13,8	15,0	12,6	0,1

Примітка: К – без внесення добрива. НІР – найменш істотна різниця

Зокрема, слід відмітити факт різкого зниження в 1,4-4,1 рази вмісту марганцю в ґрунті ризосфери у постгенеративний період, що також вказує на оптимізацію окисно-відновних процесів у ґрунті та зменшення його токсичності.

Таким чином, отримані результати ілюструють перспективність застосування аморфного кремнію для управління структурно-функціональною організацією ґрунтової екосистеми.

Певні відмінності простежувались також при аналізі чисельності таксономічних і функціональних груп мікроорганізмів прикореневого ґрунту

під культурами ріжю, гірчиці та ріпаку. З'ясовано, що динаміка чисельності мікроміцетів на другий рік після внесення кремнієвих добрив не виявила чіткої залежності між варіантами дослідів на початку розвитку та у генеративній фазі (рис. 8. 4).

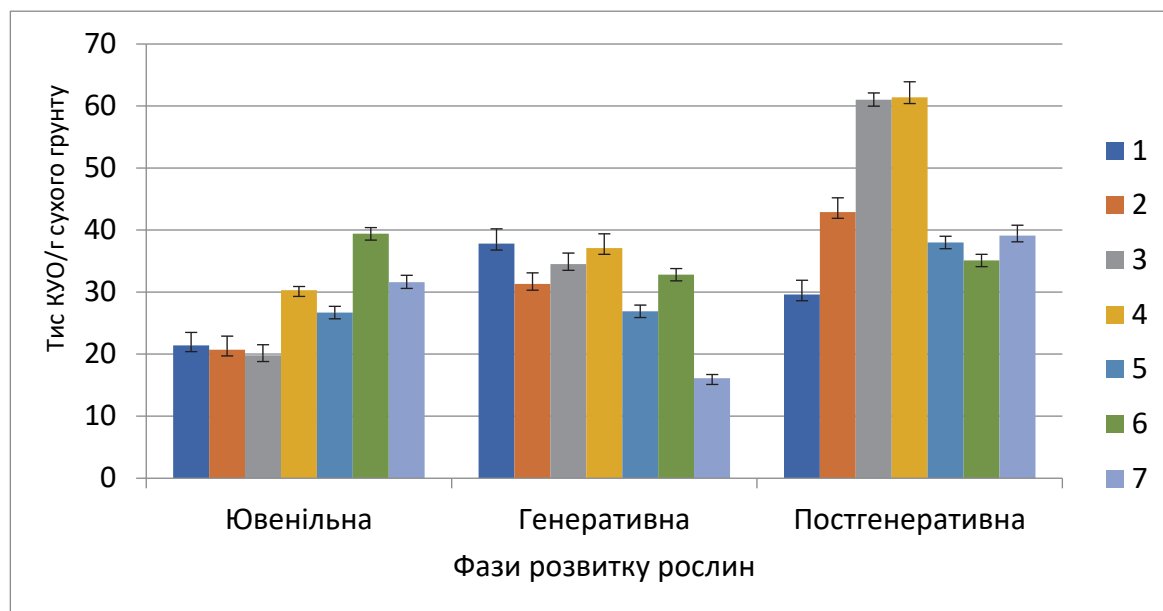


Рис. 8. 4. Чисельність мікроміцетів у ґрунті під культурами ріжю, гірчиці та ріпаку за внесення кремнієвмісних сполук: 1 – ріжій + кремній, 2 – ріжій, контроль, 3 – гірчиця + кремній, 4 – гірчиця, контроль, 5 – ріпак + кремній, 6 – ріпак, контроль, 7 – контроль ґрунту

На тлі післядії кремнієвмісного добрива зростала кількість грибів у ґрунті ризосфери гірчиці та ріпаку на 12-33 % порівняно з контрольними ділянками. При цьому спостерігали певні відмінності сезонної динаміки чисельності мікроміцетів – залежно від виду капустяної культури. Зокрема у ріжю та гірчиці максимальну чисельність грибів спостерігали протягом постгенеративного періоду, а в ґрунті під ріпаком – протягом генеративного періоду. При цьому, показники грибів у контрольному варіанті ріжю у постгенеративній фазі були вищими порівняно з дослідним варіантом в 1,4 рази (рис. 8. 5). Минулого року, за внесення кремнієвмісних добрив, мікроміцетів було більше у ґрунті ризосфери протягом ювенільної та постгенеративної фази розвитку ріжю. Для гірчиці та ріпаку минулорічний тренд сезонної динаміки цього показника зберігся і впродовж 2024 року.

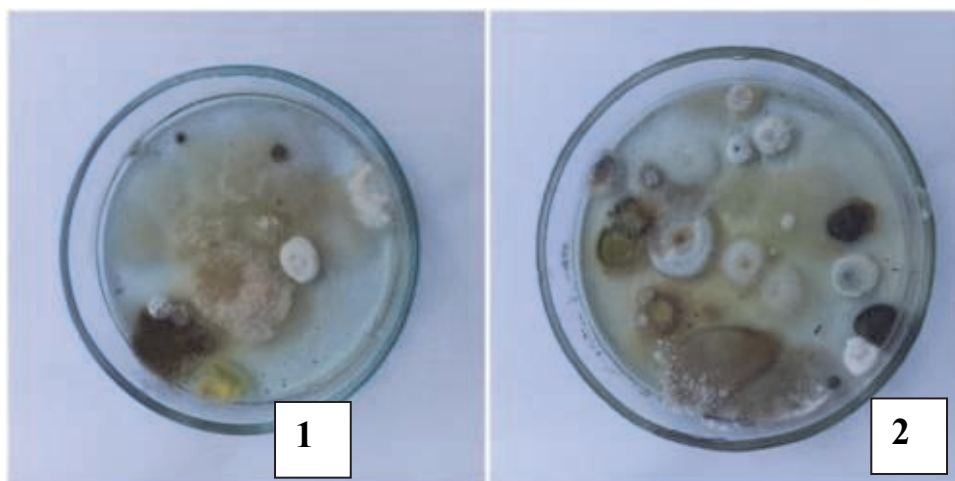


Рис. 8. 5. Ріст мікроміцетів на середовищі Чапека, ґрунт з-під ріжю протягом постгенеративного періоду розвитку: 1 – дослід (післядія за внесення кремнієвих добрив), 2 – контроль

Чисельність мікроорганізмів групи актиноміцетів також зростала на тлі післядії кремнієвмісних добрив порівняно з контрольними ділянками (рис. 8. 6). Особливо це було властиве для рослин гірчиці упродовж всього періоду розвитку, а для інших культур – протягом постгенеративного періоду (рис. 8. 6, 8. 7). Приріст до контролю складав 6,3 %, 72,7 % та 62,5 % відсотків відповідно.

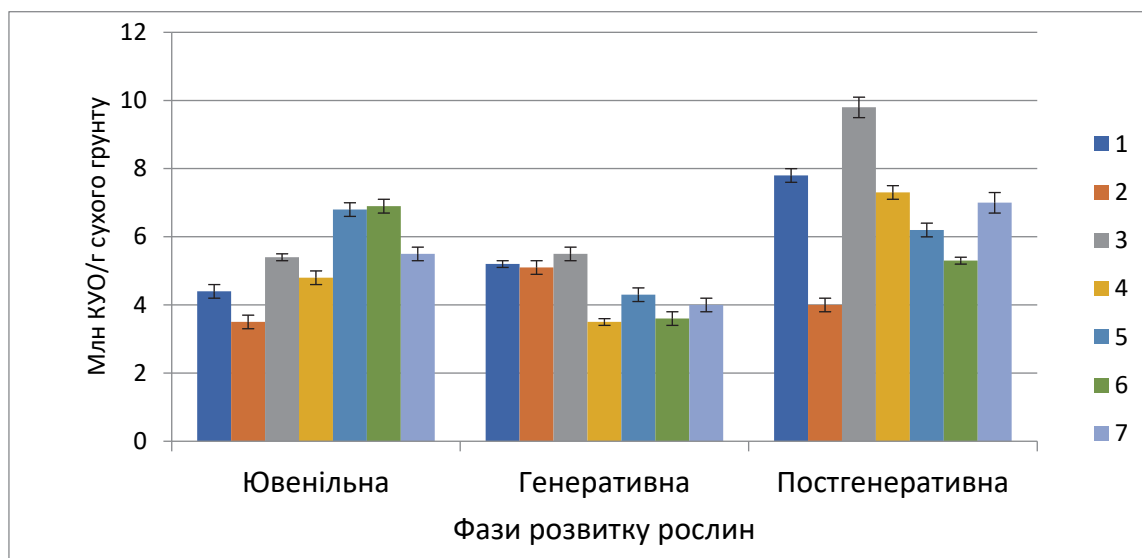


Рис. 8. 6. Чисельність актиноміцетів у ґрунті ріжю, гірчиці та ріпаку за внесення кремнієвмісних добрив: 1 – ріжій+кремній, 2 – ріжій, контроль, 3 – гірчиця+кремній, 4– гірчиця, контроль, 5 – ріпак+кремній, 6 – ріпак, контроль, 7 – контроль ґрунту

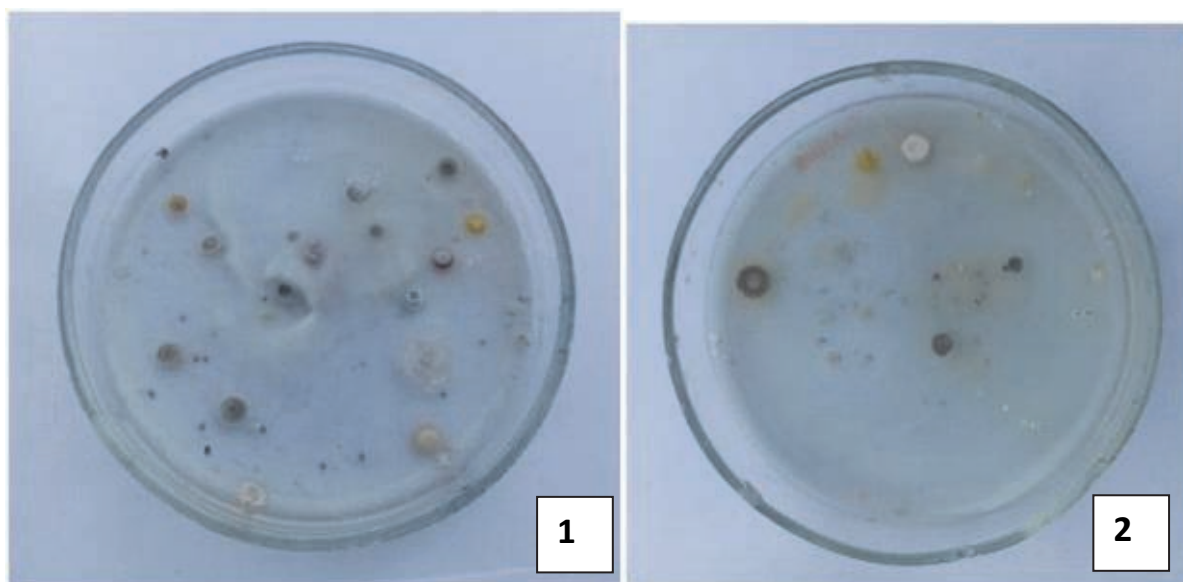


Рис. 8. 7. Ріст актиноміцетів та мікроорганізмів, що споживають мінеральний азот на середовищі КАА (крохмаль-аміачний агар) у ґрунті з-під гірчиці: постгенеративна фаза : 1 – дослід (післядія за внесення кремнієвмісних добрив), 2 – контроль

Мікроорганізми амоніфікатори на другий рік після внесення добрив розвивалися краще у ґрунті ризосфери всіх дослідних культур порівняно з контрольними ділянками (рис. 8. 8), найбільше – у постгенеративній фазі. Збільшення чисельності амоніфікаторів становило у зразках ґрунту ризосфери рижю, гірчиці та ріпаку 95 %, 34 % та 63 % відповідно.

Також зростала чисельність гетерофронтних мікроорганізмів на тлі післядії кремнієвмісного добрива в ґрунті ризосфери всіх досліджених капустяних культур. Зокрема, для гірчиці зростання становило 13 %, 57 % та 34 % упродовж ювенільного, генеративного та постгенеративного періоду розвитку (рис. 8. 9). Це співпадає з тенденцією, яку спостерігали у 2023 році.

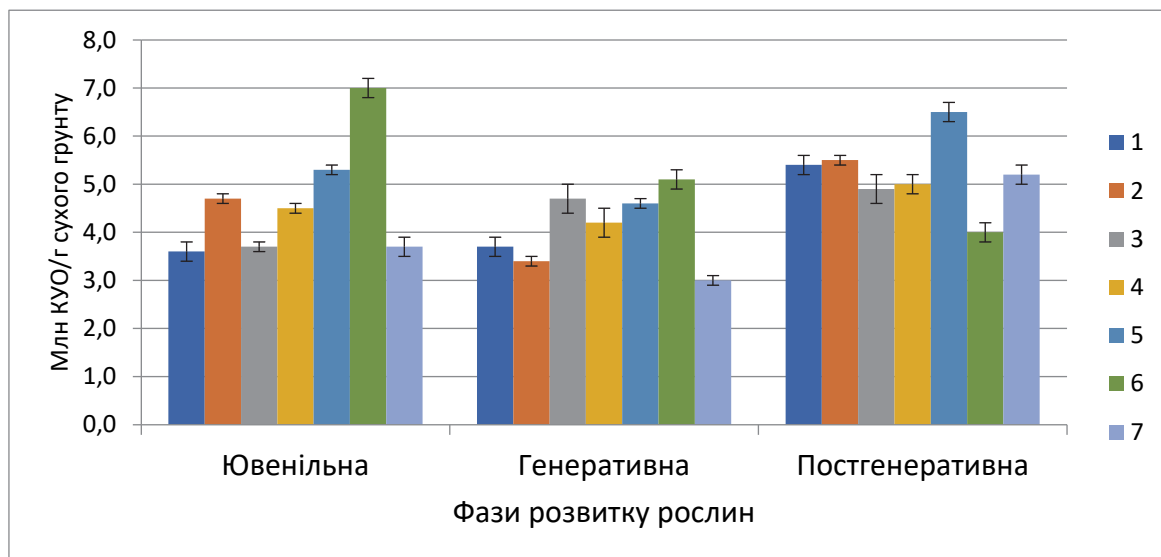


Рис. 8. 8. Чисельність амоніфікаторів у ґрунті рижю, гірчиці та ріпаку за внесення кремнієвмісних добрив: 1 – рижій+кремній, 2 – рижій контроль, 3 – гірчиця+кремній, 4 – гірчиця контроль, 5 – ріпак+кремній, 6 – ріпак контроль, 7 – контроль ґрунту

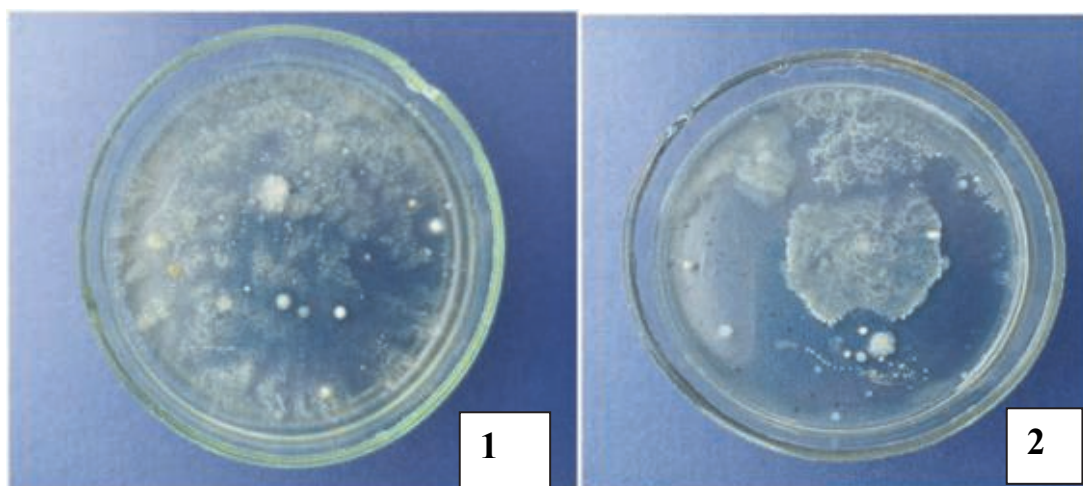


Рис. 8. 9. Різниця чисельності амоніфікаторів на середовищі МПА (м'ясо-пептонний агар) у ґрунті під гірчицею ефіопською: (постгенеративна фаза): 1 – дослід (післядія за внесення кремнієвмісних добрив), 2 – контроль

Вплив післядії кремнієвмісного добрива на чисельність мікроорганізмів, що споживають мінеральний азот, у ґрунті ризосфери капустяних культур був істотним лише на початку вегетаційного періоду (рис. 8. 10), при цьому менша їх кількість спостерігалась саме на тлі післядії кремнієвмісного добрива.

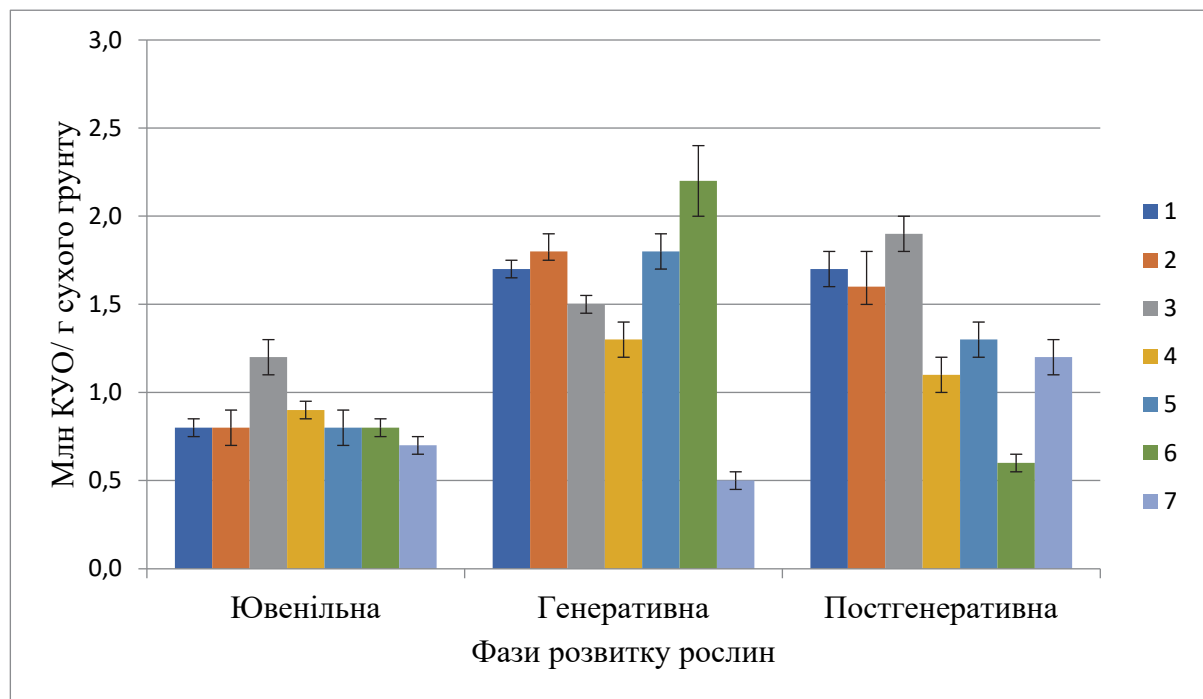


Рис. 8. 10. Чисельність мікроорганізмів, що споживають мінеральний азот у прикореневому ґрунті ріжю, гірчиці та ріпаку за внесення кремнієвмісних добрив: 1 – ріжій+кремній, 2 – ріжій контроль, 3 – гірчиця+кремній, 4 – гірчиця контроль, 5 – ріпак+кремній, 6 – ріпак контроль, 7 – контроль ґрунту

У наступні періоди розвитку досліджених рослин чисельність цієї групи мікроорганізмів майже не відрізнялась між дослідними та контрольними ділянками, за винятком зразків ґрунту, відібраних під ріпаком протягом постгенеративного періоду розвитку. Останні виявили 62% зростання чисельності мікроорганізмів, що споживають мінеральний азот на тлі післядії кремнієвмісного добрива порівняно з контрольними ділянками.

Коефіцієнт мінералізації-іммобілізації дозволяє оцінити спрямованість мікробіологічних процесів у ґрунті за співвідношенням добрив груп мікроорганізмів. На другий рік за внесення кремнієвмісних сполук значення коефіцієнтів мінералізації у дослідних зразках всіх культур упродовж вегетації виявились меншими за контрольні, що свідчить про переважання процесів накопичення органічних речовин (табл. 8. 18). Така тенденція була присутня і в минулорічних дослідженнях.

Таблиця 8. 18

Спрямованість мікробіологічних процесів мінералізації/імобілізації органічної речовини ґрунту (коефіцієнт мінералізації-імобілізації)

Культура	Фаза онтогенезу		
	ювенільна	генеративна	постгенеративна
Рижій + добриво	0,9	0,69	1,2
Рижій, контроль	1,3	1,0	1,6
Гірчиця + добриво	0,5	0,8	1,2
Гірчиця, контроль	0,8	1,2	1,3
Ріпак + добриво	0,9	1,2	0,8
Ріпак, контроль	1,2	1,5	0,8
Контроль ґрунту	0,9	1,5	0,9

Таким чином, мікробіологічний моніторинг ґрунту ризосфери дослідних культур за внесення кремнієвмісних добрив засвідчує позитивний вплив останніх на мікробіоценоз та депонування органічної речовини як протягом першого, так і протягом наступного року вегетації. Зокрема, поліпшення розвитку амоніфікаторів та зниження коефіцієнту мінералізації засвідчує спрямованість мікробіологічних процесів до накопичення органічної речовини у ґрунті. Тоді як стимулювання чисельності актиноміцетів на фоні зростання активності лакази свідчить про активізацію процесів гумусоутворення. Порівнюючи середовищеутворювальний вплив досліджених видів капустяних культур слід відмітити гірчицю. Мікробіоценоз у ґрунті під гірчицею відрізнявся більшою чисельністю та різноманіттям.

При порівняльному аналізі післядії кремнієвмісного добрива на алелопатичні й біохімічні властивості ґрунту з-під олійних культур методом прямого біотестування ґрунту на проростках *Lepidium sativum* виявлено позитивний вплив післядії кремнію на алелопатичний режим. Так, упродовж вегетаційного сезону спостерігалось зниження алелопатичної активності ґрунту на тлі кремнію на 27-30 % для рижію, 24-30 % для гірчиці та 18-28 %

для ріпаку порівняно з ґрунтовими зразками з-під досліджуваних культур за його відсутності (рис. 8. 11).

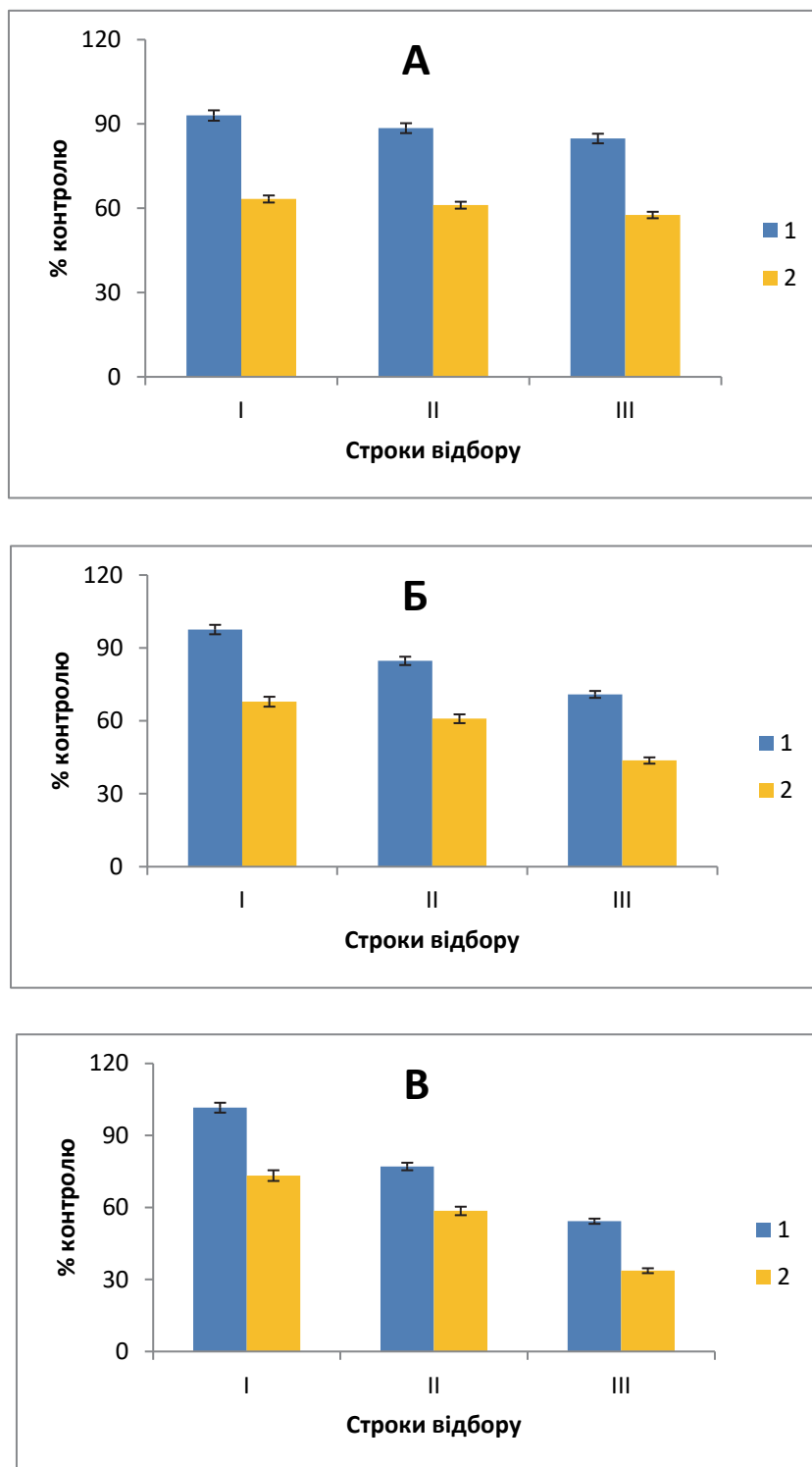


Рис. 8. 11. Алелопатична активність ґрунту з-під ріжю (А), гірчиці (Б) та ріпаку (В) (біотест – приріст коренів *Lepidium sativum*), % контролю: 1. – ґрунт + кремній; 2. – ґрунт без кремнію. Фази онтогенезу: I – ювенільна; II – генеративна; III – постгенеративна.

Слід відмітити, що за умов післядії кремнієвмісного добрива фітотоксичність ґрунту знижувалася максимально ефективно в ювенільну фазу, тоді як у перший рік його внесення – наприкінці вегетації.

Водночас оцінювання алелопатичної активності ґрунту за допомогою тест-рослин *Amaranthus paniculatus* показало її послаблення на 15-30% при застосуванні кремнієвмісного добрива, причому найбільшою мірою для рижію та гірчиці (рис. 8. 12). Загалом, аналіз отриманих результатів дає підстави стверджувати про поступове зростання фітотоксичності ґрунту до кінця вегетації як при наявності кремнію, так і за його відсутності, що, очевидно, можна пояснити акумуляцією органічних сполук з алелопатичними властивостями у складі рослинних виділень та решток.

Алелопатична активність гідрофільних сполук ґрунту на тлі післядії кремнієвмісного добрива найбільше знижувалася у генеративній (22 % для ріпаку) та постгенеративній (19-22 % залежно від культури) фазах (рис. 8. 13). Схожа тенденція була притаманна і для першого року внесення кремнієвмісного добрива.

Цитостатичні властивості гідрофільних сполук ґрунту суттєво зменшувалися за внесення кремнію для гірчиці (на 15-20 %) та ріпаку (на 7-18 %), тоді як для рижію посилення проліферації було незначним (5-10 %) (рис. 8. 14). У цілому, проліферація клітин рослин-акцепторів знижувалася упродовж вегетаційного сезону, але найбільшою мірою – за відсутності кремнієвмісного добрива.

Біохімічні властивості ґрунту оцінювали за значеннями редокс-потенціалу. Як у перший, так і на другий рік застосування кремнію у контролі (за межами дослідної ділянки) характер процесів був помірно відновним упродовж всього періоду вегетації (рис. 8. 15).

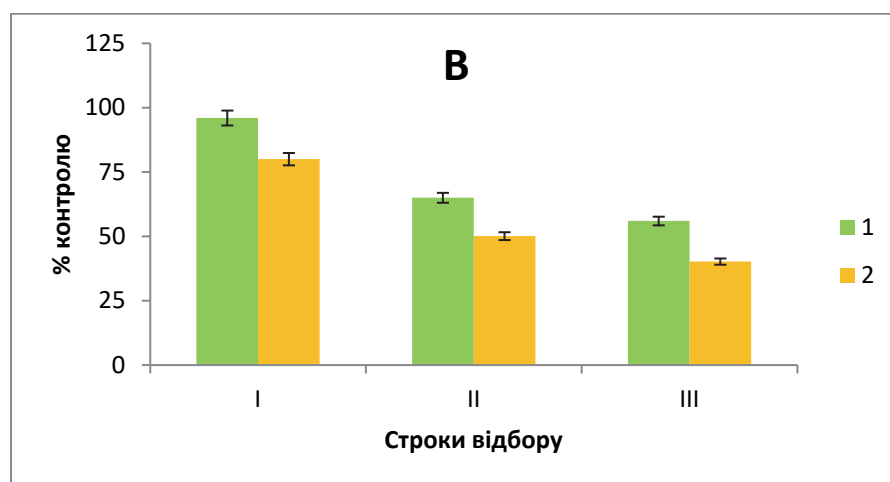
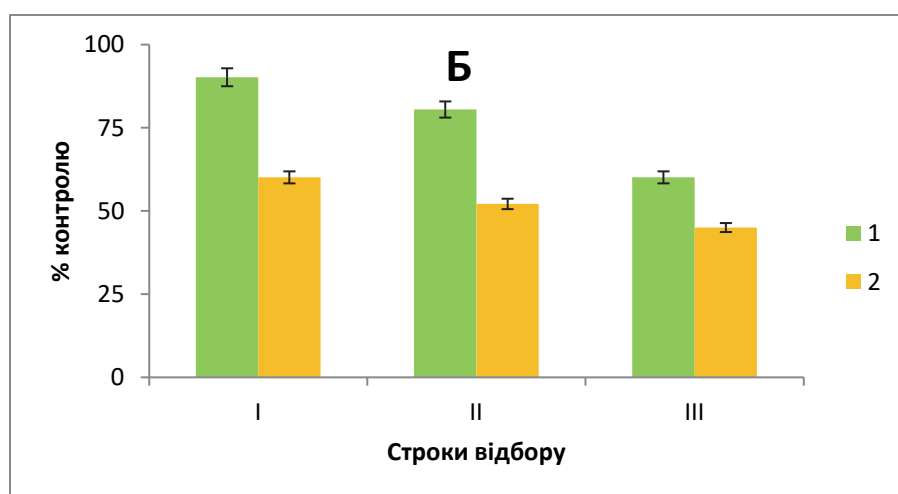
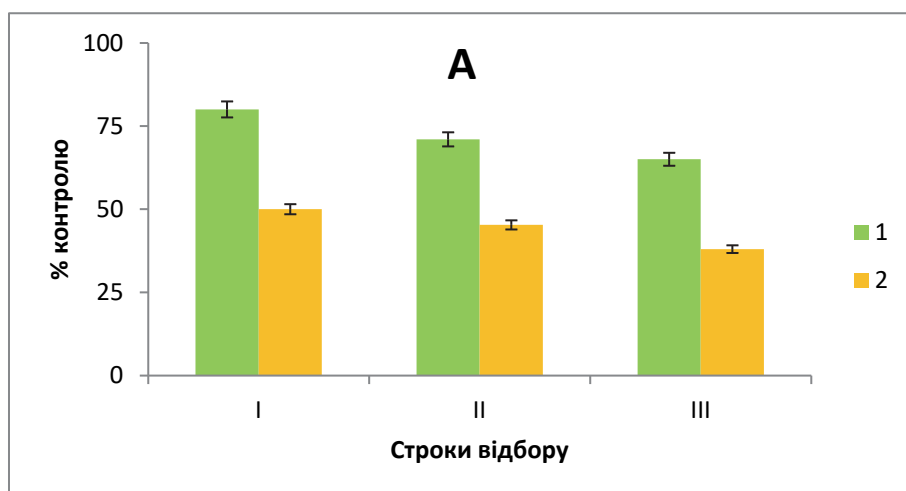


Рис. 8. 12. Алелопатична активність ґрунту з-під ріжю (А), гірчиці (Б) й ріпаку (В) (біотест – приріст коренів *Amaranthus paniculatus*), % контролю: 1. – ґрунт + кремній; 2. – ґрунт без кремнію. Фази онтогенезу I – ювенільна фаза; II – генеративна; III – постгенеративна

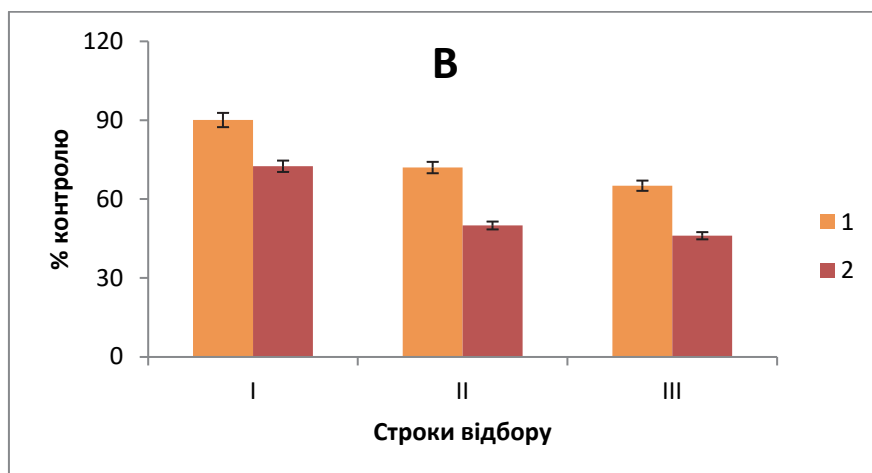
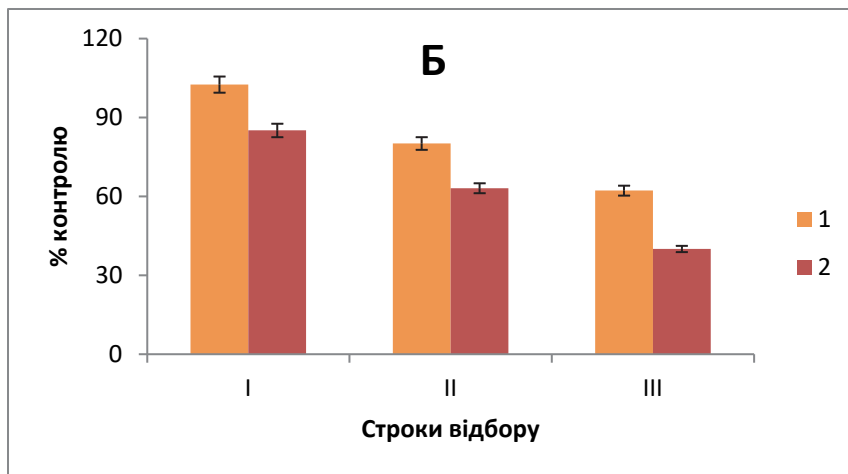
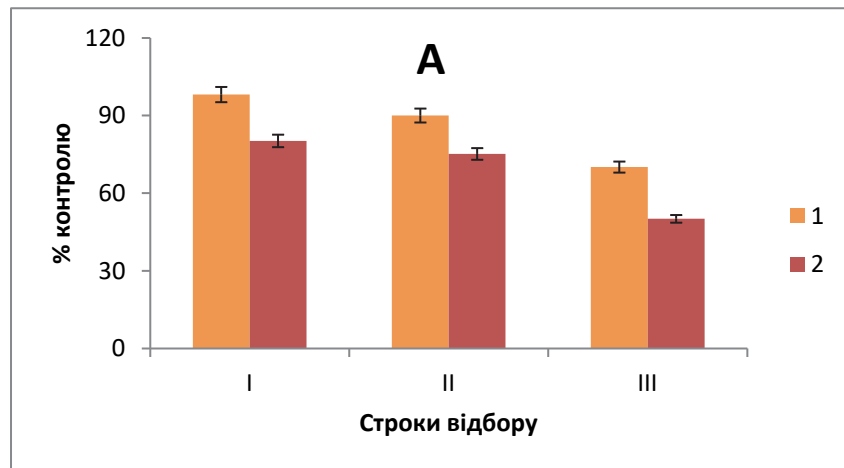


Рис. 8. 13. Алелопатична активність гідрофільних сполук ґрунту з-під ріжю (А), гірчиці (Б) й ріпаку (В) (біотест – приріст коренів *Cucumis sativus*), % контролю: 1. – ґрунт + кремній; 2. – ґрунт без кремнію. Фази онтогенезу: I – ювенільна; II – генеративна; III – постгенеративна.

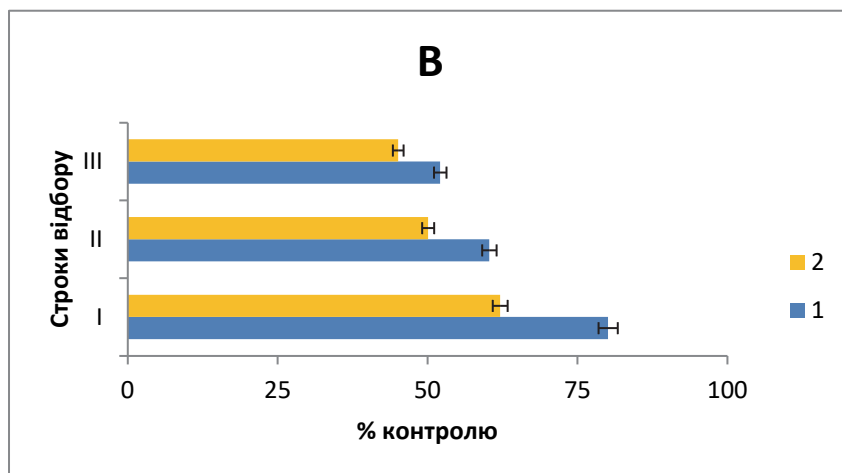
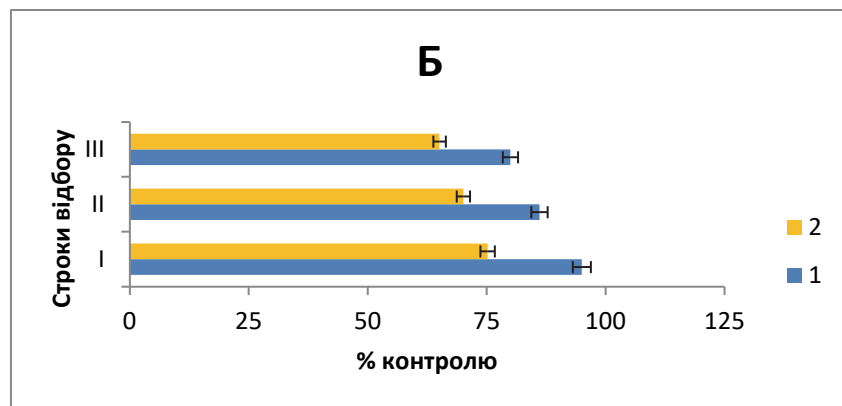
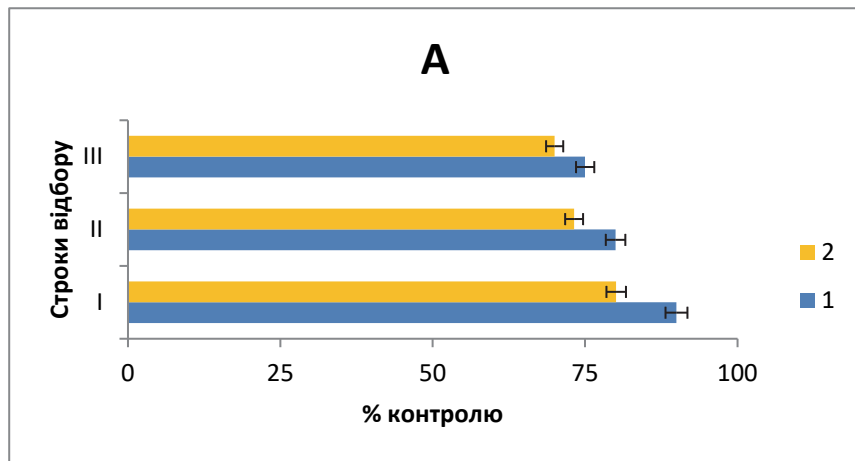


Рис. 8. 14. Цитостатична дія гідрофільних сполук ґрунту з-під рижію (А), гірчиці (Б) й ріпаку (В) (біотест – кількість бічних коренів *Cucumis sativus*), % контролю: 1. – ґрунт + кремній; 2. – ґрунт без кремнію. Фази онтогенезу: I – ювенільна; II – генеративна; III – постгенеративна

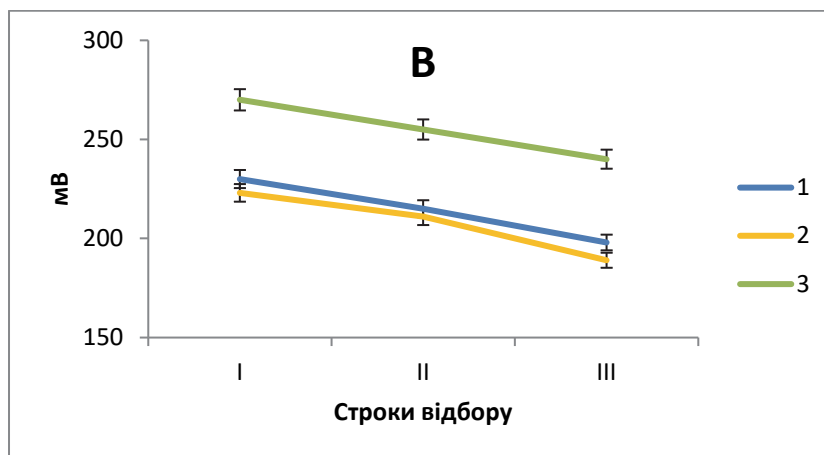
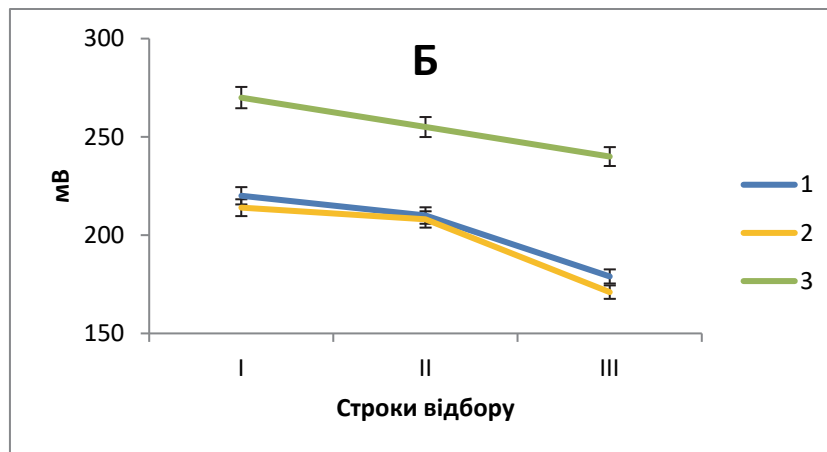
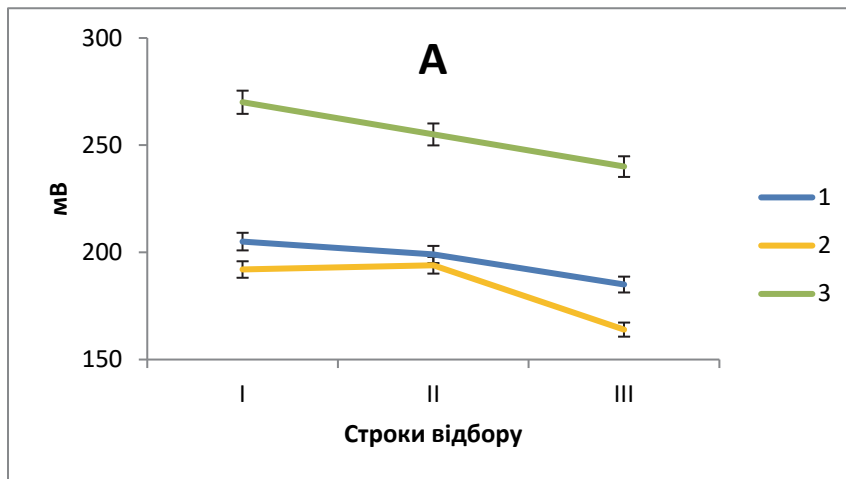


Рис. 8. 15. Значення окисно-відновного потенціалу (ОВП) в ґрунті з-під рижію (А), гірчиці (Б) й ріпаку (В), мВ: 1. – ґрунт + кремній; 2. – ґрунт без кремнію; 3. – контроль. Фази онтогенезу: I – ювенільна; II – генеративна; III – постгенеративна

У той же час, за умов післядії кремнієвмісного добрива та за його відсутності на ділянках досліджуваних олійних культур, характер процесу змінювався з помірно відновного у ювенільній та генеративній фазах (для гірчиці й ріпаку) до інтенсивно відновного у постгенеративній фазі. На відміну від першого року проведення досліджень, посилення відновних процесів було притаманним також і на тлі післядії кремнію у генеративній та постгенеративній фазах (тільки для ріжю).

Така динаміка ОВП може бути результатом акумуляції рухливих органічних сполук. Водночас, значення редокс потенціалу за присутності кремнієвмісного добрива були вищими на 5-21 мВ.

Вміст фенольних сполук у ґрунті з-під олійних культур за післядії кремнієвмісного добрива був у 1,1-1,3 рази нижчим порівняно з ділянками за його відсутності, особливо для ріжю (рис. 8. 16).

Найменша концентрація фенольних сполук була у контролі за межами дослідної ділянки впродовж всього вегетаційного періоду. Рівень фенольних сполук підвищувався впродовж вегетації в усіх варіантах досліду, але найбільшою мірою – за відсутності кремнієвмісного добрива, що, ймовірно, пов'язано з надходженням екзометаболітів у прикореневе середовище та літньою посухою, внаслідок якої збільшилася концентрація ґрунтового розчину.

Отже, за умов післядії кремнієвмісного добрива покращувалися алелопатичні характеристики прикореневого середовища і посилювалася проліферація клітин рослин-акцепторів, спостерігалось зниження вмісту лабільних фенольних сполук у ґрунті (особливо для ріжю), що, в цілому, може сприяти поліпшенню фізіологічного стану досліджуваних олійних культур.

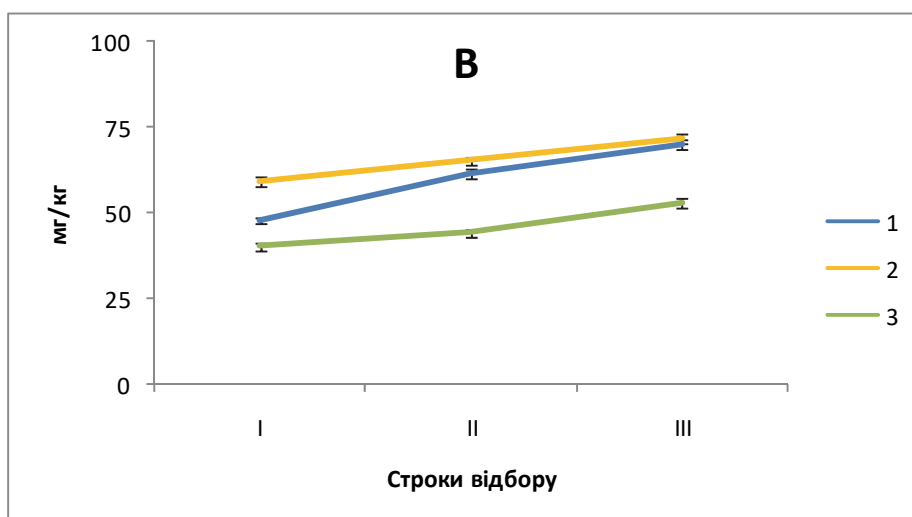
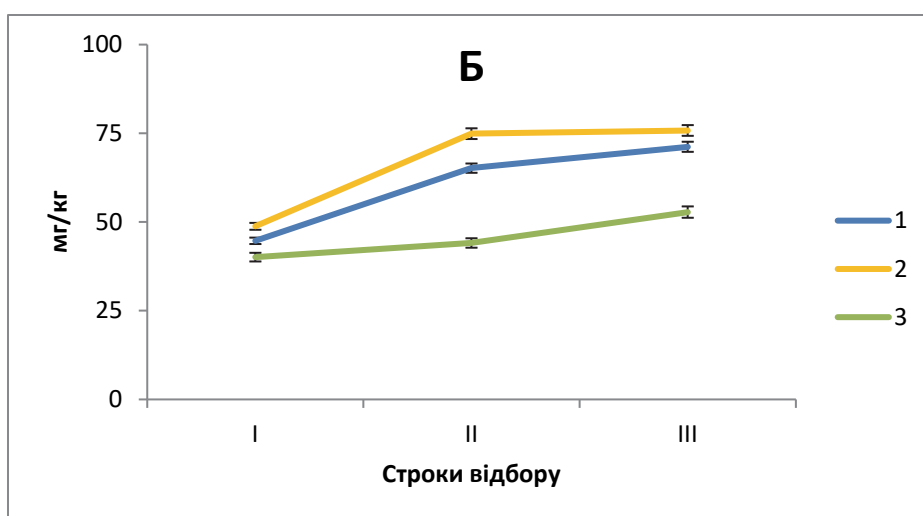
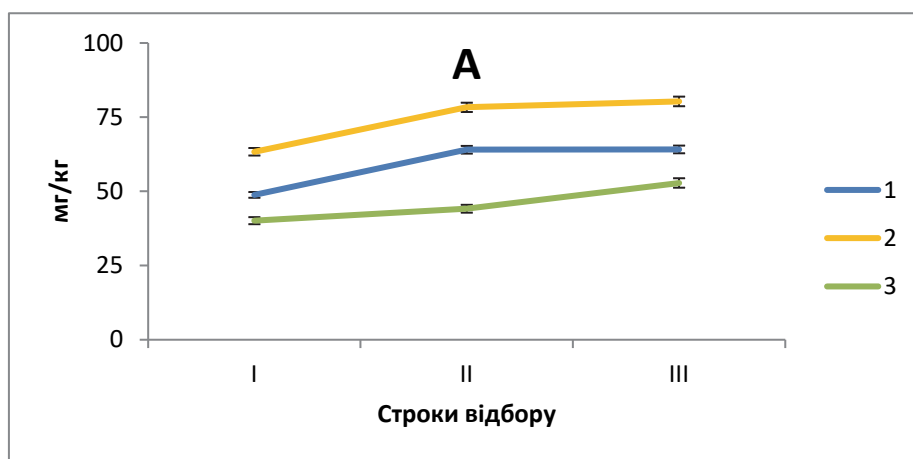


Рис. 8. 16. Вміст фенольних сполук в ґрунті з-під рижю (А), гірчиці (Б) та ріпаку (В), мг/кг: 1. – ґрунт + кремній; 2. – ґрунт без кремнію; 3. – контроль. Фази онтогенезу: I – ювенільна фаза; II – генеративна; III – постгенеративна

Тритерпеноїди та сапоніни – вторинні метаболіти вищих рослин, які відомі алелопатичною активністю по відношенню до рослин та

мікроорганізмів. За потрапляння в ґрунтове середовищі зазначені біологічно активні речовини можуть суттєво змінювати видову структуру мікробіоценозу та активність ферментів, пов'язаних з колообігом біогенних елементів (Liu et al., 2024). Тому аналіз впливу післядії кремнієвмісного добрива на вміст цих сполук у ґрунті дозволяє з'ясувати біохімічні механізми спостережених ефектів на біологічну активність та мікробіоценоз ґрунту.

Сезонна динаміка вмісту сапонінів та тритерпеноїдів в ґрунті ризосфери капустяних культур характеризувалась значним зростанням від початку до кінця вегетації (табл. 8. 19, 8. 20). Очевидно це пов'язано зі зростанням видільної активності корневих систем досліджених видів пропорційно росту їх біомаси. У контрольному ґрунті (за межами ділянок з посівами капустяних культур) вміст цих біологічно активних сполук був, як правило, вищим порівняно з дослідженими посівами і практично не змінювався протягом вегетаційного сезону.

Таблиця 8. 19

Післядія внесення кремнієвмісних добрив на вміст сапонінів у ризосферному ґрунті (мг/г сух. маси) з-під рижю, гірчиці та ріпаку (середнє арифметичне $\pm$ стандартна похибка)

Культура	Варіант	Фаза онтогенезу		
		ювенільна	генеративна	постгенеративна
Рижій	К	1,20 $\pm$ 0,02	1,98 $\pm$ 0,02	3,56 $\pm$ 0,03
	Добриво	0,41 $\pm$ 0,01	0,85 $\pm$ 0,03	2,04 $\pm$ 0,02
Гірчиця	К	0,62 $\pm$ 0,02	0,88 $\pm$ 0,04	1,84 $\pm$ 0,05
	Добриво	0,61 $\pm$ 0,03	0,85 $\pm$ 0,02	0,92 $\pm$ 0,02
Ріпак	К	0,94 $\pm$ 0,03	0,86 $\pm$ 0,03	0,88 $\pm$ 0,02
	Добриво	0,63 $\pm$ 0,02	0,78 $\pm$ 0,02	1,24 $\pm$ 0,03
Контроль		2,24 $\pm$ 0,01	2,18 $\pm$ 0,03	2,10 $\pm$ 0,04

Примітка: К – без внесення добрива

Таблиця 8. 20

Післядія внесення кремнієвмісних добрив на вміст тритерпеноїдів у ризосферному ґрунті (мг/г сух. маси) з-під ріжю, гірчиці та ріпаку (середнє арифметичне $\pm$ стандартна похибка)

Культура	Варіант	Фаза онтогенезу		
		ювенільна	генеративна	постгенеративна
Рижій	К	0,42 $\pm$ 0,01	0,37 $\pm$ 0,02	1,88 $\pm$ 0,02
Рижій	Добриво	0,10 $\pm$ 0,02	0,32 $\pm$ 0,01	0,46 $\pm$ 0,01
Гірчиця	К	0,11 $\pm$ 0,05	0,33 $\pm$ 0,03	0,38 $\pm$ 0,04
Гірчиця	Добриво	0,13 $\pm$ 0,03	0,31 $\pm$ 0,04	0,38 $\pm$ 0,05
Ріпак	К	0,16 $\pm$ 0,03	0,28 $\pm$ 0,02	0,34 $\pm$ 0,02
Ріпак	Добриво	0,15 $\pm$ 0,02	0,29 $\pm$ 0,03	0,39 $\pm$ 0,02
Контроль		0,92 $\pm$ 0,02	0,87 $\pm$ 0,03	0,93 $\pm$ 0,03

Примітка: К – без внесення добрива.

Внесення кремнієвмісних добрив у 2023 році суттєво позначилось на вмісті тритерпеноїдів та сапонінів у ґрунті ризосфери ріжю, гірчиці та ріпаку у наступному 2024 році. При цьому найбільший ефект від післядії добрива спостерігали на вміст сапонінів у посівах ріжю. Для цієї культури, а також для ріпаку на початку їх вегетації у варіантах з кремнієвмісним добривом концентрація сапонінів була відповідно на 33% та 76% нижчою порівняно з контрольними ділянками. Протягом вегетаційного сезону різниця між удобреними та контрольними ділянками дещо знижувалась. А в ґрунті під ріпаком вміст сапонінів в кінці вегетаційного сезону на тлі післядії кремнієвмісного добрива досяг на 40% вищих значень порівняно з контролем.

Аналіз вмісту тритерпеноїдів у ґрунті ризосфери під дослідженими культурними рослинами показав подібну до сапонінів сезонну динаміку з максимумами в кінці вегетації. Післядія кремнієвмісного добрива на

концентрацію тритерпеноїдів у ґрунті ризосфери залежала від виду культурної рослини та фази розвитку. На початку та в кінці вегетації ефект від внесення добрива був більшим ніж протягом генеративного періоду.

У посівах ріжю післядії кремнієвмісного добрива проявлялась у зниженні вмісту тритерпеноїдів у ґрунті ризосфери на 20-67% залежно від періоду вегетації. У посівах ріпаку подібну тенденцію спостерігали протягом ювенільної фази розвитку. Протягом генеративного періоду цей показник достовірно не відрізнявся між дослідною та контрольною ділянками, а протягом постгенеративного періоду вміст тритерпеноїдів на контрольних ділянках був нижчим, ніж на тлі післядії кремнієвмісного добрива. У посівах гірчиці вміст тритерпеноїдів у ризосферному ґрунті достовірно не відрізнявся між дослідом та контролем.

Підсумовуючи наведені вище результати, слід відмітити загальну тенденцію до зниження концентрації сапонінів і тритерпеноїдів у ґрунті ризосфери під дослідженими капустяними культурами протягом ювенільної та генеративної фаз розвитку. Важливим наслідком цього є зниження алелопатичної активності ґрунту і збільшення біологічного різноманіття ґрунтової мікрофлори.

Таким чином, дослідження післядії кремнієвмісного добрива у посівах ріжю, гірчиці та ріпаку в 2024 році показало збереження тенденцій, виявлених у 2023 році (за внесення вищезазначеного добрива). Зокрема, це стимулювання фотосинтетичної продуктивності, мінерального живлення та системної стійкості у досліджених капустяних культур. Акумуляція аморфного кремнезему в ґрунті ризосфери сприяє стабілізації важливих макро- та мікроелементів (зокрема Ca, Mg, P, Si та ін.) та іммобілізації токсичних металів (Mn, Al, Cd, Cr, Sr та ін.). Крім того у ґрунті ризосфери на тлі кремнієвмісного добрива істотно зростала активність лакази та вміст органічного вуглецю. Відповідно знижувався вміст мінерального вуглецю,

який є джерелом емісії вуглекислого газу в атмосферу. Післядія кремнієвмісного добрива також позначилась на поліпшенні алелопатичного режиму прикореневого ґрунту, зниженні вмісту фітотоксичних алелопатичних речовин, що належать до групи фенолів, сапонінів та тритерпеноїдів. Покращення алелопатичного режиму позитивно вплинуло на чисельність і біорізноманіття агрономічно корисних мікроорганізмів, зокрема актиноміцетів та аммоніфікаторів.

Отримані результати свідчать про те, що на другий рік після внесення кремнієвмісного добрива ґрунтова екосистема під дослідженими капустяними культурами характеризується більшою врівноваженістю і спроможністю до самоорганізації відповідно до правила І. Пригожина.

Отже, отримані результати доводять перспективність застосування кремнієвмісних добрив для управління структурно-функціональною організацією ґрунтової екосистеми з метою підвищення кількості та якості врожаю капустяних культур, стійкості посівів до несприятливих кліматичних змін, депонування органічної речовини у ґрунті та зниження емісії парникових газів агроекосистемами.

ЗАКЛЮЧЕННЯ

Вперше в Україні оцінено мобілізований та створений генофонд досліджених економічно-важливих олійних рослин (84 зразки) і відібрано генотипи (понад 20) для їх маркер-опосередкованої селекції, внаслідок чого виведено 4 високоадаптивні сорти (отримано авторські свідоцтва і патенти на сорти Руно та Ранок, а також подано до Держаної реєстрації сорти Лідер та Новинка). Розроблено науково-методичні засади та введено в культуру гірчицю абіссинську (капусту кільоподібну) і рижій озимий як нові перспективні олійні рослини.

Установлено біолого-господарські і морфолого-технологічні властивості рослин та насіння рижію і гірчиці ефіопської залежно від генотипових особливостей у період технічної стиглості. Визначено, що висота рослин у різних генотипів рижію змінюється від 62,5 до 94,0 см, кількість бічних пагонів на рослині – 3,0-12,6, кількість стручків на основному стеблі – 22-44, на бічних пагонах – 13-29. За основними морфометричними показниками встановлена суттєва перевага сортів Ранок та Руно. Найбільшу фітомасу формували ф. 1 та ф. ЕОРЖЯФД, насіння – с. Ранок і ф. ЕОРЖЯФ-1. Найбільша маса 1000 насінин була у сорту Руно та ф. ЕОРЖЯФ-2.

Визначено біохімічний склад різних біотипів рослин. Встановлено, що найвищий вміст олії у насінні рижію становив 39,48 % (с. Руно). Виявлено, що за жирнокислотним складом олії для різних форм рослин *Camelina sativa* характерним є високий вміст ліноленової (від 31,4 до 35,6 %), лінолевої (від 19,8 до 24,6 %), олеїнової (від 11,9 до 18,5 %), гондоїнової (11-ейкозенової) (від 9,5 до 12,9 %), пальмітинової (9,5–11,4 %) жирних кислот.

Встановлено морфолого-біологічні особливості різних генотипів рослин відібраних форм *Brassica carinata*. Виявлено, що в умовах інтродукції рослини проходять всі етапи онтогенезу за один вегетаційний період за фазами розвитку – сходи, перший справжній листок, розетка, стеблуння,

бутонізація, квітання, плодоношення і дозрівання. Тривалість вегетаційного періоду рослин становить від 115 до 123 діб залежно від генотипу.

Визначено рівень стійкості рослин *Brassica carinata* та опрацьовано способи підвищення функціонування фотосистеми II і покращення фізіологічних процесів – за умови використання генетичного потенціалу рослин та мікродобрив. Відібрано генотипи рослин із підвищеною стійкістю до біотичних і абіотичних факторів, що сприяє поліпшенню процесу акліматизації та селекції та відбору високоадаптивних генотипів для введення в культуру.

Виявлено закономірності накопичення нутрієнтів у надземній масі залежно від фази розвитку і генотипових особливостей рослин *Brassica carinata*. Встановлено, що на початку вегетації досліджувані рослини характеризувались інтенсивнішим накопиченням аскорбінової кислоти, цукрів, моноцукрів, вільних органічних кислот, золи, протеїну порівняно з періодом плодоношення. Навпаки, вміст сухої речовини та дубильних речовин збільшувались до періоду плодоношення.

Визначено, що фітомаса і насіння олійних рослин роду *Brassica* характеризуються високою енергетичною цінністю. Надземна маса рослин різних генотипів *Brassica carinata* забезпечила вихід енергії від 3444 (BC NPF-8) до 3994 ккал/кг (BC NPF-1). Найвищою калорійністю насіння характеризуються генотипи BC NPF-8 (5830 ккал/кг) і BC SCF-6 (5900 ккал/кг). У цілому енергетична цінність насіння зразків *Brassica napus* дещо перевищує (на 191-431 ккал/кг) *Brassica carinata* та у найкращих генотипів становить 6186-6331 ккал/кг.

За оцінкою якісного і кількісного складу ліпідів та інших нутрієнтів фітосировини (56 зразків) визначено напрями використання генотипів. У результаті хроматографічного аналізу ліпідів виявлено, що концентрація ерукової кислоти була найвищою серед інших жирних кислот і становила 36-

45 %. Наступними за вмістом жирних кислот виявилися лінолева, концентрація якої варіювала в межах 15,00-18,84 %, ліноленова – 11-13 % та олеїнова – 7,00-9,57 %. З'ясовано, що *Brassica carinata* має відносно низький вміст олеїнової кислоти, особливо у порівнянні з еруковою. Для можливого використання олії в харчовій промисловості необхідна подальша селекційно-генетична робота для створення нових форм рослин з підвищеним вмістом жирних кислот придатних для харчування.

Визначено вміст 22-х макро- та мікроелементів у рослинній сировині *Brassica carinata*. Показано роль окремих елементів у ростовому процесі рослин, накопиченні цукрів, ліпідів, вуглеводному та білковому обміні й метаболізмі, у підвищенні врожайності та якості сировини і стійкості рослин до дії екологічних факторів навколишнього середовища.

Розроблено сучасні біо- та фітотехнологічні методи покращення ростових і продуктивних показників відібраних форм рижію, гірчиці ефіопської та ріпаку і поліпшення біотрофних властивостей ґрунту – за умови використання оригінальних кремнієвмісних добрив та високоефективних мікробіологічних препаратів.

Установлено, що до завершення вегетації вплив кремнієвмісних добрив суттєво відобразився на всіх ростових та продуктивних показниках капустяних культур. Приріст висоти рослин становив від 3,7 % (рижій) до 16,2 % (гірчиця), кількість насінин у стручку збільшився від 11,3 % (рижій) до 42,7 % (гірчиця), маса 1000 насінин від 3,3 % (ріпак) до 18,4 % (рижій), продуктивність надземної маси від 9,0 % (ріпак) до 18,8 % (гірчиця), насіння від 5,4 % (ріпак) до 16,7 % (рижій), що доводить високу ефективність застосування кремнієвмісних добрив.

За умови застосування кремнієвмісних добрив виявлено суттєве підвищення вмісту кремнію в ґрунті, завдяки чому на тлі зростання органічної речовини формується кремнієва матриця, для якої притаманні інформаційно-

ресурсні властивості. З одного боку, в результаті цього забезпечується збалансованість системи ґрунт-рослина-ґрунт, з іншого – підвищується адаптивний потенціал рослин до абіотичних і біотичних стрес-факторів. Відбувається зростання концентрації титану та цинку, які відповідають за стійкість рослин до фітопатогенів і температурних коливань. Підвищилися показники брасиностероїдів у листках, що свідчить про підтримку імунної системи рослин до високої температури, посухи та хвороб. Стимулювався синтез хлорофілу *a* у листках рослин впродовж вегетаційного періоду, а хлорофілу *b* – у ювенільний період розвитку.

Установлено зростання вмісту вторинних метаболітів у листках, зокрема флаваноїдів, антоціанів і танінів. Доведено позитивний вплив кремнію на алелопатичний режим прикореневого середовища рижію, гірчиці та ріпаку впродовж вегетаційного періоду. Опрацьовано методи безвідходної утилізації побічної продукції.

Доведено перспективність застосування кремнієвмісних добрив для управління структурно-функціональною організацією ґрунтової екосистеми з метою підвищення кількості та якості врожаю капустяних культур, стійкості посівів до несприятливих кліматичних змін, депонування органічної речовини у ґрунті та зниження емісії парникових газів агроєкосистемами.

Виявлено покращення показників інтенсивності індукції флуоресценції хлорофілу в трьох видів рослин родини Brassicaceae (*Camelina sativa*, *Brassica carinata* та *Brassica napus*) – за умови впливу кремнієвмісних сполук. Встановлено, що найсильніший вплив добрива простежувався у рослин *Brassica napus*.

Дослідження післядії кремнієвмісного добрива у посівах рижію, гірчиці та ріпаку за період досліджень показало збереження тенденцій, виявлених у попередній вегетаційний період. Встановлено стимулювання фотосинтетичної продуктивності, мінерального живлення та системної стійкості у дослід-

жених капустяних культур. Акумуляція аморфного кремнезему в ґрунті ризосфери сприяє стабілізації важливих макро- і мікроелементів (зокрема Ca, Mg, P, Si та ін.) та іммобілізації токсичних металів (Mn, Al, Cd, Cr, Sr та ін.).

З'ясовано, що у ґрунті ризосфери на тлі кремнієвмісного добрива істотно зростала активність лакази та вміст органічного вуглецю. Післядія кремнієвмісного добрива позначилась на поліпшенні алелопатичного режиму прикореневого ґрунту, зниженні вмісту фітотоксичних алелопатичних речовин, що належать до групи фенолів, сапонінів та тритерпеноїдів. Це в свою чергу позитивно вплинуло на чисельність і біорізноманіття агрономічно корисних мікроорганізмів, зокрема актиноміцетів та аммоніфікаторів.

Отримані вагомі наукові результати стали підґрунтям для комплексної оцінки за біолого-морфологічними, біохімічними і селекційно-генетичними маркерами, а також відбору нових селекційних ліній рослин гірчиці ефіопської (9) і виведення оригінальних сортів ріжю посівного (2); розробки практичних рекомендацій з використання фітосировини малопоширених олійних рослин. Створено рецептуру хліба пшеничного з оригінальною функціональною добавкою, де запропоновано використання борошна та олії ріжю посівного сорту Перемога і гірчиці.

Теоретично обґрунтовано та практично реалізовано роботу з розробки методу поліпшення біотрофних властивостей ґрунту, що сприяло покращенню фізіолого-біохімічних, ростових процесів та підвищенню продуктивних показників і стійкості олійних рослин за використання орґано-мінеральних кремнієвмісних добрив. Опрацьовано методи безвідходної утилізації побічної продукції. Розроблено оригінальні технології виробництва збалансованих харчових продуктів, технічних та фітозасобів на основі представників родини *Brassicaceae*.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

А.с. №150630 на сорт Євро-12, рижий посівний (ярий) / Рахметов Д.Б., Блюм Я.Б., Рахметова С.О., Вергун О.М. Україна. Заявка № 12097001 від 2012 р. Занесено до Реєстру сортів рослин України у 2015 р.

А.с. №150631 на сорт Перемога, рижий посівний (ярий) / Рахметов Д.Б., Блюм Я.Б., Ємець А.І., Рахметова С.О., Пашина О.О. Україна Заявка № 2097002 від 2012 р. Занесено до Реєстру сортів рослин України у 2015 р.

Андреюк К.І., Іутинська Г.О., Антипчук А.Ф. Функціонування мікробних ценозів ґрунту в умовах антропогенного навантаження. Київ : Наукова думка, 2001. 240 с.

Артюх Л.Ф. Традиційна культура. Харчування та їжа. Енциклопедія історії України: Україна – Українці. Кн. 1 / Редкол.: В. А. Смолій (голова) та ін. НАН України. Інститут історії України. Київ : Наукова думка, 2018. 608 с. URL: http://www.history.org.ua/?termin=tradytsijna_kultura_kharchuvannja_ta_jizha

Біологічна хімія: підручник / Н.Г. Марінцова та ін. Львів : Львівська політехніка. 2009. 324 с.

Біологічні основи інтродукції перспективних енергетичних та ароматичних рослин в Україні / Д.Б. Рахметов, О.А. Корабльова, С.М. Ковтун-Водяницька та ін. Київ: Національна академія наук України. НБС імені М.М. Гришка. 2024. 314 с.

Блюм Р.Я. Сучасний стан та перспективи культивування рижию посівного (*Camelina sativa*) в Україні. *Фактори експериментальної еволюції організмів*. 2022. 31. С. 28–34. <https://doi.org/10./FEEO.v31.1480>

Блюм Р.Я., Бойчук Ю.М., Ємець А.І., Рахметова С.О., Блюм Я.Б., Рахметов Д.Б. Порівняльна оцінка жирнокислотного складу олій насіння форм та сортів тифону, редьки олійної і рижию як перспективної сировини для отримання біодизелю. *Фактори експериментальної еволюції організмів*. 2016. Т. 18. С. 61–66.

Буділка Г.І., Аксьонов І.В., Левченко В.І. Жирнокислотний склад олій гірчиці озимої. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*. 2011. № 16. С. 34–39. URL: https://bulletin.imk.zp.ua/pdf/2011/16/Budilka_16.pdf

Григорюк І.П., Нестерова Н.Г. Оцінка накопичення танінів у листках деревних видів рослин за дії урбосередовища. *Тернопільські біологічні читання – Ternopil Bioscience – 2017* : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. з міжнар. участю, присвяч. 20-річчю заснування наук. фахового видання України *Наукові записки ТНПУ ім. В. Гнатюка. Сер. Біологія* – наукометрична база даних Index Copernicus, 20–22 квіт. 2017 р. Тернопіль: Терно-граф. 2017. С. 183–186.

Гродзинский А.М. Аллелопатия растений и почвоутомление: Избр. тр. / Київ : Наукова думка, 1991. 432 с.

Демидась Г., Квітко Г., Гетман Н. Рижій посівний – олійна культура альтернативна ріпаку ярому для виробництва біодизеля. *Збірник наукових праць ВНУВУ*. 2011. Вип. 8 (48). С. 3–8.

Державний реєстр сортів рослин України. URL: <https://www.profihort.com/2025/./derzhavnij-reyestr-sortiv>

Дробот В.І. Довідник з технології хлібопекарського виробництва. Довідник : навч. посіб. 2-е вид. перероб. і допов. Київ, 2019. С. 132–148.

Жир молочний. Виявлення рослинного жиру методом газорідинної хроматографії стеринів (контрольний метод): ДСТУ ISO 3594-2001. Чинний від 2003-01-01. Київ : Держспоживстандарт України, 2002. 15 с.

Жири та олії тваринні й рослинні. Аналізування методом газової хроматографії метилових ефірів жирних кислот (ISO 5508:1990, IDT): ДСТУ ISO 5508-2001. [Чинний від 2003-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2003. 15 с.

Жири тваринні і рослинні та олії. Визначення вмісту транс-ізомерів жирних кислот у рослинних жирах та оліях методом газової хроматографії (ISO 15304:2002, IDT): ДСТУ ISO 15304:2007. [Чинний від 2010-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2010. 22 с. (Міжнародні норми).

Жирнокислотний, стеринний та ацилгліцеринний склад олій і жирів. Довідник / І.В. Левчук, П.О. Некрасов, В.А. Кіщенко, О.В. Голубець, В.К. Тимченко, Т.В. Арутюнян. Київ : Сталь, 2020. 207 с.

Каліта Т.М. Сезонна динаміка накопичення флавоноїдів у різних видів роду *Rhododendron* L. як маркерів акліматизаційних реакцій. *Промислова ботаніка*. 2013. Вип. 13. С. 158–162.

Колекційний фонд енергетичних, ароматичних та інших корисних рослин НБС імені М.М. Гришка НАН України / Д.Б. Рахметов, С.М. Ковтун-Водяницька, О.А. Корабльова та ін. Київ : ФОП Паливода В.Д., 2020. 208 с.

Колекційний фонд енергетичних та ароматичних рослин НБС імені М. М. Гришка НАН України / Д. Б. Рахметов, О. А. Корабльова, С. М. Ковтун-Водяницька та ін. Київ: НАН України, НБС імені М. М. Гришка, 2024. 240 с. <https://doi.org/10.59647/978-617-14-0328-4/1>

Користь насіння Рижія та сфера їх застосування. 2020. URL: <https://narodfarma.com.ua/ua/statti/zastosuvannja-po-zahvorjuvannjam/nasinnja-rizhija-korist-ta-sfera-zastosuvannja>.

Корнієвський Ю.І., Крайдашенко О.В., Красько М.П., Богуславська Н.Ю., Корнієвська В.Г. Фітотерапія в кардіології. Навчальний посібник. Запоріжжя : ТОВ «Карат». 017. С. 197–198.

Котов М.І. Родина Хрестоцвіті. у кн. Флора УРСР.Т.V. Ред. М.В Клоков, О.Д. Вісюліна. Київ : АН УРСР. 1953. С. 203–429.

Ксенюк М.П., Сиза О.І. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Технології харчових виробництв» для студентів спеціальності 181 – Харчові технології. Чернігів : ЧНТУ. 2018. С 15–17.

Лебеденко Т.Є., Кожевнікова В.О., Васильєв С.В. Підвищення якості хліба пшеничного шляхом використання лікарської рослинної сировини. *Зернові продукти і комбікорми*. 2013. 50(2). С. 18–25.

Мардар М.Р., Сердюк Л.В. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Товарознавство товарів рослинного походження» модуль VI для студентів професійного напрямку 6.030510. Одеса : ОНАХТ, 2008. 46 с.

Матвеев Н.М. Аллелопатия как фактор экологической среды. Самара : Кн. изд-во, 1994. 206 с.

Мельничук М.Д., Демидась Г.І., Квітко Г.П., Свистунова І.В. Рижій посівний як альтернатива ріпаку ярому для виробництва біодизеля. *Наукові доповіді НУБіП*. 2012. 31(2). URL: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/Nd/2012_2/12dgi.pdf

Методи аналізу об'єктів довкілля. Курс лекцій. Частина 2. Хімічний склад продуктів харчування та їхній наліз (для студентів хімічного факультету). Львів : ЛНУ імені Івана Франка. 2017. С. 66 (116 с.)

Методика визначення відповідності сортів капусти кильоподібної, гірчиці кильоподібної (*Brassica carinata* A. Braun) критеріям відмінності, однорідності та стабільності. Рахметов Д. Б., Блюм Я.Б., Рахметова С. О., Блюм Р.Я., Костенко Н.П., Васьківська С. В. Український інститут експертизи сортів рослин, 2024. URL: <https://www.sops.gov.ua/uploads/page/6762ce286c0b7.pdf>

Насіння рижію. Народна медицина. 2012. URL: <https://msgame.org.ua/?p=29812>

Носач Л.В., Гнатишин Л.Б. Використання аморфного високодисперсного кремнезему в медицині. *Наукові записки НаУКМА: Природничі науки*. 2003. Т. 22, ч. 3. С. 442–447.

Опис та характеристика рослини рижій посівний. Вітчизняні сорти. URL: <https://agrarii-razom.com.ua/plants/rijiy-posivniy>

Осейко М., Українець А., Усатюк С., та ін. Олії та жири: склад, методи одержання, якість. *Харчова і переробна промисловість*. 2004. 5(297). С. 17–19.

Очеретна А.В. Фролова Н.Е. Дослідження якісного складу олії рижію та перспектив її використання в дієтичному харчуванні. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2020. Том. 31 (70). Ч. 2. № 6. С. 76–81. <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.6-2/14>

Павленко К.С., Куркин В.А., Милехин А.В. Обоснование целесообразности комплексного использования рыжика озимого (*Camelina silvestris* L.). *Известия Самарского научного центра РАН*. 2012. 14(1-9). С. 2273–2275. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-tselesoobraznosti-kompleksnogo-ispolzovaniya-ryzhika-ozimogo-camelina-silvestris-l>

Писарев Д.И., Новиков О.О., Сорокопудов В.Н., Халикова М.А., Жиликова Е.Т., Огнева О.В. Химическое изучение биологически активных полифенолов некоторых сортов рябины обыкновенной – *Sorbus aucuparia*. *Научные ведомости. Сер.: Медицина. Фармация*. 2010. 93(12/2). С. 123–128.

Радченко О.С., Степура Л.Г., Домбровська І.В., Фуртат І.М., Михальський Л.О. *Практикум із загальної мікробіології*. Київ : Фітосоціоцентр, 2011. 111 с.

Ратошнюк В.І. Особливості хімічного складу олії сучасних сортів люпину вузьколистого та перспективи використання її в різних сферах народного господарства. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. Вип. 26. *Сільськогосподарські науки*. 2017. С. 150–156.

Рахметов Д.Б., Рахметова С.О., Ковтун-Водяницька С.М. Сорт Руно рослини рижію посівного (*Camelina sativa* L.). Заявка №23043001. Свідоцтво про авторство № 240264. Дата пріоритету 15.11.2023. Дата держреєстрації 22.07.2024. Патент UA240282

Рахметов Д.Б., Рахметова С.О., Блюм Я.Б., Блюм Р.Я. Сорт Ранок рослини рижію посівного (*Camelina sativa* L.). Заявка №23043002. Свідоцтво про авторство № 240265. Дата пріоритету 15.11.2023. Дата держреєстрації 28.08.2024. Патент UA240283

Рахметов Д.Б. Теоретичні та прикладні аспекти інтродукції рослин в Україні: монографія. Київ : АграрМедіаГруп. 2011. 398 с.

Рахметов Д.Б., Блюм Я.Б., Ємець А.І., Бойчук Ю.М., Андрущенко О.Л., Вергун О.М., Рахметова С.О. *Camelina sativa* (L.) Crantz – цінна олійна рослина. *Інтродукція рослин*. 2014. 62(2). С. 50–58.

Рахметов Д.Б., Заіменко Н.В., Бондарчук О.П., Блюм Я.Б., Рахметова С.О., Фіщенко В.В. Динаміка фізіолого-біохімічних процесів у рослин родини Brassicaceae залежно від використання кремнієвмісного добрива. *Фізіологія рослин і генетика*. 2024. Т. 56. № 6. С. 1–14. <https://doi.org/10.15407/frg2024.05>

Рева М.Л., Рева Н.Н. Дикі їстівні рослини України. Київ : Наукова Думка, 1976. 168 с.

Рижій (насіння). ФітоДом. URL: <http://fitodom.com/uk/herbs/show/name/rizhiy-nasinnia/latin/camelina/price/15/pkg/100/uom/g/id/120>

Рижій посівний, ТМ «Скарбниця здоров'я». 2018. URL: <http://fitoskarb.com.ua/index.php/ua/goods-for-slimming-ua/product/view/28/714>

Рижій сійний. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Рижій_сійний

Рижій. ТОВ «Кампруд-Агро». URL: <https://agro-semena.com/nasinnya/oliyni-kulturi/rizhiy/>

Рудаков О.Б. Место хроматографии в контроле качества жиров. *Масла и жиры*. 2004. 4. С. 1–2.

Савіна Ю.С., Тарасенко Г.В., Пальчевська Т.А. Перспективи розробки лікарського засобу на основі Рижію (*Camelina sativa* (L.) Crantz) як джерела

омега-3 кислот для лікування атеросклерозу. Київ, 2020. С. 423–427. URL: https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/17570/1/20210505_Savina_P423-427.pdf

Сорока В.І., Андрущенко А.В., Шовгун О.О. та ін. Методика державної науково-технічної експертизи сортів рослин. Вип. 7. Друге видання. Київ : Алефа, 2011. 108 с.

Сучасні методи в алелопатичних дослідженнях. Методичний посібник. За заг. ред. чл.-кор. НАН України, професора Н.В. Заїменко. Київ : Ліра-К, 2021. 200 с.

Топчій О.А., Котляр Є.О. Принципи купажування рослинних олій збалансованих за жирнокислотним складом. *Східно-європейський журнал передових технологій*. 2015. 6(73). С. 26–32.

Фундаментальні аспекти адаптації нових культур в Україні / Д.Б. Рахметов, С.М. Ковтун-Водяницька, О.П. Бондарчук та ін. Київ : НАН України. НБС імені М. М. Гришка, 2024. 360 с.

Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського. Кліматичні дані по м. Києв. 2024. URL: <http://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/uk/diialnist/klimatolohichna-klimatychni-dani-po-kyievu>

Цикало Т., Тржецинський С. Макро- та мікроскопічне вивчення *Camelina sativa* (L.) Crantz. *Фармацевтичний часопис*. 2019. 1. С. 33–39.

Шевченко І., Поляков О., Ведмедєва К., Комарова І. Стратегія виробництва олійної сировини в Україні (малопоширені культури). Запоріжжя : СТАТУС. 2017. 40 с.

Яковлева-Носарь С., Терещенко К. Показники продуктивності ріжюю ярого за різних густоти стояння. Актуальні питання біології, екології та хімії. 2015. Т. 10, № 2. С. 4–11.

Abdullah H., Akbari P., Paulose B., et al. Transcriptome profiling of *Camelina sativa* to identify genes involved in triacylglycerol biosynthesis and accumulation in the developing seeds. *Biotechnology for Biofuels*. 2016. 9. P. 136. <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0555-5>

Abramovic H., Abram V. Effect of added rosemary extract on oxidative stability of *Camelina sativa* oil. *Acta Agriculturae Slovenica*. 2006. 87(2). P. 255–261.

Ackermann O., Greenbaum N., Ayalon A. et al. Using palaeo-environmental proxies to reconstruct natural and anthropogenic controls on sedimentation rates, Tell es-Safi/Gath, eastern Mediterranean. *Anthropocene*. 2014. Vol. 8. P. 70–82.

Agarie S., Agata W., Uchida H., Kubota F., Kaufman P.B. Function of silica bodies in the epidermal system of rice (*Oryza sativa* L.): Testing the window hypothesis. *J. Exp. Bot.* 1996. Vol. 47. P. 655–660.

Agarie S., Uchida H., Agata W., Kaufman P.B. Effects of silicon on stomatal blue-light response in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Prod. Sci.* 1999. Vol. 2. P. 232–234

Agarwal A., Pant T., Ahmed Z. *Camelina sativa*: a new crop with biofuel potential introduced in India. *Current Science*. 2010. 99(9). P. 1194–1195.

Ahmad Z., Anjum S., Skalicky M., Waraich E.A., Muhammad Sabir Tariq R., Ayub M.A., ... & El Sabagh A. Selenium alleviates the adverse effect of drought in oilseed crops camelina (*Camelina sativa* L.) and canola (*Brassica napus* L.). *Molecules*. 2021. 26(6). Article. 1699.
<https://doi.org/10.3390/molecules26061699>

Ahmad Z., Waraich E. A., Barutcular C., Alharby H., Bamagoos A., Kizilgeci F., El Sabagh A. Enhancing drought tolerance in *Camelina sativa* L. and canola (*Brassica napus* L.) through application of selenium. *Pak. J. Bot.* 2020. 52(6). P. 1927–1939.

Ahmed K. S., Panwar B. S., & Gupta S. P. Phytoremediation of cadmium-contaminated soil by *Brassica* species. *Acta agronomica hungarica*. 2001. 49(4). P. 351–360.

Alam A., & Dwivedi P. Modeling site suitability and production potential of carinata-based sustainable jet fuel in the southeastern United States. *Journal of Cleaner Production*. 2019. 239. Article. 117817.

Alberghini B., Zanetti F., Corso M., Boutet S., Lepiniec L., Vecchi A. & Monti A. Camelina [*Camelina sativa* (L.) Crantz] seeds as a multi-purpose feedstock for bio-based applications. *Ind. Crops Prod.* 2002. Vol. 182. Article. 114944.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114944>

Albert R., Shahack-Gross R., Cabanes D., Gilboa A., Lev-Yadun S., Portillo M., Sharon I., Boaretto E., Weiner S. Phytolith-rich layers from the Late Bronze and Iron Ages at Tel Dor (Israel): Mode of formation and archaeological significance. *J. Archaeol. Sci.* 2008. Vol. 35. P. 57–75.

Alcántara C., Pujadas A., Saavedra M. Management of cruciferous cover crops by mowing for soil and water conservation in southern Spain. *Agricultural Water Management*. 2011. 98(6). P. 1071–1080.

Alemayehu N., Becker H. Genotypic diversity and patterns of variation in a germplasm material of Ethiopian mustard (*Brassica carinata* A. Braun). *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2002. Vol. 49. P. 573–582

Alemayehu N., Becker H. Variation and inheritance of erucic acid content in *Brassica carinata* germplasm collections from Ethiopia. *Plant Breeding*. 2001. Vol. 120. P. 331–335.

Ali A., Franzoni G., Petrini A. et al. Investigating physiological responses of Wild Rocket subjected to artificial Ultraviolet B irradiation. *Scientia Horticulturae*. 2023. Vol. 322. Article. 112415. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112415>

Ali A., Santoro P., Mori J., Ferrante A., & Cocetta G. Effect of UV-B elicitation on spearmint's (*Mentha spicata* L.) morpho-physiological traits and secondary

metabolites production. *Plant Growth Regul.* 2023. <https://doi.org/10.1007/s10725-023-01028-7>

Ambaw Y.D., Abitea A.G., Olango T.M., & Aboye B.M. Agromorphological and Physiological Trait Diversity in Ethiopian Mustard (*Brassica carinata* A. Braun) Germplasm. *Advances in Agriculture*. 2024. № 1. Article. 2398294. <https://doi.org/10.1155/aia/2398294>

Amiri-Darban N., Nourmohammadi G., Rad A.H.S., Mirhadi S.M.J., Heravan I.M. Potassium sulfate and ammonium sulfate affect quality and quantity of camelina oil grown with different irrigation regimes. *Ind. Crops Prod.* 2020, Vol. 148 Article. 112308. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112308>.

Ammar E.M., Martin J., Philippidis, G.P. Biochemical conversion of *Brassica carinata* biomass to organic acids. *GCB Bioenergy*. 2021. Vol. 13, № 4. P. 618–626.

Anhydrous milk fat – Determination of sterol composition by gas-liquid chromatography (reference method). ISO 12078:2006/ IDF 159:2006. [Effective as of 2006.02.03]. International Organization for Standardization, 2006. 16 p. (International standards).

Animal and vegetable fats and oils – Determination of aliphatic hydrocarbons in vegetable oils. ISO 17780:2015. [Effective as of 2015-08-25]. International Organization for Standardization, 2015. 28 p. (International standards).

Animal and vegetable fats and oils – Determination of composition of unsaponifiable matter – Part 1: Method using diethyl ether extraction (Reference method). ISO 3596-1:1988. [Effective as of 1988.06.01]. Online Browsing Platform (OBP). Standards catalogue, 1988. 19 p. (International standards).

Animal and vegetable fats and oils – Gas chromatography of fatty acid methyl esters – Part 1: Guidelines on modern gas chromatography of fatty acid methyl esters. ISO 12966-1:2014. [Effective as of 2014.12.03]. International Organization for Standardization. 2014. 7 p. (International standards).

Animal and vegetable fats and oils – Gas chromatography of fatty acid methyl esters – Part 2: Preparation of methyl esters of acids. ISO 12966-2:2017. [Effective as of 2017-03-15]. International Organization for Standardization, 2017. 15 p. (International standards).

Animal and vegetable fats and oils – Gas chromatography of fatty acid methyl esters – Part 4: Determination by capillary gas chromatography. ISO 12966-4:2015. [Effective as of 2015-06-18]. International Organization for Standardization, 2015. 21 p. (International standards).

Aronen I., Valkonen E., Tupasela T., Hiidenhovi J., Valaja J. The effect of *Camelina sativa* cake on fatty acid composition and sensory quality of eggs and broiler meat. *World Poultry Science Association, Proc.* 19th European Symposium on Quality of Poultry Meat, 13th European Symposium on the Quality of Eggs and Egg Products, Turku, Finland, 21–25 June 2009. P. 1–11. URL:

<https://www.thepoultrysite.com/articles/proceedings-wpsa-symposia-on-quality-of-poultry-meat-eggs-and-egg-products-2009>

Astaneh N., Bazrafshan F., Zare M., Amiri B. & Bahrani A. Nano-fertilizer prevents environmental pollution and improves physiological traits of wheat grown under drought stress conditions. *Scientia Agropecuaria*. 2021. 12(1). P. 41–47. <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.005>

Astiari N.K.A., Sulistiawati N.P.A., Mahardika I.B.K. & Rai I.N. Overcoming the Failure of Fruit-set and Fruit Drop of Siam Orange on Off-season Period Through Application of Mycorrhizal Inoculants and ZNSO₄ Micro Fertilizer Dosage. *International J. of Life Sci*. 2019. 3(3). P. 16–24.

Ayadi J., Debouba M., Rahmani R. & Bouajila J. Brassica genus seeds: A review on phytochemical screening and pharmacological properties. *Molecules*. 2022. 27(18). Article. 6008. <https://doi.org/10.3390/molecules27186008>

Azcón-Aguilar C., Bago B., Barea J.M. Saprophytic growth of AMF. In: Varma A, Hock B (eds) *Mycorrhiza: structure, function, molecular biology and biotechnology*. 2nd Ed. Springer-Verlag, Berlin, 1999. P. 391–407.

Bago B., Bécard G. Bases of the obligate biotrophy of arbuscular mycorrhizal fungi. In: Gianinazzi S., Schüepp H., Barea J.M., Haselwandter K. (eds) *Mycorrhizal Technology in Agriculture*. 2002. Birkhäuser, Basel.

Bago B., Pfeiffer P.E., Shachar-Hill Y. Carbon metabolism and transport in arbuscular mycorrhizas. *Plant physiology*. 2000. 124(3). P. 949–958.

Bago B., Azcón-Aguilar C., Goulet A., Piché Y. Branched absorbing structures (BAS): a feature of the extraradical mycelium of symbiotic arbuscular mycorrhizal fungi. *The New Phytologist*. 1998. 39(2). P. 375–388.

Ban Y., Khan N.A., Yu P. Nutritional and metabolic characteristics of *Brassica carinata* coproducts from biofuel processing in dairy cows. *Agricultural and Food Chemistry*. 2017. 65(29). P. 5994–6001. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02330>

Bano K., Kumar B., Alyemeni M.N., Ahmad P. Exogenously-sourced salicylic acid imparts resilience towards arsenic stress by modulating photosynthesis, antioxidant potential and arsenic sequestration in *Brassica napus* plants. *Antioxidants*. 2022. 11(10). P. 2010.

Barea J.M., Jeffries P. Arbuscular mycorrhizas in sustainable soil plant systems. *Mycorrhiza: Structure, Function, Molecular Biology and Biotechnology*. Springer-Verlag. Berlin. 1995. P. 521–560.

Bashyal M., Mulvaney M.J., Crozier C.R. et al. *Brassica carinata* nutrient accumulation and partitioning across maturity types and latitude. *Crop Science*. 2023. Vol. 63, № 2. P. 833–851. <https://doi.org/10.1002/csc2.20900>

Bashyal M., Mulvaney M.J., Lee D. et al. *Brassica carinata* biomass, yield, and seed chemical composition response to nitrogen rates and timing on southern Coastal Plain soils in the United States. *GCB Bioenergy*. 2021. 13. P. 1275–1289. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12846>

Bécard G., Piché Y., Fortin J.A. Some aspects on the biotrophy of VAM fungi, *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 1990. 29(1-4). P. 29–33.

Belavneh H.D., Wehling R.L., Zhang Y., Ciftci O.N. Development of omega-3-rich *Camelina sativa* seed oil emulsions. *Food Sci Nutr*. 2018. 69(2). P. 440–449. <https://doi.org/10.1002/fsn3.572>

Belton D.J., Deschaume O., Perry C.C. An overview of the fundamentals of the chemistry of silica with relevance to biosilicification and technological advances. *FEBS J*. 2012. Vol. 279. P. 1710–1720.

Berti M., Gesch R., Eynck C., Anderson J., Cermak S. *Camelina* uses, genetics, genomics, production, and management. *Ind. Crop. Prod*. 2016. 94. P. 690–697. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.034>.

Berti M., Wilckens R., Fischer S., Solis A., Johnson B. Seeding date influence on camelina seed yield, yield components, and oil content in Chile. *Ind. Crops Prod*. 2011. Vol. 34. P. 1358–1365. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.12.008>.

Bethlenfalvay G.J., Schüepp H. Arbuscular mycorrhizas and agrosystem stability. *Impact of arbuscular mycorrhizas on sustainable agriculture and natural ecosystems*. 2011. P. 1204–1209.

Bhat J.A., Shivaraj S.M., Singh P., Navadagi D.B., Tripathi D.K., Dash P.K., Solanke A.U., Sonah H., Deshmukh R. Role of silicon in mitigation of heavy metal stresses in crop plants. *Plants*. 2019. Vol. 8. P. 71.

Blackshaw R., Johnson E., Gan Y., May W., McAndrew D., Barthet V., ... & Wispinski D. Alternative oilseed crops for biodiesel feedstock on the Canadian prairies. *Canadian Journal of Plant Science*. 2011. 91(5). P. 889–896.

Blume R.Y., Lantukh G.V., Levchuk I.V., Lukashevych K.M., Rakhmetov D.B. & Blume Y.B. Evaluation of potential biodiesel feedstocks: camelina, turnip rape, oil radish and tyfon. *The Open Agric. J*. 2020. 14(1). <https://doi.org/10.2174/1874331502014010299>

Blume R.Y., Rakhmetov D.B., Rakhmetova S.O. et al. Introduction and performance of emerging biofuel crop *Brassica carinata* in Ukraine. 31 st European Biomass Conference and Exhibition Proceedings. *EUBCE*. 2023. P. 105–109.

<http://programme.eubce.com/abstract.php?idabs=20302&idses=1470&idtopic=2>

Bouaid A., Diaz Y., Martinez M., & Aracil J. Pilot plant studies of biodiesel production using *Brassica carinata* as raw material. *Catalysis today*. 2005. 106(1–4). P. 193–196.

Cais-Sokolinska D., Majcher M., Pikul J. et al. The effect of *Camelina sativa* cake diet supplementation on sensory and volatile profiles of ewe's milk. *African Journal of Biotechnology*. 2011. 10(37). P. 7245–7552.

Camelina Oil. URL: https://www.natureinbottle.com/product/camelina_oil
Camelina. URL: www.theplantlist.org

Campbell B.T., Seepaul R., Iboyi J.E., et al. Agronomic performance and the effect of genotype-by-environment interaction for *Brassica carinata* in the southeastern US. *Industrial Crops and Products*. 2023. Vol. 203. Article. 117196. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117196>

Cardone M., Mazzoncini M., Menini S., Rocco V., Senatore A., Seggiani M., Vitolo S. *Brassica carinata* as an alternative oil crop for the production of biodiesel in Italy: agronomic evaluation, fuel production by transesterification and characterization. *Biomass and Bioenergy*. 2003. Vol. 25. P. 623–636. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00058-8](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00058-8)

Carey J.C., Fulweiler R.W. The terrestrial silica pump. *PLoS ONE*. 2012. № 7. Article. e52932.

Chabot S., Bel-Rhliid R., Chenevert R. Piche Y. Hyphal growth promotion in vitro of the VA mycorrhizal fungus, *Gigaspora margarita* Becker & Hall, by the activity of structurally specific flavonoid compounds under CO₂-enriched conditions. *New Phytologist*. 1992. 122(3). P. 461–467.

Chadha M.L., Oluoch M.O., Silue D. Promoting indigenous vegetables for health, food security, and income generation in Africa. In XXVII International Horticultural Congress-IHC2006: *International Symposium on Horticultural Plants in Urban and Peri-Urban* 2006. 762 pp. P. 253–262.

Chalker-Scott L. Environmental Significance of Anthocyanins in Plant Stress Responses, *Photochemistry and Photobiology*. 1999. Vol. 70. P. 1–9.

Chauhan J.S., Singh K.H., Singh V.V., Kumar S. Hundred years of rapeseed-mustard breeding in India: accomplishments and future strategies. *Indian J Agric Sci*. 2011. 81(12). P. 1093–1109.

Chen Y., Hu S., Guo Z., Cui T., Zhang L., Lu C., Jin Y. Effect of balanced nutrient fertilizer: A case study in Pinggu District, Beijing, China. *Sci. Total Environ*. 2021. Vol. 754. Article. 142069. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142069>

Ciarescu G., Hebean V., Tamas V., Burcea D. Use of dietary *Camelina* (*Camelina sativa*) seeds during the finishing period: effects on broiler performance and on the organoleptic traits of broiler meat. *Zootehnie si Biotehnologii*. 2007. 40(1). P. 410–417.

Ciubota-Rosie C., Ruiz J., Ramos M., Perez A. Biodisel from *Camelina sativa*: a comprehensive characterization. *Fuel*. 2013. Vol. 105. P. 572–577.

Ciurescu G., Ropota M., Toncea I., Habeanu M. *Camelia* (*Camelina sativa* (L.) Crantz variety) oil and seeds as n-3 fatty acids rich products in broiler diets and its effects on performance, meat fatty acid composition, immune tissue weights and plasma metabolic profile. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2016. Vol. 18. P. 315–326.

Clymans W., Struyf E., Govers G., Vandevenne F., Conley D.J. Anthropogenic impact on amorphous silica pools in temperate soils. *Biogeosciences*. 2011. Vol. 8. P. 2281–2293.

Cockson P., Veazie P., Davis M., Barajas G., Post A., Crozier C. R., & Whipker B. E. The Impacts of micronutrient fertility on the mineral uptake and growth of brassica carinata. *Agriculture*. 2021. 11(3). P. 221. <https://doi.org/10.3390/agriculture11030221>

Cooke J., Degabriel J.L. Plant silicon interactions between organisms and the implications for ecosystems. *Front. Plant Sci.* 2016. № 7. P. 1001. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01001>

Coquerel R. Etude d'un apport en silicium sur le métabolisme azoté et les performances agronomiques du colza (*Brassica napus* L.) et du trèfle (*Trifolium incarnatum* L.) cultivés en monoculture et en association (Doctoral dissertation, Normandie Université) 2024. 176 p. URL: <https://theses.hal.science/tel-04910179v1>

Coradin T., Livage J. Effect of some amino acids and peptides on silicic acid polymerization. *Colloids Surf. Biointerfaces*. 2001. Vol. 21. P. 329–336.

Cornelis J.T., Delvaux B., Cardinal D., André L., Ranger J., Opfergelt S. Tracing mechanisms controlling the release of dissolved silicon in forest soil solutions using Si isotopes and Ge/Si ratios. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2010. Vol. 74. P. 3913–3924.

Coskun D., Britto D.T., Huynh W.Q., Kronzucker H.J. The role of silicon in higher plants under salinity and drought stress. *Front. Plant Sci.* 2016. Vol. 7. P. 1072.

Craswell E. Fertilizers and nitrate pollution of surface and ground water: an increasingly pervasive global problem. *SN Appl. Sci.* 2021. 3(4). P. 518. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04521-8>

Crooks R., Prentice P. The benefits of silicon fertiliser for sustainably increasing crop productivity. *The 5th International Conference on Silicon in Agriculture*, Beijing, 2011. P. 1–18. URL : https://hortcomfiles.wordpress.com/2013/04/si-crop-productivity-agripower_scv.pdf

Crusciol C.A.C., De Arruda D.P., Fernandes A.M. et al. Methods and extractants to evaluate silicon availability for sugarcane. *Sci. Rep.* 2018. Vol. 8. P. 916.

Das S., Ghosh R., Paruya D.K., Yao Y.F., Li C.S., Bera S. Phytolith spectra in respiratory aerial roots of some mangrove plants of the Indian Sunderbans and its efficacy in ancient deltaic environment reconstruction. *Quat. Int.* 2014. Vol. 325. P. 179–196.

De Melo S.P., Korndörfer G.H., Korndörfer C.M., Lana R.M.Q., de Santana D.G. Silicon accumulation and water deficit tolerance in *Brachiaria* grasses. *Sci. Agric.* 2003. Vol. 60. P. 755–759.

Delesa, A. Genetic variability and association among seed yield and yield related traits in ethiopian mustard (*Brassica carinata* A. Braun) 2006. P. 75–76.

Deng Q., Huang F., Huang Q., Xu J., Liu C. Lipid-lowering evaluation of cold-pressed *Camellina sativa* oil. *Journal of Food, Agriculture and Environment*. 2001. 9. P. 157–162.

Deshmukh R.K., Vivancos J., Guérin V. et al. Identification and functional characterization of silicon transporters in soybean using comparative genomics of major intrinsic proteins in Arabidopsis and rice. *Plant Mol. Biol.* 2013. Vol. 83. P. 303–315.

Destailats F., Golay P.-A., Joffre F., de Wispelaere M. et al. Comparison of available analytical methods to measure trans-octadecenoic acid isomeric profile and content by gas-liquid chromatography in milk fat. *J. Chromatogr. A*. 2007. 1145. P. 222–228. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2007.01.062>

Detmann K.C., Araújo W.L., Martins S.C.V. et al. Silicon nutrition increases grain yield, which, in turn, exerts a feed-forward stimulation of photosynthetic rates via enhanced mesophyll conductance and alters primary metabolism in rice. *New Phytol.* 2012. Vol. 196. P. 752–762.

Dionisi F., Golay P.A., Fay L.B. Influence of milk fat presence on the determination of trans fatty acids in fats used for infant formulae. *Analytica Chimica Acta*. 2002. Vol. 465. P. 395–407. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(02\)00126-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(02)00126-5)

Dobre P., Jurcone S. *Camelina sativa* – an oilseed crop with unique agronomic characteristics. *Scientific Papers*. 2011. 54. C. 425–430.

Dol Hamid R., Swedlund P.J., Song Y., Miskelly G.M. Ionic strength effects on silicic acid (H_4SiO_4) sorption and oligomerization on an iron oxide surface: An interesting interplay between electrostatic and chemical forces. *Langmuir*. 2011. Vol. 27. P. 12930–12937.

Draft International Standard ISO/DIS 17678/ IDF 202. Milk fat – Detection of foreign fats by gas chromatographic analysis of triglycerides (Reference method). International Organization for Standardization, 2008. 8 p. (International standards).

Dürr H.H., Meybeck M., Hartmann J., Laruelle G.G., Roubéix V. Global spatial distribution of natural riverine silica inputs to the coastal zone. *Biogeosciences*. 2011. Vol. 8. №3. P. 597–620. <https://doi.org/10.5194/bg-8-597-2011>

Ehrenberg C.G. Mikrogeologie: Das Erden und Felsen Schaffende Wirken des Unsichtbar Kleinen Selbständigen Lebens auf der Erde. Leipzig: L. Voss. 1854. P. 153.

Euliss K.W., Dorsey B.L., Benke K.C., Banks M.K., Schwab A.P. The use of plant tissue silica content for estimating transpiration. *Ecol. Eng.* 2005. Vol. 25. P. 343–348.

Euro+Med 2006+ [continuously updated]: Euro+Med PlantBase – the information resource for Euro-Mediterranean plant diversity. URL: <http://www.europlusmed.org>

Faisal S., Callis K.L., Slot M., Kitajima K. Transpiration-dependent passive silica accumulation in cucumber (*Cucumis sativus*) under varying soil silicon availability. *Botany*. 2012. Vol. 90. P. 1058–1064.

Faten M.I., Habbasha S.F. Chemical Composition, Medicinal Impacts and Cultivation of *Camelina* (*Camelina sativa*). *International Journal of PharmTech Research*. 2015. 8(10). P. 114–122. URL: <https://www.researchgate.net/publication/306328892>

Fernández Honaine M., Borrelli N.L., Osterrieth M., Del Rio L. Leaf and culm silicification of Pampas grass (*Cortaderia selloana*) developed on different soils from Pampean region, Argentina. *Aust. J. Bot.* 2017. Vol. 65. P. 1–10.

Fernández Honaine M., Osterrieth M.L. Silicification of the adaxial epidermis of leaves of a panicoid grass in relation to leaf position and section and environmental conditions. *Plant Biol.* 2012. Vol. 14. P. 596–604.

Fiedler S., Vepraskas M.J., Richardson J.L. Soil redox potential: importance, field measurements and observations. In *Advanced in Agronomy*. 2007. 94. P. 1–54. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(06\)94001-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(06)94001-2)

Font R., Río M. D., Arthur E., Bancroft I., Chinoy C., Morgan C., & Haro A. D. Survey of seed storage components in Ethiopian mustard (*Brassica carinata* A. Braun). *Cruciferae Newsl.* 2004. Vol. 25. P. 109–110.

Food Security and Sustainable Nutrition: The Role of Vegetable Oils and their Resilient Cluster. Global Trends and Innovation Policy Alliance. 2022. URL: <https://www.gtipa.org/food-security-and-sustainable-nutrition-role-vegetable-oils-and-their-resilient-cluster>

Food Security. Rising Food Insecurity in 2023. Food Safety Update. The World Bank response to growing food insecurity. URL: <https://www.worldbank.org/en/topic/agriculture/brief/f>

Frame D., Palmer M., Peterson B. Use of *Camelina sativa* in the diets of young turkeys. *Journal of Apply Poultry Resource*. 2007. 16. P. 381–386.

Francis A., Warwick S. The Biology *Camelina alyssum* (Mill.) Thell.; *C. microcarpa* Andr. ex DC.; *C. sativa* (L.) Cranrz. *Canadian Journal of Plant Science*. 2009. 89(4). P. 791–810.

Frohlich A., Rice B. Evaluation of *Camelina sativa* oil as a feedstock for biodiesel production Industrial Crops and Products. 2005. 21. P. 25–31.

Gagour J., Ahmed M.N., Bouzid H.A. et al. Proximate composition, physicochemical, and lipids profiling and elemental profiling of rapeseed (*Brassica napus* L.) and sunflower (*Helianthus annuus* L.) grown in Morocco. *Evidence-based Complementary and Alternative Medicine*. 2022. eCAM, 2022.

Gao X., Zou C., Wang L., Zhang F. Silicon decreases transpiration rate and conductance from stomata of maize plants. *J. Plant Nutr.* 2006. Vol. 29. P. 1637–1647.

Gao X., Zou C., Wang L., Zhang F. Silicon improves water use efficiency in maize plants. *J. Plant Nutr.* 2004. Vol. 27. P. 1457–1470.

Gatto A., Melilli M.G., Raccuia S.A. et al. A comparative study of oilseed crops (*Brassica napus* L. subsp. *oleifera* and *Brassica carinata* A. Braun) in the biodiesel production chain and their adaptability to different Italian areas. *Industrial Crop and Products*. 2015. Vol. 75. P. 98–107. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.04.029>

Gattullo C.E., Allegretta I., Medici L. et al. Silicon dynamics in the rhizosphere: Connections with iron mobilization. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2016. Vol. 179. P. 409–417.

Gehring A., Friedt W., Lühs W., Snowdon R. Genetic mapping of agronomic traits in false flax (*Camelina sativa* subsp. *sativa*) Genome. 2006. 49. P. 1555–1563. <https://doi.org/10.1139/g06-117>.

Gesch R.W., Long D.S., Palmquist D. et al. Agronomic performance of Brassicaceae oilseeds in multiple environments across the Western USA. *Bioenergy Research*. 2019. Vol. 12. P. 509–523.

Gesch R.W. Influence of genotype and sowing date on *Camelina* growth and yield in the north central U.S. *Industrial Crops and Products*. 2014. 54. P. 209–215.

Gesch R.W., Cermak S.C. Sowing date and tillage effects on fall-seeded *Camelina* in the Northern Corn Belt. *Agronomy Journal*. 2011. 103(4). P. 980–987.

Getinet A. Inheritance of erucic acid in *Brassica carinata* A. Braun and development of low glucosinolate lines: Doctoral dissertation, Ph. D. Thesis. Saskatoon: University of Saskatchewan. 1996. P. 149.

Getinet A., Rakow G., Raney J. P., Downey R. K. Glucosinolate content in interspecific crosses of *Brassica carinata* with *B. juncea* and *B. napus*. *Plant Breeding*. 1997. 116(1). P. 39–46.

Ghidoli M., Pesenti M., Colombo F., Nocito F.F., Pili R., Araniti F. *Camelina sativa* (L.) Crantz as a promising cover crop species with allelopathic potential. *Agronomy*. 2023. Vol. 13. № 8. Article. 2187. <https://doi.org/10.3390/agronomy13082187>

Gianinazzi S., Schüepp H. Impact of arbuscular micorhyza on sustainable agriculture and natural ecosystems. Birkhäuser-Verlag, Basel, 1994. P. 117–131.

Gillespie G., Brennan L., Burke J. Camelina: food and crop potential. UCD, Dublin Dermot Forristal, Teagasc, Oak Park, Carlow. URL: <https://www.teagasc.ie/media/website/crops/crops/Camelina--Food-and-crop-product-potential.pdf>

Glamkhar K., Croser J., Aryamanesh N., Campbell M. et al. Camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) as an alternative oilseed: molecular and ecogeographic analyses. *Genome*. 2010. Vol. 53, Iss. 7. <https://doi.org/10.1139/G10-034>

Glauber J., Laborde D., Mamun A. The impact of the Ukraine crisis on the global vegetable oil market. 2022. URL: <https://www.foodsecurityportal.org/node/1988>

Golokhvast K.S., Seryodkin I.V., Bulakh E.M. et al. Mycolith (fungal phytolith) morphotypes and biosilification of proteins in wood-destroying and pileate fungi. *Bot. Pacifica*. 2018. Vol. 7. P. 63–70.

Golubkina N., Antoshkina M., Bondareva L. et al. Effect of foliar application of sodium selenate on mineral relationships in Brassicaceae crops. *Horticulturae*. 2023. 9(5). Article. 535. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9050535>

Gomes M.P, Garcia Q.S., Barreto L.C. et al. Allelopathy: an overview from micro- to macroscopic organisms, from cells to environments, and the perspectives in a climate-changing world. *Biologia*. 2017. 72(2). P. 113–129. <https://doi.org/10.1515/biolog-2017-0019>.

Gómez-Campo C. (Ed.). Biology of Brassica coenospecies. Madrid: Elsevier Science B. Vol. 1. 1999. P. 486

Gong H., Zhu X., Chen K., Wang S., Zhang C. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. *Plant Sci*. 2005. Vol. 169. P. 313–321.

Gorash O., Klymyshena R., Zinchenko O. Strilets O. Influence of foliar fertilization with micro-fertilizers on physiological grain quality of spring malting barley. *Ukr. J. of Ecol*. 2021. 11(5). P. 15–20. https://doi.org/10.15421/2021_205

Government of Canada. Camelina Oil. Novel Food Information – Camelina Oil. URL: <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/food-nutrition/genetically-modified-foods-other-novel-foods/approved-products/camelina-oil-novel-food-information.html>

Grime J.P., MacPherson-Stewart S.F., Dearman R.S. An investigation of leaf palatability using the snail *Cepaea nemoralis* L. *J. Ecol*. 1968. Vol. 56. P. 405–420.

Guendouz A., Hannachi A., Benidir M., Fellahi A. El Zine, Frih B. Agro-biochemical Characterisation of *Camelina sativa*: *Agricultural Reviews*. 2022. 43(3). P. 278–287. <https://doi.org/10.18805/ag.RF-230>.

Guendouz A.K., Sintim H.Y., Obeng E., Jeliakov V.D. Oilseed camelina (*Camelina sativa* L. Crantz): production systems, prospects and challenges in the USA great plains. *Adv Plants Agric Res*. 2015. 2(2). P. 68–76. <https://doi.org/10.15406/apar.2015.02.00043>.

Gugel R.K., Falk K.C. Agronomic and seed quality evaluation of *Camelina sativa* in western Canada. *Can. J. Plant Sci*. 2006. 86. P. 1047–1058. <https://doi.org/10.4141/P04-081>.

Gutiérrez-Castorena M.D.C., Stoops G., Ortiz Solorio C.A., López Avila G. Amorphous silica materials in soils and sediments of the Ex-Lago de Texcoco, Mexico: An explanation for its subsidence. *Catena*. 2005. Vol. 60. P. 205–226.

Hagashide T. Review of dry matter production and growth modelling to improve the yield of greenhouse tomatoes. *The Horticulture Journal*. 2022. 91(3). <https://doi.org/10.2503/hortj.UTD-RO19>

Hagos Abraha R., Shaibu A.S., Liang J., Wu J., Lin R., Wang X. Characterization and evaluation of the morphological attributes of Ethiopian

mustard (*Brassica carinata* A. Braun) *landraces*. In *Euphytica*. 2024. Vol. 220(3). P. 30. <https://doi.org/10.1007/s10681-023-03284-0>

Hagos R., Shaibu A., Zhang L. et al. Ethiopian Mustard (*Brassica carinata* A. Braun) as an Alternative Energy Source and Sustainable Crop. *Sustainability*. 2020. Vol. 12(18). Article. 7492. <https://doi.org/10.3390/su12187492>.

Hailemariam G.A., Wudineh T.A. Effect of cooking methods on ascorbic acid destruction of green leafy vegetables. *Journal of Food Quality*. 2020. Article. 8908670. <https://doi.org/10.1155/2020/8908670>

Hall C.R., Dagg V., Waterman J.M., Johnson S.N. Silicon alters leaf surface morphology and suppresses insect herbivory in a model grass species. *Plants*. 2020. Vol. 9. P. 643.

Hanhur V.V., Kocherha A.A., Pypko O.S. Len O.I. The effectiveness of microfertilizers for seed treatment and foliar applications of winter wheat crops. *Bul. of Poltava State Agrarian Acad.* 2021. № 2. P. 46–51. <https://doi.org/10.31210/visnyk2021.02.05>

Hartley S.E., DeGabriel J.L. The ecology of herbivore-induced silicon defences in grasses. *Funct. Ecol.* 2016. Vol. 30. P. 1311–1322.

Hattori T., Inanaga S., Araki H. et al. Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. *Physiol. Plant.* 2005. Vol. 123. P. 459–466.

Haynes R.J. What effect does liming have on silicon availability in agricultural soils? *Geoderma*. 2019. Vol. 337. P. 375–383.

He C., Ma J., Wang L. A hemicellulose-bound form of silicon with potential to improve the mechanical properties and regeneration of the cell wall of rice. *New Phytol.* 2015. Vol. 206. P. 1051–1062.

He C., Wang L., Liu J., Liu X., Li, X., Ma, J., Lin, Y., Xu, F. Evidence for “silicon” within the cell walls of suspension-cultured rice cells. *New Phytol.* 2013. Vol. 200. P. 700–709.

Henriet C., Draye X., Oppitz I., Swennen R., Delvaux B. Effects, distribution and uptake of silicon in banana (*Musa* spp.) under controlled conditions. *Plant Soil*. 2006. Vol. 287. P. 359–374.

Hepper C.M. Limited independent growth of a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus *in vitro*. *New Phytol.* 1983. 93. P. 537–542.

Hepper C.M. VAM spore germination and hyphal growth *in vitro* - prospects for axenic culture, 1987. P. 172–174. In: DM Sylvia, LL Hung, JH Graham (ed), 7th NACOM. *Mycorrhizae in the next decade. Practical application and research priorities*, University of Florida, Gainesville.

Hinsinger P., Fernandes Barros O.N., Benedetti M.F., Noack Y., Callot G. Plant-Induced weathering of a basaltic rock: Experimental evidence. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2001. Vol. 65. P. 137–152.

Hiscox J.D., Israelstam C.F. A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. *Canadian Journal of Botany*. 1979. 57. P. 1332–1334. <https://doi.org/10.1080/23311932.2019.1670553>.

Hixson S., Parrish C. Substitution of fish oil with camelina oil and inclusion of camelina meal in diets fed to Atlantic cod (*Gadus morhua*) and their effects on growth, tissue lipid classes, and fatty acids. *Journal of Animal Science*. 2014. 92(3). P. 1055–1067.

Hodson M.J. The development of phytoliths in plants and its influence on their chemistry and isotopic composition. Implications for palaeoecology and archaeology. *J. Archaeol. Sci.* 2016. Vol. 68. P. 62–69.

Hodson M.J. The relative importance of cell wall and lumen phytoliths in carbon sequestration in soil: A hypothesis. *Front. Earth Sci.* 2019. Vol. 7. P. 167.

Hodson M.J., Bell A. The mineral relations of the lemma of *Phalaris canariensis* L., with particular reference to its silicified macrohairs. *Isr. J. Bot.* 1986. Vol. 35. P. 241–253.

Hodson M.J., Sangster A.G., Parry D.W. An ultrastructural study on the developmental phases and silicification of the glumes of *Phalaris canariensis* L. *Ann. Bot.* 1985. Vol. 55. P. 649–665.

Hrastar R., Petrisic M., Ogribo N., Kosir I. Fatty acid and stable carbon isotope characterization of *Camelina sativa* oil: implications for authentication. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2009. 57. P. 579–585. URL: <https://www.ceitec.eu/genome-origin-and-evolution-of-an-important-crop-camelina-sativa-and-its-relatives-uncovered-by-czech-scientists/t10213>

Hrusha V.M. Analysis of data measured by portable fluorometer “floratest”. *Computer Systems and Networks*. 2015. Vol. 14. P. 109–116. URL: <https://www.gbif.org/uk/>

Hunsaker D.J., French A.N., Thorp K.R. *Camelina* water use and seed yield response to irrigation scheduling in an arid environment. *Irrigation Science*. 2013. 31. P. 911–929. <https://doi.org/10.1007/s00271-012-0368-7>.

Hunsaker D.J., French A.N., Thorp K.R. *Camelina* water use and seed yield response to irrigation scheduling in an arid environment. *Irrig. Sci.* 2012. Vol. 31. P. 911–929. <https://doi.org/10.1007/s00271-012-0368-7>.

Iboyi J.E. et al. Double-cropping effects of *Brassica carinata* and summer crops: I. Effects of summer cropping history on carinata production. *Industrial Crops and Products*. 2023. Vol. 194. Article. 116364. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116364>

Ibrahim F.M., El Habbasha S.F. Chemical Composition, Medicinal Impacts and Cultivation of Camelina (*Camelina sativa*). *Int. J. PharmTech Res.* 2015. 8(10). P. 114–122.

Iler R.K. Surface and Colloid Science. John New York: Wiley-interscience. 1973. P. 54

Jabeen N. Agricultural, Economic and Societal Importance of Brassicaceae Plants. In: Hasanuzzaman, M. (eds) The Plant Family Brassicaceae. Springer, Singapore. 2020. P. 45–128. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6345-4_2

Jamshidi Z.A., Hasanloo T., Naji A.M., Delangiz N., Farhangi-Abriz S., Asgari Lajayer B., Farooq M. Physiological and biochemical evaluation of commercial oilseed rape (*Brassica napus* L.) cultivars under drought stress. *Gesunde Pflanzen*. 2023. 75(4). P. 847–860.

Jarour E. Genome Origin and Evolution of an Important Crop, *Camelina sativa*, and its Relatives Uncovered by Czech Scientists. Press release, 29. 11. 2019.

Jeandet P., Formela-Luboiniska M., Labudda M., Morkunas I. The roles of sugars in plant responses to stress and their regulatory function during development. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022. Vol. 23. Article. 5161. <https://doi.org/10.3390/ijms23095161>

Jenkins E., Jamjoum K., Al Nuimat S. Irrigation and phytolith formation: An experimental study. *Water Life Civilis*. 2011. P. 347–372.

Jenkins E., Jamjoum K., Nuimat S., Stafford R., Nortcliff S., Mithen S. Identifying ancient water availability through phytolith analysis: An experimental approach. *J. Archaeol. Sci*. 2016. Vol. 73. P. 82–93.

Johnston A., Bezeau L.M., Smoliak S. Variation in silica content of range grasses. *Can. J. Plant Sci*. 1967. Vol. 47. P. 65–71.

Jovanić B.R., Radenković B., Despotović-Zrakić M., Bogdanović Z., Barać D. Effect of UV-B radiation on chlorophyll fluorescence, photosynthetic activity and relative chlorophyll content of five different corn hybrids. In *J Photochem Photobiology*. 2022. Vol. 10. Article. 100115. <https://doi.org/10.1016/j.jpap.2022.100115>

Juodka R., Nainienė R., Juškienė V. et al. Camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) as Feedstuffs in Meat Type Poultry Diet: A Source of Protein and n-3 Fatty Acids. *Animals*. 2022. 12(3). P. 295. <https://doi.org/10.3390/ani12030295>.

Justice Laws Website. Food and Drugs Regulations. B.09.001.DIVISION. 9. Fats and Oils: B.09.022. URL: https://laws-lois.justice.gc.ca/eng/regulations/c.r.c.,_c._870/index.html

Kabbage M., Yarden O., Dickman M.B. Pathogenic attributes of *Sclerotinia sclerotiorum*: Switching from a biotrophic to necrotrophic lifestyle. *Plant Science*. 2015. P. 53–60.

Kaczorek D., Puppe D., Busse J., Sommer M. Effects of phytolith distribution and characteristics on extractable silicon fractions in soils under different vegetation—An exploratory study on loess. *Geoderma*. 2019. Vol. 356. Article. 113917.

Kahrizi D., Rostami-Ahmadvandi, Akbarabadi A., Feasibility H. Cultivation of *Camelina* (*Camelina sativa*) as Medicinal-Oil Plant in Rainfed Conditions in Kermanshah-Iran's First Report. *Journal of Medicinal Plants and By-products (JMPB)*. 2015. <https://doi.org/10.22092/JMPB.2015.108911>

Karcauskiene D., Sendzikiene E., Makareviciene V. et al. False flax (*Camelina sativa* L.) as an alternative source for biodiesel production. *Zemdirbyste-Agriculture*. 2014. 101(2). P. 161–168.

Katar D. Determination of fatty acid composition on different false flax (*Camelina sativa* (L.) Crantz) genotypes under Ankara ecological conditions. *Turkish Journal of Field Crops*. 2013. 18(1). P. 66–72.

Katz O. Silicon and plant–animal interactions: Towards an evolutionary framework. *Plants*. 2020. Vol. 9. P. 430.

Katz O., Lev-Yadun S., Bar (Kutiel) P. Plant silicon and phytolith contents as affected by water availability and herbivory: Integrating laboratory experimentation and natural habitat studies. *Silicon*. 2018. Vol. 10. P. 2387–2389.

Katz O., Lev-Yadun S., Bar P. Do phytoliths play an antiherbivory role in southwest Asian Asteraceae species and to what extent? *Flora*. 2014. Vol. 209. P. 349–358.

Katz O., Lev-Yadun S., Pua Bar K. Plasticity and variability in the patterns of phytolith formation in Asteraceae species along a large rainfall gradient in Israel. *Flora*. 2013. Vol. 208. P. 438–444.

Kaufman P.B., Petering L.B., Smith J.G. Ultrastructural development of cork-silica cell pairs in *Avena* internodal epidermis. *Bot. Gaz.* 1970. Vol. 131. P. 173–185.

Kauss H., Seehaus K., Franke R., Gilbert S., Dietrich R.A., Kröger N. Silica deposition by a strongly cationic proline-rich protein from systemically resistant cucumber plants. *Plant J.* 2003. Vol. 33. P. 87–95.

Khangura R., & Abera M. Strains of *Leptosphaeria maculans* with the capacity to cause crown canker on *Brassica carinata* are present in Western Australia. *Plant disease*. 2006. 90(6). P. 832–832.

Kim H., Silva J. [et al.]. Toward production of jet fuel functionality in oilseeds: identification of FatB acyl-acyl carrier protein thioesters and evaluation of combinatorial expressiostrategies in *Camelina* seed. *J. Experimental Bot.* 2015. 66(14). P. 4251–4265. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv225>

Kim K., Neuberger P., Daly E.J., Gorzelak M., Hernandez-Ramirez G. Arbuscular mycorrhizal fungi community linkages to soil nutrient availability across contrasting agroecosystems. *Applied Soil Ecology*. 2022. 176. P. 104–464.

Kloppholz S., Kuhn H., Requena N. A Secreted Fungal Effector of *Glomus* intraradices Promotes Symbiotic Biotrophy, *Current Biology*. 2011. 21(14). P. 1204–1209.

Kravets V.S., Kretinin S.V., Derevyanchuk M.V., Drach S.V., Litvinovskaya R.P., Khripach V.A. Effect of low temperatures on the level of endogenous brassinosteroids. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*. 2011. 8. P. 155–159.

Krohn B., Fripp M. A life cycle assessment of biodiesel derived from the «nichefilling» energy crop camelina in the USA. *Applied Energy*. 2012. 92. P. 92–98.

Krzyżaniak M., Stolarski M.J. Life cycle assessment of camelina and crambe production for biorefinery and energy purposes. *J. Clean. Prod.* 2019. Vol. 237 Article. 117755. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117755>

Kumar A., Yadav S., Ahlawat N., Yadav J. Biochemical basis of resistance to mustard aphid *Lipaphis erysimi* (Kaltenbach). *Indian Journal of Entomology*. 2020. Vol. 82. Iss. 4. P. 875–879. <http://dx.doi.org/10.5958/0974-8172.2021.00027.4>

Kumar S., Mawlong I., Nanjundan J., Aravind J., Singh D. Variation in β -carotene and other antioxidants among different species of oilseed *Brassica*. *Indian Journal of Agricultural Biochemistry*, 2017. 30(2). P. 129–134. <https://doi.org/10.5958/0974-4479.2017.00021.1>

Kumar S., Seepaul R., Mulvaney M. J. et al. Brassica carinata genotypes demonstrate potential as a winter biofuel crop in South East United States. *In Industrial Crops and Products*. 2020. Vol. 150. Article. 112353. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112353>

Kvedaras O.L., Keeping M.G., Goebel F.R., Byrne M.J. Larval performance of the pyralid borer *Eldana saccharina* Walker and stalk damage in sugarcane: Influence of plant silicon, cultivar and feeding site. *Int. J. Pest Manag.* 2007. Vol. 53. P. 183–194.

Labuda S.Z., Vetchinnikov A.A. Soil susceptibility on reduction as an index of soil properties applied in the investigation upon soil devastation. *Ecological Chemistry and Engineering*. 2011. Vol. 18(3). P. 333–344.

Lal B., Rana K.S., Rana D.S., Shivay Y.S., Priyanka Gautam P.G., Ansari M.A., & Ekta Joshi E.J. Assessment of economics, energy use and yield advantage indices of Ethiopian mustard+ chickpea intercropping system under dry land conditions. *Res. on. Crops*. 2013. 14(3) P. 815–824

Lanning F.C., Eleuterius L.N. Silica and ash in tissues of some coastal plants. *Ann. Bot.* 1983. Vol. 51. P. 835–850.

Li H., Dai M., Dai S., Dong X. Current status and environment impact of direct straw return in China's cropland—A review. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2018. Vol. 159. P. 293–300.

Li L., Zheng C., Fu Y., Wu D., Yang X., Shen H. Silicate-Mediated alleviation of Pb toxicity in banana grown in Pb-contaminated soil. *Biol. Trace Elem. Res.* 2012. Vol. 145. P. 101–108.

Li N.N., Jie D.M., Ge Y., Guo J.X., Liu H.Y., Liu L.D., Qiao Z.H. Response of phytoliths in *Phragmites communis* to elevated CO₂ concentration in Songnen Grassland. *China. Quat. Int.* 2014. Vol. 321. P. 97–104.

Li Z., Song Z., Yan Z., Hao Q., Song A., Liu L., Yang X., Xia S., Liang Y. Silicon enhancement of estimated plant biomass carbon accumulation under abiotic and biotic stresses. A meta-analysis. *Agron. Sustain. Dev.* 2018. Vol. 38. P. 26.

Li Z.-H., Wang Q., Ruan X., Pan C.-D., Jiang D.-A. Phenolics and plant allelopathy. *Molecules*. 2010. 15(12), P. 8933–8952. <https://doi.org/10.3390/molecules15128933>.

Liang Y., Si J., Römheld V. Silicon uptake and transport is an active process in *Cucumis sativus*. *New Phytol.* 2005. Vol. 167. P. 797–804.

Licata M., Farruggia D., Sgroi F., Salamone F., Leto C., Di Miceli G. A comparative study to assess the production of two oilseed crops (*Brassica carinata* A. Braun and *Carthamus tinctorius* L.) and the energy potential of their agricultural biomass residues. *Heliyon*. 2024. 10(22). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38654>

Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*. 1987. Vol. 148. P. 350–382.

Liu S., Chen Y., Li X., Lv J., Yang X., Li J., Bai Y., Zhang S. Linking soil nutrients, microbial community composition, and enzyme activities to saponin content of *Paris polyphylla* after addition of biochar and organic fertiliser. *Chemosphere*. 2024. Vol. 363. 142856. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142856>.

Lohaus R.H., Neupane D., Mengistu M.A., Solomon J.K.Q., Cushman J.C. Five-year field trial of eight *Camelina sativa* cultivars for biomass to be used in biofuel under irrigated conditions in a semi-arid climate. *Agronomy*. 2020. 10. P. 562. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040562>.

Lošák T., Hlusek J., Martinec J. et al. Effect of combined nitrogen and sulphur fertilization on yield and qualitative parameters of *Camelina sativa* [L.] Crtz. (false flax). *Acta Agric. Scand. Sect. B-Soil Plant Sci.* 2011. 61. P. 313–321. <https://doi.org/10.1080/09064710.2010.490234>.

Ma J., Cai H., He C., Zhang W., Wang L. A hemicellulose-bound form of silicon inhibits cadmium ion uptake in rice (*Oryza sativa*) cells. *New Phytol.* 2015. Vol. 206. P. 1063–1074.

Ma J.F., Takahashi E. Effect of silicate on phosphate availability for rice in a P-deficient soil. *Plant Soil*. 1991. Vol. 133. P. 151–155.

Ma J.F., Tamai K., Yamaji N., Mitani N., Konishi S., Katsuhara M., Ishiguro M., Murata Y., Yano M. A silicon transporter in rice. *Nature*. 2006. Vol. 440. P. 688–691.

Ma J.F., Yamaji N. A cooperative system of silicon transport in plants. *Trends Plant Sci.* 2015. Vol. 20. P. 435–442.

Ma J.F., Yamaji N., Mitani N., Tamai K., Konishi S., Fujiwara T., Katsuhara M., Yano M. An efflux transporter of silicon in rice. *Nature*. 2007. Vol. 448. P. 209–212.

Maguire T.J., Templer P.H., Battles J.J., Fulweiler R.W. Winter climate change and fine root biogenic silica in sugar maple trees (*Acer saccharum*): Implications for silica in the Anthropocene. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2017. Vol. 122. P. 708–715.

Mandrich L., Caputo E. Brassicaceae-derived anticancer agents: Towards a green approach to beat cancer. *Nutrients*. 2020. Vol. 12(3). Article. 868. <https://doi.org/10.3390/nu12030868>

Mann S., Perry C.C. Structural aspects of biogenic silica. *Ciba Found. Symp.* 1986. Vol. 121. P. 40–58.

Manore D., Yohannis A. Evaluating growth, seed yield and yield attributes of Camelina (*Camelina sativa* L) in response to seeding rate and nitrogen fertilizer levels under irrigation condition, southern Ethiopia. *Agric. For. Fish.* 2019. 8. P. 31–35. <https://doi.org/10.11648/j.aff.20190802.11>.

Marillia E., Francis T., Falk K., Smith M., Taylor D. Palliser's promise: *Brassica carinata*, An emerging western Canadian crop for delivery of new bio-industrial oil feedstocks. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2013. Vol. 3. P. 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2013.09.012>

Maršalkienė N., Žilėnaitė L., Karpavičienė B. Oil content and composition in seeds of *Camelina sativa* and *Crambe abyssinica* cultivars. *Journal of Elementology*. 2020. 25(4). P. 1399–1412. <https://doi.org/10.5601/jelem.2020.25.3.2023>.

Matichenkov V.V., Bocharnikova E.A. The relationship between silicon and soil physical and chemical properties. In: Silicon in Agriculture, Datnoff, L.E., Snyder, G.H., Korndörfer, G.H., Eds. Elsevier: Amsterdam. The Netherlands. 2001. P. 209–219.

Matteo R., Pagnotta E., Ugolini L., Righetti L., Tavarini S., Lazzeri L. Chapter 27. *Camelina sativa* (Cranz.) from minor crop to potential breakthrough. Neglected and Underutilized Crops. *Future Smart Food*. 2023. P. 781–801. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90537-4.00025-9>

Maxwell K., Johnson G.N. Chlorophyll fluorescence—a practical guide. *J. Exp. Bot.* 2000. 51(345). P. 659–668. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.345.659>

Mayland H.F., Wright J.L., Sojka R.E. Silicon accumulation and water uptake by wheat. *Plant Soil*. 1991. Vol. 137. P. 191–199.

Mazumdar J. Phytoliths of pteridophytes. *S. Afr. J. Bot.* 2011. Vol. 77. P. 10–19.

Mazura M.Y., Miroshnyk N.V. & Teslenko I.K. Diagnosis of the functional state of the photosynthetic apparatus *Taraxacum officinale* (L.) Weber ex F. H. Wigg. by the method of chlorophyll fluorescence induction. *J. of Native and Alien Plant Studies*. 2021. № 1. P. 201–206. <https://doi.org/10.37555/2707-3114.1.2021.247688>

Meena M. C., Meena P. D., Shukla A. K., Barman M., Meena M. K., Singh P., & Kumar A. Role of plant nutrients in enhancing productivity and managing diseases of oilseed Brassica. *Journal of Oilseed Brassica*. 2016 1(1). P. 1–20.

Mercader J., Astudillo F., Barkworth M. et al. *Poaceae* phytoliths from the Niassa Rift, Mozambique. *J. Archaeol. Sci.* 2010. Vol. 37. P. 1953–1967.

Meunier J.D., Guntzer F., Kirman S., Keller C. Terrestrial plant-Si and environmental changes. *Mineral. Mag.* 2008. Vol. 72. P. 263–267.

Meunier J.D., Sandhya K., Prakash N.B., Borschneck D., Dussouillez P. pH as a proxy for estimating plant-available Si? A case study in rice fields in Karnataka (South India). *Plant Soil*. 2018. Vol. 432. P. 143–155.

Mezgebe A., Azerefegne F. Effect of water stress on glucosinolate content of *Brassica carinata* and performance of *Brevicoryne brassicae* and *Myzus persicae*. *International Journal of Tropical Insect Science*. 2021. 41. P. 953–960.

Milk fat – Determination of the fatty acid composition by gas-liquid chromatography: ISO 15885:2002/IDF 184:2002, IDT. [Effective as of 2013-07-15]. International Organization for Standardization, 2013. 8 p. (International standards).

Milk fat and milk fat products. Determination of cholesterol content. ISO 12078/IDF 159:1992. [Effective as of 2010.02.02]. International Organization for Standardization. 2010. 18 p. (International standards).

Min K., Freeman C., Kang H., Choi S.U. The regulation by phenolic compounds of soil organic matter dynamics under a changing environment. *BioMed Research International*. 2015. Article 825098. <https://doi.org/10.1155/2015/825098>.

Mitani N., Ma J.F. Uptake system of silicon in different plant species. *J. Exp. Bot.* 2005. Vol. 56. P. 1255–1261.

Mohdaly A., Ramadan M. Characteristics, composition and functional properties of seeds, seed cake and seed oil from different *Brassica carinata* genotypes. *Food Bioscience*. 2020. Vol. 48. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100752>

Mondor M., Hernandez-Alvarez A.J. *Camelina sativa* Composition, Attributes, and Applications: A Review. *European Journal of Lipid Science and Technology*. 2021. <https://doi.org/10.1002/ejlt.202100035>.

Moser B., Vaughn S. Evaluation of alkyl esters from *Camelina sativa* oil as biodiesel and as blend components in ultra low-sulfur diesel fuel. *Bioresource Technology*. 2010. 101. P. 646–653.

Mosse B. Some studies relating to ‘independent’ growth of vesicular arbuscular endophytes. *Can J. Bot.* 1988. 6. P. 2533–2540.

Motomura H., Fujii T., Suzuki M. Silica deposition in relation to ageing of leaf tissues in *Sasa veitchii* (Carrière) Rehder (*Poaceae: Bambusoideae*). *Ann. Bot.* 2004. Vol. 93. P. 235–248.

Müller F., Struyf E., Hartmann J., Weiss A., Jensen K. Impact of grazing management on silica export dynamics of wadden sea saltmarshes. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2013. Vol. 127. P. 1–11.

Mulvaney M. J., Leon R. G., Seepaul R., Wright D. L., & Hoffman T. L. *Brassica carinata* seeding rate and row spacing effects on morphology, yield, and oil. *Agronomy Journal*. 2019. 111(2). P. 528–535.

Munns R. Comparative physiology of salt and water stress. *Plant Cell Environ.* 2002. V. 25. P. 239–250.

Munns R. Silicon nutrition promotes root growth and tissue mechanical strength in symbiotic cowpea. *Funct. Plant Biol.* 2003. Vol. 30. P. 947–953.

Murphy E.J., McKeon T.A., Hayes D.G., Hildebrand D.F. et al. Industrial Oil Crops, AOCS Press, Chapter 8 – Camelina (*Camelina sativa*). 2016. P. 207–230. <https://doi.org/10.1016/B978-1-893997-98-1.00008-7>.

Murugesan K., Mulugeta K., Hailu E., Tamene W., Yadav S.A. Insights for integrative medicinal potentials of Ethiopian Kale (*Brassica carinata*): Investigation of antibacterial, antioxidant potential and phytochemicals composition of its leaves. In *Chinese Herbal Medicines*. 2021. Vol. 13 (2). P. 250–254. <https://doi.org/10.1016/j.chmed.2020.09.003>

Nabloussi A., Márquez-Lema A., Fernández-Martínez J., Velasco L. Novel seed oil types of Ethiopian mustard with high levels of polyunsaturated fatty acids. *Industrial Crops and Products*. 2008. Vol. 27. P. 359–363. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.12.004>

Namatov I., Kavarakis G., Nikolaou A., Panoutsou C., Danalatos N. Growth and productivity of eighteen *Brassica carinata* and four *Brassica napus* varieties for oil production in central Greece. *1 hDi World Conference on Biomass for Energy and Industry*. Sevilla, June. 2000. P. 1741–1744.

Negussu M., Karalija E., Vergata C. et al. Drought tolerance mechanisms in chickpea (*Cicer arietinum* L.) investigated by physiological and transcriptomic analysis. In *Environmental and Experimental Botany*. 2023. Vol. 215. Article 105488. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105488>

Neu S., Schaller J., Dudel E.G. Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C:N:P stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Sci. Rep.* 2017. № 7. Article 40829.

Neumann K., Strömberg C.A.E., Ball T., Albert R.M., Vrydaghs L., Cummings L.S. International Code for Phytolith Nomenclature (ICPN) 2.0. *Ann. Bot.* 2019. Vol. 124. P. 189–199.

Neupane D., Solomon J.K.Q., Davison J., Lawry T. Nitrogen source and rate effects on grain and potential biodiesel production of camelina in the semiarid environment of northern Nevada. *Glob. Change Biol. Bioenergy*. 2018. 10. P. 861–876. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12540>.

Neupane D., Solomon J.K.Q., McLennon E., Davison J., Lawry T. Camelina production parameters response to different irrigation regimes. *Ind. Crops Prod.* 2020. 148. Article 112286. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112286>.

Neupane D., Solomon J.K.Q., McLennon E., Davison J., Lawry T. Sowing date and sowing method influence on camelina cultivars grain yield, oil concentration, and biodiesel production. *Food Energy Secur.* 2019. 8. Article e00166. <https://doi.org/10.1002/fes3.166>.

Nguyen M.N., Meharg A.A., Carey M., Dultz S., Marone F., Cichy S.B., Tran C.T., Le G.H., Mai N.T., Nguyen T.T.H. Fern, *Dicranopteris linearis*, derived phytoliths in soil: Morphotypes, solubility and content in relation to soil properties. *Eur. J. Soil Sci.* 2019. Vol. 70. P. 507–517.

Nicolson T. H., Sanders F.E., Mosse B., Tinker P.B. Evolution of vesicular-arbuscular mycorrhizas. *Endomycorrhizas*. Academic Press, London, 1975. P. 25–34.

Novello A., Barboni D. Grass inflorescence phytoliths of useful species and wild cereals from sub-Saharan Africa. *J. Archaeol. Sci.* 2015. V. 59. P. 10–22.

Obeng E., Obour A.K., Nelson N.O., Moreno J.A., Ciampitti I.A., Wang D., Durrett T.P. Seed yield and oil quality as affected by Camelina cultivar and planting date. *J. Crop Improv.* 2019. 33. P. 202–222. <https://doi.org/10.1080/15427528.2019.1566186>.

Obour K.A., Sintim H.Y., O'bend E., Jeliaskov V.D. Oilseed Camelina (*Camelina sativa* L. Crantz): Production systems, prospects and challenges in the USA Great Plains. *Adv. Plants Agric. Res.* 2015. 2. Article 00043. <https://doi.org/10.15406/apar.2015.02.00043;>

Oliméga. Signé Caméline. URL: <https://www.alimentsduquebec.com/en/blog/top-ideas/5-ways-to-cook-with-camelina-oil>

Opfergelt S., de Bournonville G., Cardinal D., André L., Delstanche S., Delvaux B. Impact of soil weathering degree on silicon isotopic fractionation during adsorption onto iron oxides in basaltic ash soils, *Cameroon. Geochim. Cosmochim. Acta* 2009. Vol. 73. P. 7226–7240.

Organic Camelina Oil. Laboratoire du Haut-Ségala. URL: <https://haut-segala.com/en/>

Pandey C., Khan E., Panthri M., Tripathi R. D., Gupta M. Impact of silicon on Indian mustard (*Brassica juncea* L.) root traits by regulating growth parameters, cellular antioxidants and stress modulators under arsenic stress. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2016. Vol. 104. P. 216–225.

Peleg Z., Saranga Y., Fahima T., Aharoni A., Elbaum R. Genetic control over silica deposition in wheat awns. *Physiol. Plant.* 2010. Vol. 140. P. 10–20.

Perry C.C., Keeling-Tucker T. Biosilicification: The role of the organic matrix in structure control. *J. Biol. Inorg. Chem.* 2000. Vol. 5. P. 537–550.

Piravi-Vanak Z., Azadmard-Damirchi S., Kahrizi D. et al. Physicochemical properties of oil extracted from camelina (*Camelina sativa*) seeds as a new source of vegetable oil in different regions of Iran. *Journal of Molecular Liquids*. 2022. 1. Article 117043. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117043>.

Pokrovski G.S., Schott J., Farges F., Hazemann J.L. Iron (III)-silica interactions in aqueous solution: Insights from X-ray absorption fine structure spectroscopy. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2003. Vol. 67. P. 3559–3573.

Pollard M., Martin T.M., Shachar-Hill Y. Lipid analysis of developing *Camelina sativa* seeds and cultured embryos. *Phytochemistry*. 2015. 118. P. 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2015.07.022>.

POWO follows these authorities in accepting this name: Govaerts, R. World Checklist of Seed Plants 3(1, 2a & 2b): 1999. 1–1532. MIM, Deurne.

Prakash, S., Wu, X. M., & Bhat, S. R. History, evolution, and domestication of Brassica crops. *Plant breeding reviews*. 2011. Vol. 35. P. 19–84

Prychid C.J., Rudall P.J., Gregory M. Systematics and biology of silica bodies in monocotyledons. *Bot. Rev.* 2003. Vol. 69. P. 377–440.

Puppe D. Review on protozoic silica and its role in silicon cycling. *Geoderma*. 2020. Vol. 365. Article 114224.

Puppe D., Kaczorek D., Schaller J., Barkusky D., Sommer M. Crop straw recycling prevents anthropogenic desilication of agricultural soil-plant systems in the temperate zone—Results from a long-term field experiment in NE Germany. *Geoderma*. 2021. Vol. 403. Article 115187.

Puppe D., Leue M. Physicochemical surface properties of different biogenic silicon structures: Results from spectroscopic and microscopic analyses of protistic and phytogenic silica. *Geoderma*. 2018. Vol. 330. P. 212–220.

Puranik S., Bundela V., Shylla A., Elakkya M., Shukla L., Singh S.K. Plant-Microbe Interaction. Recent Advances in Molecular and Biochemical Approaches, Chapter 10. *Peeking into plant-microbe interactions during plant defense*, Academic Press, 2023. P. 167–200.

Raboanatahiry, N., Li H., Yu L. Li M. Rapeseed (*Brassica napus*): Processing, utilization, and genetic improvement. *Agronomy*. 2021. 11(9). Article 1776. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091776>

Raj S.P., Solomon P.R., Thangaraj B. Brassicaceae. In: Biodiesel from Flowering Plants. *Springer*. Singapore. 2022. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4775-8_8

Raman R., Qiu Y., Coombes N., Song J., Kilian A., Raman H. Molecular diversity analysis and genetic mapping of pod shatter resistance loci in *Brassica carinata* L. *Frontiers in Plant Science*. 2017. Vol. 8. Article 1765.

Raza A., Hafeez M.B., Zahra N., Shaukat K., Umbreen S., Tabassum J., Hasanuzzaman M. The Plant Family Brassicaceae: Introduction, Biology, And Importance. In: Hasanuzzaman, M. (eds) The Plant Family Brassicaceae. *Springer*. Singapore. 2020. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6345-4_1

Raziei Z., Kahrizi D., Rostami-Ahmadvandi H. Effects of climate on fatty acid profile in *Camelina sativa*. *Cell Mol Biol* (Noisy-le-grand). 2018. 64(5). P. 91–96. <https://doi.org/10.14715/cmb/2018.64.5.15>.

Rea R.S., Islam M.R., Rahman M.M., Nath B., Mix K. Growth, nutrient accumulation, and drought tolerance in crop plants with silicon application: A review. In *Sustainability*. 2022. Vol. 14, № 8. Article 4525. <https://doi.org/10.3390/su14084525>

Redda Z., Laß-Seyoum A., Yimam A., Barz M. Jabasingh S. Solvent extraction and characterization of *Brassica carinata* oils as promising alternative feedstock for bio-jet fuel production. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2024. Vol. 14. P. 12207–12226. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03343-x>

Redda Zinnabu Tassew, et al. Characterization of Hexane-Defatted *Brassica carinata* Oilseed Meals to Explore Their Potential for Valorization Towards a Sustainable Circular Bioeconomy. *Waste and Biomass Valorization*. 2024. Vol. 15, № 2. P. 1185–1197

Rehman S., Shahzad B., Bajwa A.A. et al. Utilizing the Allelopathic Potential of *Brassica* species for sustainable crop production: A Review. *J. Plant Growth Regul.* 2019. Vol. 38. P. 343–356. <https://doi.org/10.1007/s00344-018-9798-7>

Ren K., Xu, M., Li R., Zheng L., Liu S., Reis S. & Gu B. Optimizing nitrogen fertilizer use for more grain and less pollution. *J. Clean. Prod.* 2022. Vol. 360. Article 132180. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132180>

Riaz R., Ahmed I., Sizmaz O., Ahsan U. Use of *Camelina sativa* and By-Products in Diets for Dairy Cows: A Review. *Animals (Basel)*. 2022. 12(9). P. 1082. <https://doi.org/10.3390/ani12091082>.

Richmond K.E., Sussman M. Got silicon? The non-essential beneficial plant nutrient. *Curr. Opin. Plant Biol.* 2003. № 6. P. 268–272.

Rodríguez-Rodríguez M.F., Sánchez-García A., Salas J.J., Garcés R., Martínez-Force E. Characterization of the morphological changes and fatty acid profile of developing *Camelina sativa* seeds. *Ind. Crops Prod.* 2013. 50. P. 673–679. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.07.042>.

Rohacek K., Bartak M. Technique of the modulated chlorophyll fluorescence: basic concepts, useful parameters, and some applications. *Photosynthetica*. 1999. Vol. 37, № 3. P. 339–363. <https://doi.org/10.1023/A:1007172424619>

Roslinsky V., Falk K., Gaebelein R., Mason A., Eynck C. Development of *B. carinata* with super-high erucic acid content through interspecific hybridization. *In Theoretical and Applied Genetics*. 2021. Vol. 134. P. 3167–3181. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00122-021-03883-2>

Rudall P.J., Prychid C.J., Gregory T. Epidermal patterning and silica phytoliths in grasses: An evolutionary history. *Bot. Rev.* 2014. Vol. 80. P. 59–71.

Russo R. Biochemical characterization of flour from seeds of *Camelina sativa* L. (Crantz) after chemical extraction of oil. Università Degli Studi Di Milano. 2011–2012. 71 p.

Russo R., Reggiani R. Seed protein in *Camelina sativa* (L.) Crantz var. *Calena*. *International Journal of Plant and Soil Science*. 2015. 8(2). P. 1–6.

Sahebi M., Hanafi M.M., Siti Nor Akmar A., Rafii M.Y., Azizi P., Tengoua F.F., Nurul Mayzaitul Azwa J., Shabanimofrad M. Importance of silicon and mechanisms of biosilica formation in plants. *BioMed Res. Int.* 2015. Article 396010.

Sajwan R., Khan M. S., Rawat L., & Joshi M. Studies on flower morphological characters of different oilseed Brassica species and their effect on the abundance of bee species. *In Pantnagar Journal of Research*. 2023. Vol. 21, № 1. P. 39–43.

Sakai W.S., Thom M. Localization of silicon in specific cell wall layers of the stomatal apparatus of sugar cane by use of energy dispersive x-ray analysis. *Ann. Bot.* 1979. Vol. 44. P. 245–248.

Salehi B., Quispe C., Butnariu M., Sarac I., Marmouzi I., Kamle M. ... & Martorell M. Phytotherapy and food applications from Brassica genus. *Phytotherapy research*. 2021. 35(7). P. 3590–3609. <https://doi.org/10.1002/ptr.7048>

Salehi-lisar S.Y., Motafakkerazad R., Arianfar M. Investigation on allelopathic effects of redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus* L.) on germination and growth of wheat and cucumber under different irrigation regime. *Proceedings of the 7th World Congress on Allelopathy*. Vigo, Spain, 2014.

Sampath A. Chemical Characterization of Camelina Seed Oil. New Brunswick, New Jersey. 2009. 193 p. URL: <https://rucore.libraries.rutgers.edu/rutgers-lib/25894/>

Samuels A.L., Glass A.D.M., Ehret D.L., Menzies J.G. Distribution of silicon in cucumber leaves during infection by powdery mildew fungus (*Sphaerotheca fuliginea*). *Can. J. Bot.* 1991. Vol. 69. P. 140–146.

Savant N.K., Snyder G.H., Datnoff L.E. Silicon management and sustainable rice production. *Adv. Agron.* 1996. Vol. 58. P. 151–199.

Schaller J., Brackhage C., Gessner M.O., Bäucker E., Gert Dudel E. Silicon supply modifies C:N:P stoichiometry and growth of *Phragmites australis*. *Plant Biol.* 2012. Vol. 14. P. 392–396.

Schaller J., Brackhage C., Paasch S., Brunner E., Bäucker E., Dudel E.G. Silica uptake from nanoparticles and silica condensation state in different tissues of *Phragmites australis*. *Sci. Total Environ.* 2013. Vol. 442. P. 6–9.

Schaller J., Cramer A., Carminati A., Zarebanadkouki M. Biogenic amorphous silica as main driver for plant available water in soils. *Sci. Rep.* 2020. № 10. P. 2424.

Schaller J., Frei S., Rohn L., Gilfedder B.S. Amorphous silica controls water storage capacity and phosphorus mobility in soils. *Front. Environ. Sci.* 2020. Vol. 8. P. 94.

Schaller J., Puppe D. Heat improves silicon availability in mineral soils. *Geoderma* 2021. Vol. 386. Article 114909.

Schoelynck J., Struyf E. Silicon in aquatic vegetation. *Funct. Ecol.* 2016. Vol. 30. P. 1323–1330.

Schulmeister T. M., Ruiz-Moreno M., Silva G. M., Garcia-Ascolani M., Ciriaco F. M., Henry D. D., & Di Lorenzo N. Evaluation of *Brassica carinata* meal as a protein supplement for growing beef heifers. *Journal of Animal Science*. 2019. 97(10). P. 4334–4340.

Scratton S. Camelina of Sweden – The ancient superfood that is making a comeback. URL: <https://scanmagazine.co.uk/camelina-of-sweden/>

Seepaul R., Bliss C.M., Wright D.L. et al. Carinata, the jet fuel cover crop: 2016 production recommendations for the Southeastern United States 1. 2016.

Seepaul R., George S., Wright D.L. Comparative response of *Brassica carinata* and *B. napus* vegetative growth, development and photosynthesis to nitrogen nutrition. *Industrial Crops and Products*. 2016. Vol. 94. P. 872–883.

Seepaul R., Kumar S., Iboyi J.E. et al. *Brassica carinata*: Biology and agronomy as a biofuel crop. *Gcb Bioenergy*. 2021. Vol. 13(4). P. 582–599. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12804>

Seepaul R., Marois J., Small I. M., George S., & Wright D. L. Carinata dry matter accumulation and nutrient uptake responses to nitrogen fertilization. *Agronomy Journal*. 2019. 111(4). P. 2038–2046. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.10.0678>.

Seepaul, Ramdeo, et al. Physiological analysis of growth and development of winter carinata (*Brassica carinata* A. Braun). *GCB Bioenerg*. 2021. Vol. 13, №7. P. 1112–1133.

Seliutina O.V., Holoborodko K.K., Pakhomov O.Y. & Dubyna A.O. Assessment of leaf damage degree in *Aesculus hippocastanum* L. during the growing season in the conditions of Dnipro city. *Ecology and Noospherology*. 2021. Vol. 32 № 2. P. 82–86. <https://doi.org/10.15421/032114>

Sequin-Swartz G., Eynck C., Strelkov S.E., Olivier C.Y., Li J.L. et al. Diseases of *Camelina sativa* (false flax). *Canadian J. of Plant Pathology*. 2009. 31(4). P. 375–386. <https://doi.org/10.80/07060660909507612>.

Shakoor S.A. Silicon biomineralisation in plants: A tool to adapt global climate change. *J. Res. Biol. Sci*. 2014. № 1. P.1–3.

Sharafi Y., Majidi M.M., Goli S.A.H., Rashidi F. Oil content and fatty acids composition in *Brassica* species. *International Journal of Food Properties*. 2015. Vol. 18. P. 2145–2154. <https://doi.org/10.1080/10942912.2014.968284>

Shen J., Liu Y., Wang X., Bai J., Lin L., Luo F., Zhong H. A Comprehensive Review of Health-Benefiting Components in Rapeseed Oil. *Nutrient*. 2023. Vol. 15, № 4. P. 999. <https://doi.org/10.3390/nu15040999>

Shen X., Zhou Y., Duan L., Li Z., Eneji A.E., Li J. Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet-B radiation. *J. Plant Physiol*. 2010. Vol. 167. P. 1248–1252.

Simmonds, N. W. Principles of crop improvement. London: Longman. 1979. 408 pp.

Simon L., Bousquet J., Lévesque R.C., Lalonde M. Origin and diversification of endomycorrhizal fungi and coincidence with vascular land plants. *Nature*. 1993. 363. P. 67–69.

Singh R. Nasim M., Tiwari S. *Camelina sativa*: success of a temperate biofuel crop as intercrop in tropical conditions of Mhow Madhya Pradesh. *India Current Science*. 2014. 107(3). P. 359–360.

Smith G.R., Finlay R.D., Stenlid J., Vasaitis R., Menkis A. Growing evidence for facultative biotrophy in saprotrophic fungi: data from microcosm tests with 201 species of wood-decay basidiomycetes. *The New Phytologist*. 2017. 215(2). P. 747–755.

Smith S.E., Read D.J. *Mycorrhizal symbiosis*. Academic press. 2010.

Sommer M., Jochheim H., Höhn A., Breuer J., Zagorski Z., Busse J., Barkusky D., Meier K., Puppe D., Wanner M. et al. Si cycling in a forest biogeosystem-the importance of transient state biogenic Si pools. *Biogeosciences*. 2013. Vol. 10. P. 4991–5007.

Stamigna C., Chiaretti D., Chiaretti E., & Prosini P. P. Oil and furfural recovery from *Brassica carinata*. *Biomass and Bioenergy*. 2012. Vol. 39. P. 478–483.

Steinke G., Kirchhoff R., Mulherju K. Lipase-catalyzed alcoholysis of crambe oil and *Camelina* oil for the preparation of long-chain esters. *Journal of the American oil chemists' society*. 2000. 77(4). P. 361–366.

Stephens P.J., Greenman C.D., Fu B., Yang F., Bignell G.R. et al. Massive genomic rearrangement acquired in a single catastrophic event during cancer development. *Cell*. 2011. 144(1). P. 27–40. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2010.11.055>.

Steudle E., Peterson C.A. How does water get through roots? *J. Exp. Bot*. 1998. Vol. 49. P. 775–788.

Strullu D.G., Diop T.A., Plenchette C. Réalisation de collections in vitro de *Glomus intraradices* (Schenck et Smith) et de *Glomus versiforme* (Karsten et Berch) proposition d'un cycle de développement. *C. R. Acad. Sci. Paris*. 1997. 320. P. 41–47.

Sydor M., Kurasiak-Popowska D., Stuper-Szablewska K. & Rogoziński T. *Camelina sativa*. Status quo and future perspectives. *Ind. Crops Prod*. 2022. Vol. 187. Article 115531. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115531>

Takahashi N., Isogai A., Ling P.P., Kato Y., Kurata K. Effects of elevated atmospheric carbon dioxide concentration on silica deposition in rice (*Oryza sativa* L.) panicle. *Plant Prod. Sci*. 2008. № 11. P. 307–315.

Tao W., Zeng S., Yan K., Alwahibi M.S. & Shao F. Effects of Boron and Zinc Micro-Fertilizer on Growth and Quality of Jujube Trees (*Ziziphus jujuba*) in the Desert Area. *Agronomy*. 2024. Vol. 14, № 4. 741. <https://doi.org/10.3390/agronomy14040741>

Tayade R., Ghimire A., Khan W., Lay L., Quarshie Attipoe J., Kim Y. Silicon as a Smart Fertilizer for Sustainability and Crop Improvement. *Biomolecules*. 2022. 12(8). P. 1027. <https://doi.org/10.3390/biom12081027>

Taylor P. Interactions of Silica with Iron Oxides: Effects on Oxide Transformations and Sorption Properties. Pinawa MB: Whiteshell Laboratories. 1995. 20 pp.

Taylor T.N. et al. Fossil arbuscular mycorrhizae from the Early Devonian. *Mycologia*. 1995. 87(4). P. 560–573.

Teimoori N., Ghobadi M., Kahrizi D. Improving the growth characteristics and grain production of Camelina (*Camelina sativa* L.) under salinity stress by silicon foliar application. *Agrotechniques in Industrial Crops*. 2023. 3(1). P. 1–13.

Terpinc P. Abramovic H. Oljna pogaca navadnega ricka (*Camelina sativa* (L.) Crantz) – neizkorisceni vir fenolnih spojin. *Acta Agriculturae Slovenica*. 2016. 07(1). P. 243–250.

Tesfaye M., Feyissa T., Hailesilassie T., Kanagarajan S., & Zhu L. H. Genetic diversity and population structure in Ethiopian mustard (*Brassica carinata* A. Braun) as revealed by single nucleotide polymorphism markers. *Genes*. 2023. 14(9). Article 1757. <https://doi.org/10.3390/genes14091757>

Thakur A., Singh K., Sharma D., Parmar N., Nanjundan J. Breeding and genomics interventions in Ethiopian mustard (*Brassica carinata* A. Braun) improvement – A mini review. *South African Journal of Botany*. 2019. Vol. 125. P. 457–465. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.08.002>

The Plant List. *Camelina sativa*. URL: www.theplantlist.org

Thorne S.J., Hartley S.E., Maathuis F.J.M. Is silicon a panacea for alleviating drought and salt stress in crops? *Front. Plant Sci*. 2020. Vol. 11. P. 1221.

Tiwari R., Reinhardt Piskáčková, T. A., Devkota P., Mulvaney M. J., Ferrell J. A., & Leon R. G. Growing winter *Brassica carinata* as part of a diversified crop rotation for integrated weed management. *In GCB Bioenergy*. 2021. Vol. 13, № 3. P. 425–435. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12799>

Toncea I., Necseriu D., Prisecaru T. [et al.]. The seed's and oil composition of *Camelia* – first Romanian cultivar of camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) *Romanian Biotechnological Letters*. 2013. 18(5). P. 8594–8602.

Tsartsidou G., Lev-Yadun S., Albert R.M., Miller-Rosen A., Efstratiou N., Weiner S. The phytolith archaeological record: Strengths and weaknesses evaluated based on a quantitative modern reference collection from Greece. *J. Archaeol. Sci*. 2007. Vol. 34. P. 1262–1275.

Turpault M.P., Calvaruso C., Kirchen G., Redon P.O., Cochet C. Contribution of fine tree roots to the silicon cycle in a temperate forest ecosystem developed on three soil types. *Biogeosciences*. 2018. Vol. 15. P. 2231–2249.

Ueno O., Agarie S. Silica deposition in cell walls of the stomatal apparatus of rice leaves. *Plant Prod. Sci*. 2005. Vol. 8. P. 71–73.

USDA, ARS. United States Department of Agriculture, National Genetic Resources Program. Germplasm Resources Information Network – (GRIN). National Germplasm Resources Laboratory. Beltsvilld. MD. USA. 2014. URL: <https://ars-grin.gov/gringlobal/taxon/taxonomydetail?id=7642>

Vaieretti M.V., Diaz S., Vile D., Garnier E. Two measurements methods of leaf dry matter content produced similar results in a broad range of species. *Annals of Botany*. 2007. Vol. 99. P. 955–958. <https://doi.org/10.1093/aob/mcm022>

Valter T., Kinney A.J. Variation in the biosynthesis of seed-storage lipids. *In Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. 2001. Vol. 52. P. 335–361. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.52.1.335>

Vandevenne F., Struyf E., Clymans W., Meire P. Agricultural silica harvest: Have humans created a new loop in the global silica cycle? *Front. Ecol. Environ*. 2012. Vol. 10. P. 243–248.

Vandevenne F.I., Barão L., Ronchi B., Govers G., Meire P., Kelly E.F., Struyf E. Silicon pools in human impacted soils of temperate zones. *Glob. Biogeochem. Cycles*. 2015. Vol. 9. P. 1439–1450.

Vandevenne F.I., Delvaux C., Hughes H.J., André L., Ronchi B., Clymans W., Barão L., Govers G., Meire P., Struyf E. Landscape cultivation alters $\delta^{30}\text{Si}$ signature in terrestrial ecosystems. *Sci. Rep*. 2015. Vol. 5. Article 7732.

Vegetable fats and oils – Determination of composition of triacylglycerols and composition and content of diacylglycerols by capillary gas chromatography. ISO 21846:2018. [Effective as of 2018-08-12]. International Organization for Standardization, 2018. 13 p. (International standards).

Velasco L., Nabloussi A., De Haro A., Fernández-Martínez J. Development of high-oleic, low-linolenic acid Ethiopian-mustard (*Brassica carinata*) germplasm. *Theoretical and Applied Genetics*. 2003. Vol. 107. P. 823–830. <https://doi.org/10.1007/s00122-003-1295-z>

Vergun O., Rakhmetov D., Fishchenko V., Rakhmetova S., Shymanska O., Druz N., & Bogatel L. The lipid content in the seeds of Brassicaceae Burnett family. *In Agrobiodiversity for improving nutrition, health and life quality*. 2017. № 1. P. 493–497. <http://dx.doi.org/10.15414/agrobiodiversity.2017.2585-8246.493-497>

Vetter W., Schröder M., Lehnert K. Differentiation of refined and virgin edible oils by means of the trans- and cis-phytol isomer distribution. *J. Agric. Food Chem*. 2012. Vol. 60, № 24. P. 6103–6107.

Vierheilig H., Bago B., Albrecht C., Poulin M.J., Piché Y. Flavonoids and arbuscular-mycorrhizal fungi. *Flavonoids in the living system*. 1998. P. 9–33.

Vollmann J., Damboeck A., Eckl A., Schrems H., Ruckenbauer P. Progress in New Crops. Vol. 1. Improvement of *Camelina sativa*, an underexploited oilseed. ASHS Press; Alexandria, VA, USA: 1996. P. 357–362.

Vollmann J., Moritz T., Kargl C., Baumgartner S., Wagentristsl H. Agronomic evaluation of camelina genotypes selected for seed quality characteristics. *Ind. Crops Prod*. 2007. 26. 270–277. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.03.017>

Wang P., Xiong X., Zhang X., Wu G., Liu F. A Review of Erucic Acid Production in Brassicaceae Oilseeds: Progress and Prospects for the Genetic

Engineering of High and Low-Erucic Acid Rapeseeds (*Brassica napus*). *Crop and Product Physiology*. 2022. Vol. 13. |<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.899076>

Wang Y., Zhang B., Jiang D., Chen G. Silicon improves photosynthetic performance by optimizing thylakoid membrane protein components in rice under drought stress. *Environ. Exp. Bot.* 2019. Vol. 158. P. 117–124.

Warwick S. I., Francis A., & Gugel R. K. Guide to wild germplasm of Brassica and allied crops (tribe Brassiceae, Brassicaceae). Canada: Agriculture and Agri-Food Canada. 1. 2009.

Warwick S. I., Gugel R. K., McDonald T., & Falk K. C. Genetic variation of Ethiopian mustard (*Brassica carinata* A. Braun) germplasm in western Canada. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2006. Vol. 53. P. 297–312.

Watkinson S.C. Chapter 7. Mutualistic Symbiosis Between Fungi and Autotrophs, Editor(s): Sarah C. Watkinson, Lynne Boddy, Nicholas P. Money. *The Fungi* (Third Edition), Academic Press, 2016. P. 205–243.

Wellburn A.R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *Journal of Plant Physiology*. 1994. 144(3). P. 307–313. [https://doi.org/10.1016/s0176-1617\(11\)81192-2](https://doi.org/10.1016/s0176-1617(11)81192-2)

Wellburn A.R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *Journal of Plant Physiology*. 1994. Vol. 144. № 3. P. 307–313.

Wettstein D., Gough S., Kannangara C.G. Chlorophyll biosynthesis. *The Plant Cell*. 1995. 7. P. 1039–1057.

WFO (2023): *Camelina Crantz*. Published on the Internet; <http://www.worldfloraonline.org/taxon/wfo-4000006355>. Accessed on: 14 Jun 2023

Whitney E.N., Rolfes S.R. Understanding Nutrition. 13th Edition, *Cengage Learning, Wadsworth*. 2013. P. 667–670. URL: <https://www.cengagebrain.co.uk/>

Wilkinson R. *Plant-Environment Interactions*, New York: Marcel Dekker. NY. USA. 2000. 124 pp.

Woodfield H.K., Sturtevant D., Borisjuk L., Munz E., Guschina I., Chapman K., Harwood J.L. Spatial and temporal mapping of key lipid species in *Brassica napus* seeds. *Plant Physiology*. 2017. 173(4). P. 1998–2009. <https://doi.org/10.1104/pp.16.01705>

WWF Всесвітній фонд природи, Покривна культура: Nuseed Carinata, URL: <https://nbs.wwf.ua/solutions/pokryvna-kultura-nuseed-carinata/>

Xiong Y.N., Han D., Wang F.Z., Ma X.H., Jin Y.N., Chen B. & Xu Z.C. Effects of Micro-fertilizer Combined with Small-Molecule Organic Matter on Growth and Quality of Flue-cured Tobacco. *Biotechnology Bulletin*. 2019. 35(2). P. 29–38.

Yamaji N., Ma J.F. Spatial distribution and temporal variation of the rice silicon transporter Lsi1. *Plant Physiol.* 2007. Vol. 143. P. 1306–1313.

Yamaji N., Ma J.F. The node, a hub for mineral nutrient distribution in graminaceous plants. *Trends Plant Sci.* 2014. Vol. 19. P. 556–563.

Yamaji N., Mitani N., Ma J.F. A transporter regulating silicon distribution in rice shoots. *Plant Cell*. 2008. Vol. 2. P. 1381–1389.

Yamaji N., Sakurai G., Mitani-Ueno N., Ma J.F. Orchestration of three transporters and distinct vascular structures in node for intervacular transfer of silicon in rice. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2015. Vol. 112. P. 11401.

Yemets A.I., Boychuk Yu.N., Shysha E.N., Rakhmetov D.B., Blume Ya.B. Establishment of in vitro culture, plant regeneration, and genetic transformation of *Camelina sativa*. *Cytology and Genetics*. 2014. 47(3). P. 138–144.

Yim et al. The final piece of the Triangle of U: Evolution of the tetraploid Brassica carinata genome. *In The Plant Cell*. 2022. Vol. 34. Issue 11. P. 4143–4172. <https://doi.org/10.1093/plcell/koac249>

Zada M., Zakir N., Rabbani M. A., Shinwari Z. K. Assessment of genetic variation in Ethiopian mustard (*Brassica carinata* A. Braun) germplasm using multivariate techniques. *Pak. J. Bot.* 2013. 45(S1). P. 583–593.

Zaimenko N.V., Slyusarenko O.M., Didyk N.P., Dzyuba O.I., Ellanska N.E., Ivanytska B.O., Kharytonova I.P., Pavliuchenko N.A., Rositska N.V. The results of testing of organo-siliceous mixtures in Ukraine. Київ : Ліпа-К, 2018. 40 c.

Zanetti F., Eynck C., Christou M., Krzyżaniak M., Righini D., Alexopoulou E., Stolarski M.J., Van Loo E.N., Puttick D., Monti A. Agronomic performance and seed quality attributes of *Camelina* (*Camelina sativa* L. crantz) in multi-environment trials across Europe and Canada. *Ind. Crops Prod.* 2017. 107. P. 602–608. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.06.022>.

Zeiner M., Juranović Cindrić I., Nemet I., Franjković K., & Salopek Sonđi B. Influence of soil salinity on selected element contents in different Brassica species. *Molecules*. 2022. 27(6). Article 1878. <https://doi.org/10.3390/molecules27061878>

Zhang C., Wang L., Zhang W., Zhang F. Do lignification and silicification of the cell wall precede silicon deposition in the silica cell of the rice (*Oryza sativa* L.) leaf epidermis? *Plant Soil*. 2013. Vol. 372. P. 137–149.

Zhu Y., Gong H. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agron. Sustain. Dev.* 2014. Vol. 34. P. 455–472.

Zoong Lwe, Zolian, et al. Alterations in the leaf lipidome of *Brassica carinata* under high-temperature stress. *BMC plant biology*. 2021. Vol. 21. P. 1–15.

Zubr J. Qualitative variation of *Camelina sativa* seed from different locations. *Ind. Crops Prod.* 2003. 17. P. 161–169. [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(02\)00091-2](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(02)00091-2)

Zubr J., Matthaus B. Effect of growth conditions on fatty acids and tocopherols in *Camelina sativa* oil. *Industrial Crops and Products*. 2002. 15. P. 155–162.

Zuccaro A., Lahrmann U., Langen G. Broad compatibility in fungal root symbioses, *Current Opinion in Plant Biology*. 2014. 20. P. 135–145.

ДОДАТКИ

Додаток А

Список наукових праць та винаходів

1. *Camelina sativa* (L.) Crantz. – цінна олійна рослина: генотипове різноманіття, біолого-морфологічні та біохімічні особливості, енергетична цінність і продуктивність фітосировини. Рахметов Д.Б., Вергун О.М., Рахметова С.О. : монографія / Біологічні основи інтродукції перспективних енергетичних та ароматичних рослин в Україні [За ред. Д.Б. Рахметова]. Київ : НАН України, НБС імені М. М. Гришка, 2024. С. 41–79 (314 с.)
2. Колекційний фонд енергетичних та ароматичних рослин НБС імені М. М. Гришка НАН України /Д. Б. Рахметов, О. А. Корабльова, С. М. Ковтун-Водяницька та ін. Київ : НАН України, НБС імені М. М. Гришка, 2024. 240 с.
3. Blume R.Y., Rakhmetov D.B., Rakhmetova S.O., Yemets A.I., Blume Y.B. Introduction and performance of emerging biofuel crop *Brassica carinata* in Ukraine. *European Biomass Conference and Exhibition Proceedings*. 2023. P. 105–105.
4. Rabokon A.M., Blume R.Y., Sakharova V.G., Chopei M.I., Afanasieva K.S., Yemets A.I., Rakhmetov D.B., Pirko Y.V., Blume Y.B. Genotyping of Interspecific *Brassica rapa* Hybrids Implying β -Tubulin Gene Intron Length Polymorphism (TBP/CTBP) Assessment. *Cytology and Genetics*. 2023. 57(6). P. 538–549. <https://doi.org/10.3103/S0095452723060075>
5. Havryliuk O., Bida I., Hovorukha V., Bielaieva Y., Liubinska A., Gladka G., Kalinichenko A., Zaimenko N., Tashyrev O., Dziuba O. Application of Granular Microbial Preparation and Silicon Dioxide Analcime for Bioremediation of Ecocide Area. *Sustainability*. 2024. Vol. 16 (3). Article 1097. <https://doi.org/10.3390/su16031097> Q2
6. Zaimenko N.V., Didyk N.P., Pavliuchenko N.A., Kharytonova I.P., Liubinska A.V., Yunosheva O.P. Recycling of date palm foliar waste into a biofertilizer using siliceous minerals and *Trichoderma lignorum*. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. 2024. <https://doi.org/10.57647/ijrowa-ken7-hq62> Q2
7. Рахметов Д.Б., Заіменко Н.В., Бондарчук О.П., Блюм Я.Б., Рахметова С.О., Фіщенко В.В. Динаміка фізіолого-біохімічних процесів у рослин родини Brassicaceae залежно від використання кремнієвмісного добрива. *Фізіологія рослин і генетика*. 2024. Т. 56. № 6. С. 1–14. <https://doi.org/10.15407/frg2024.05>
8. Gaponenko A. M., Gnatiuk A. M., Salnikova A. V., Rahmetov D. B. The accumulation of aluminum in the aboveground parts of green manure plants belonging to the Brassicaceae family. *Plant Varieties Studying and protection*, 2024, Т. 20, № 2. P. 90–95. <https://doi.org/10.21498/2518-1017.20.2.2024.304093>

9. Рахметов Д.Б., Костецька К.В., Ковтун-Водяницька С.М., Рахметова С.О., Клименко С.О. Сенсорне оцінювання макаронних виробів збагачених борошном із рижію та гірчиці. *Таврійський науковий вісник*. 2024. 2(139). С. 235–240.
10. Рахметов Д.Б., Костецька К.В., Ковтун-Водяницька С.М., Рахметова С.О., Коломієць О.В. Використання макухи гірчичної у технології хліба. *Вісник Уманського НУС*. 2024. № 2. С. 108–113. <https://doi.org/10.32782/2310-0478-2024-2-108-113>
11. Рахметов Д.Б., Костецька К.В., Ковтун-Водяницька С.М., Рахметова С.О., Клименко С.О. Макаронні вироби збагачені побічними продуктами виробництва олії. *Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі*. Серія «Технічні науки». 2024. № 3. С. 21–26. <https://doi.org/10.37734/2518-7171-2024-3-4>

Методична розробка

12. Методика визначення відповідності сортів капусти кільоподібної, гірчиці кільоподібної (*Brassica carinata* A. Braun) критеріям відмінності, однорідності та стабільності. Рахметов Д. Б., Блюм Я.Б., Рахметова С. О., Блюм Р.Я., Костенко Н.П., Васьківська С. В. Український інститут експертизи сортів рослин, 2024. URL: <https://www.sops.gov.ua/uploads/page/6762ce286c0b7.pdf>

Технологічна інструкція

13. Костецька К., Рахметов Д., Ковтун-Водяницька С., Рахметова С., Коломієць О., Клименко С. Виробництва хлібних і макаронних виробів із використанням продуктів перероблення рижію та гірчиці: Технологічна інструкція (ТІ). Умань: УНУС, 2024. 6 с.

Матеріали та тези конференцій

14. Рахметов Д.Б., Ковтун-Водяницька С.М., Бондарчук О.П., Рахметова С.О., Дауді А.М. Рижій посівний – перспективна олійна культура в Україні: генетичні ресурси та використання. «100-річчя формування національних сортових рослинних ресурсів України» : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (29 вересня 2023 р., м. Київ) / Мінагрополітики, Укр. ін-т експертизи сортів рослин. 2023. С. 95–96.
15. Рахметов Д., Вергун О., Бондарчук О., Ковтун-Водяницька С., Андрущенко О., Рахметова С., Шиманська О., Фіщенко В. *Camelina sativa* – цінна лікарська та харчова рослина. «Сучасні аспекти збереження здоров'я людини» : збірник праць XVI Міжнар. міждисципл. наук.-практ. конф. / За ред. проф. Т.М. Ганича. Ужгород : ДВНЗ «УжНУ». 2023. С. 43–50.
16. Бондарчук О.П., Рахметова С.О., Рахметов Д.Б. Оцінка фотосинтетичної

діяльності представників родини Brassicaceae залежно від генотипових особливостей рослин в умовах Києва. *Євроінтеграція екологічної політики України* : матеріали шостої Всеукраїнської науково-практичної конференції Одеса, ОНУ ім. І. І. Мечникова. 2024. С. 448–451.

17. Рахметов Д. Б., Бондарчук О. П., Ковтун-Водяницька С. М., Вергун О. М., Рахметова С. О., Гнатюк А. І., Нікішова Н. В. Перспективи інтродукції, селекції та використання високопродуктивної олійної рослини *Camelina sativa* в НБС імені М.М. Гришка НАН України. *Об'єкти природно-заповідного фонду України: сучасний стан та шляхи забезпечення ефективної їх діяльності* : матер. наук.-практ. конф. (м. Київ, 27–28 червня 2024). Київ, 2024. <https://doi.org/110.61584/1-10-2024-55>

18. Rakhmetov D., Bondarchuk O., Rakhmetova S., Blume Ya., Blume R., Kutsokon N., Rashydov N. Physiological state of *Brassica carinata* plants depending on the genotype characteristics and phase of plant development in the conditions of Kyiv. *Genetics, Physiology and Plant Breeding* : international scientific conference, 8-th edition, Chisinau, October 7-8, 2024. CEP USM, 2024. pp. 180–184. ISBN 978-9975-62-766-5. <https://doi.org/10.53040/gppb8.2024.30>

19. Vergun O., Rakhmetov D., Fishchenko V., Nikishova N., Rakhmetova S. Nutritional composition of *Camelina sativa* Crantz. Genotype plant raw. *Agrobiodiversity for Improving the Nutrition, Health, Quality of People Life and Nature: Book of Abstracts 6th Intern. Scient. Conf.* (Nitra, Slovak Republic, September 8, 2024). Nitra, 2024. P. 147. <https://doi.org/10.15414/2024.9788055227702>

20. Рахметов Д.Б., Костецька К.В., Ковтун-Водяницька С.М., Рахметова С.О., Грищук Р.С. Вплив борошна з макухи рижію та гірчиці на якість макаронних виробів. *Біологічні дослідження – 2024* : Збірник наукових праць. За мат. XV Всеукр. наук.-практ. конф. (08-09 жовтня 2024, м. Житомир). Житомир, 2024. С. 115–117.

21. Рахметов Д.Б., Костецька К.В., Ковтун-Водяницька С.М., Рахметова С.О., Клименко С.О. Органолептичне оцінювання макаронних виробів збагачених борошном із рижію та гірчиці. XVI Міжн. наук.-практ. інтернет-конф. «*Modern movement of science*» (14–15 жовтня 2024, м. Дніпро). Дніпро, 2024. С. 320–322.

22. Рахметов Д.Б., Костецька К.В., Ковтун-Водяницька С.М., Рахметова С.О., Клименко С.О. Технологічне оцінювання збагачених макаронних виробів. V Всеукр. наук.-практ. конф. «*Інноваційні технології та підвищення ефективності виробництва харчових продуктів*» (20 жовтня 2024, м. Умань). Умань, 2024. С. 28–30.

23. Костецька К.В., Коломієць О.В., Рахметов Д.Б., Ковтун-Водяницька С.М., Рахметова С.О. Макуха з гірчиці та рижію у технології хліба та макаронів. Міжн. наук.-практ. конф. «*Біотехнології продовольчих продуктів: проблеми і перспективи*», (10 грудня 2024, м. Київ). Київ: ДНУ «УкрНДІспиртбіопрод»,

Отримано патенти на корисну модель

24. Рахметов Д.Б., Костецька К.В., Рахметова С.О., Ковтун-Водяницька С.М., Кисіль А.А. Спосіб лабораторного випікання хліба пшеничного з рижієм посівним. Заявка № u202304356. Дата пріоритету 14.09.2023. Дата держреєстрації 14.11.2024. Патент UA157654.

25. Рахметов Д.Б., Костецька К.В., Рахметова С.О., Ковтун-Водяницька С.М., Кисіль А.А. Спосіб лабораторного випікання хліба пшеничного з гірчицею сарептською. Заявка № u202304357. Дата пріоритету 14.09.2023. Дата держреєстрації 14.11.2024. Патент UA157655.

Отримано патенти на сорти

26. Рахметов Д.Б., Рахметова С.О., Ковтун-Водяницька С.М. Сорт Руно рослини рижію посівного (*Camelina sativa* L.). Заявка №23043001. Свідоцтво про авторство № 240264. Дата пріоритету 15.11.2023. Дата держреєстрації 22.07.2024. Патент UA240282

27. Рахметов Д.Б., Рахметова С.О., Блюм Я.Б., Блюм Р.Я. Сорт Ранок рослини рижію посівного (*Camelina sativa* L.). Заявка №23043002. Свідоцтво про авторство № 240265. Дата пріоритету 15.11.2023. Дата держреєстрації 28.08.2024. Патент UA240283

Жирнокислотний склад олії насіння генотипів рослин рижію (окремі зразки)

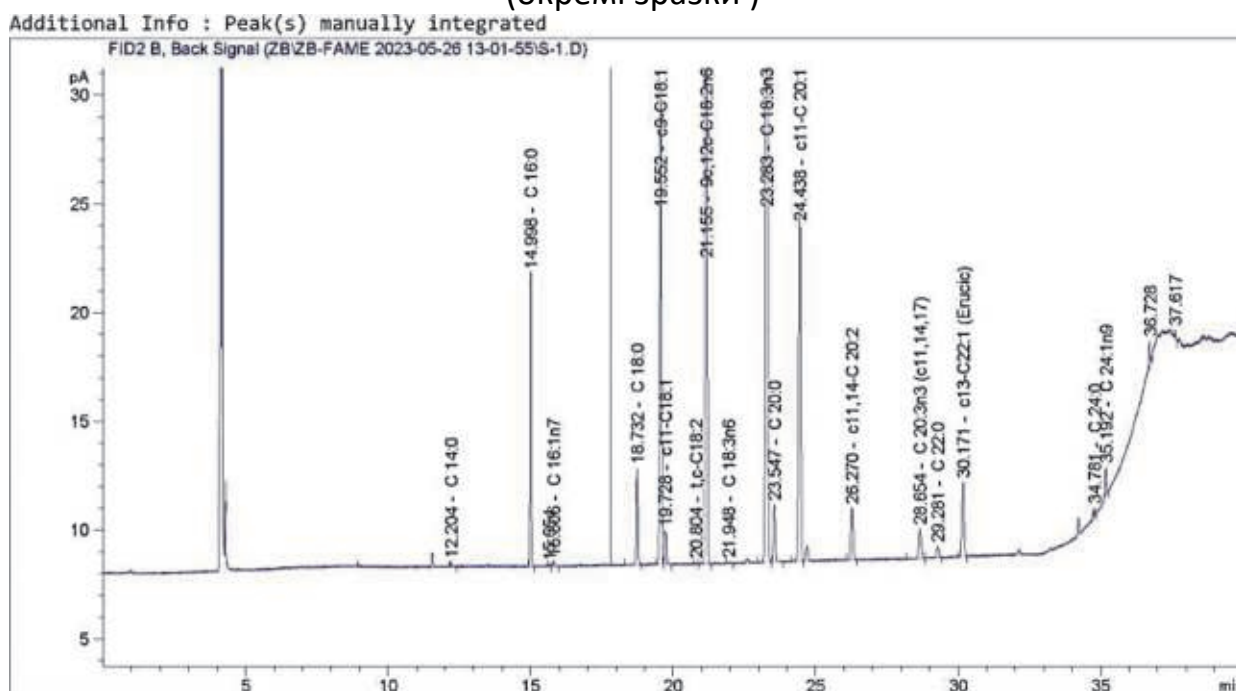


Рис. 1. Хроматографічний профіль олії рижію № 1

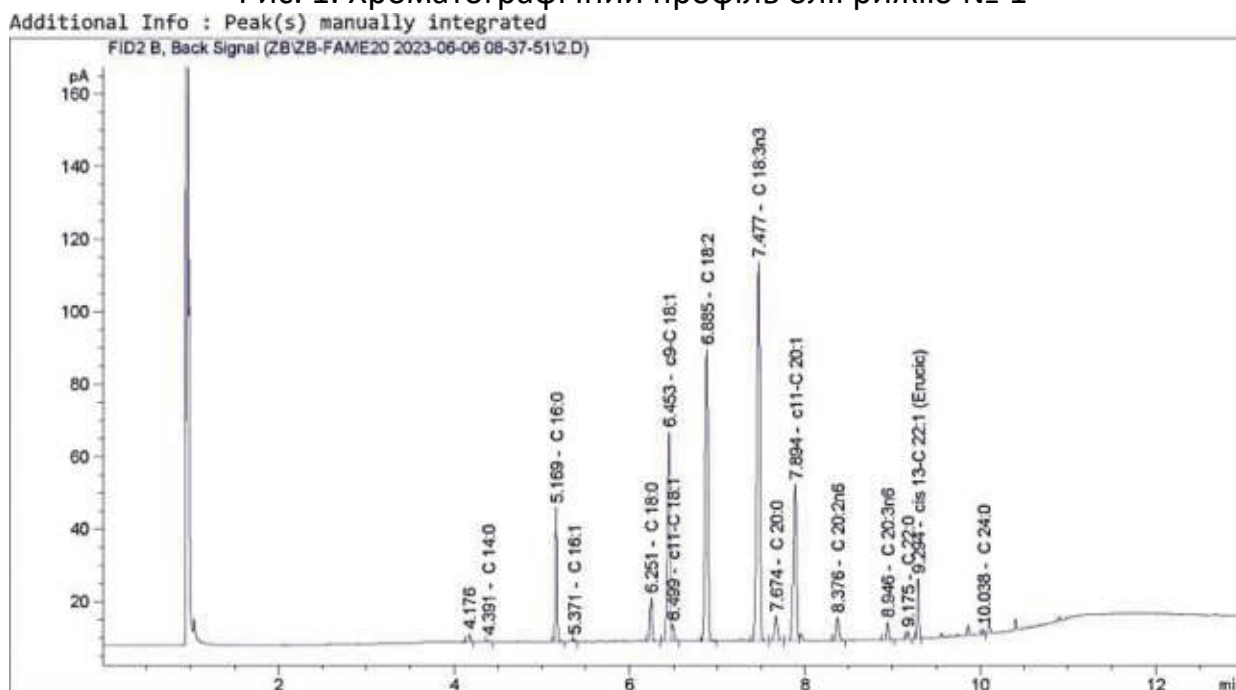


Рис. 2. Хроматографічний профіль олії рижію № 2

**Жирно кислотний склад олії насіння різних
генотипів рослин гірчиці ефіопської (окремі зразки)**

Additional Info : Peak(s) manually integrated

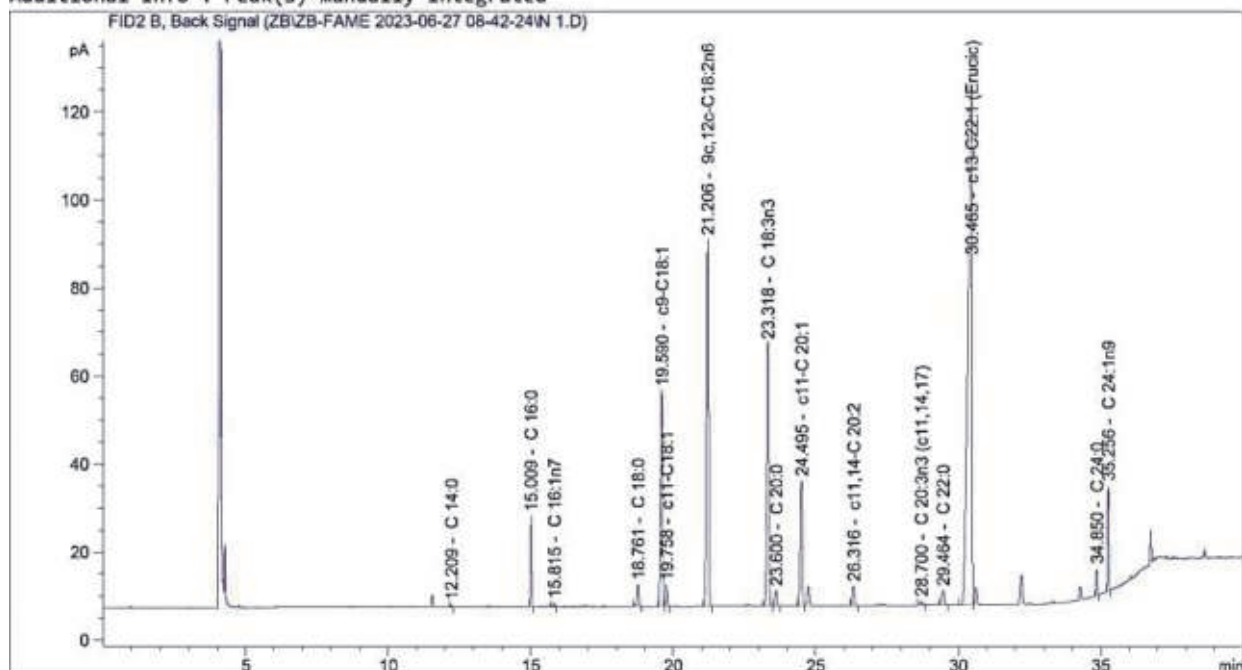


Рис. 1. Хроматографічний профіль олії гірчиці ефіопської № 1

Additional Info : Peak(s) manually integrated

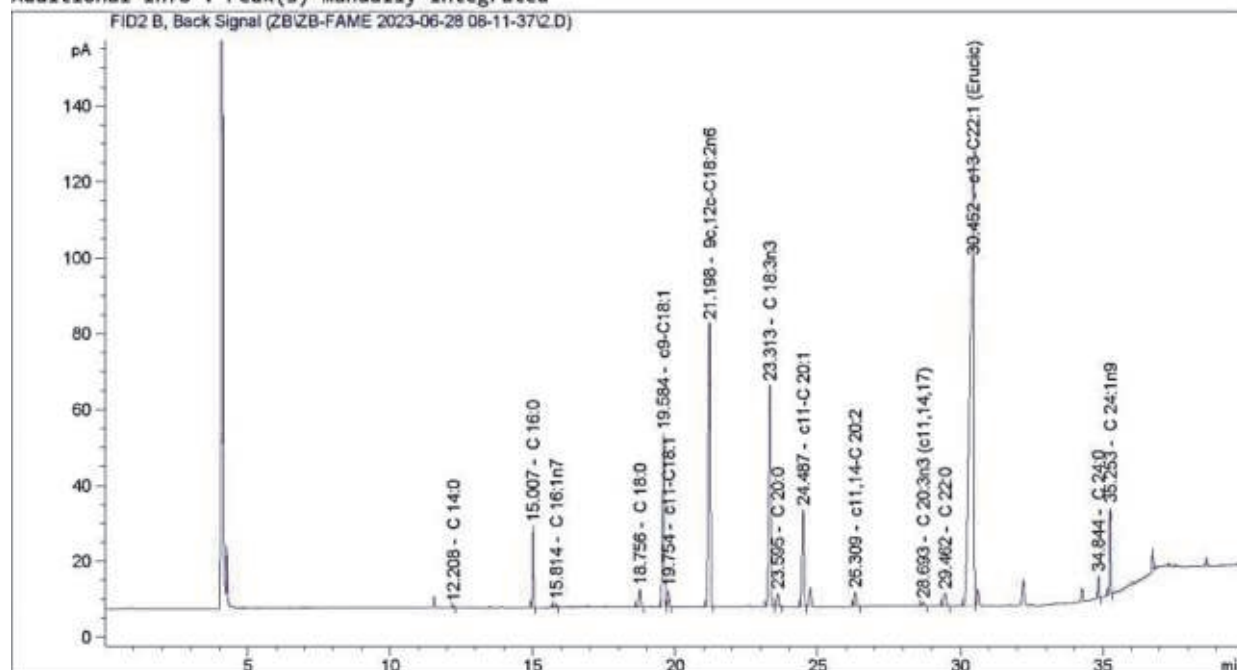


Рис. 2. Хроматографічний профіль олії гірчиці ефіопської № 2

Перелік нормативно-правової документації.

1. ДСТУ ISO 661:2004. Жири тваринні і рослинні та олії. Готування випробного зразка.
2. ДСТУ ISO 3596:2004. Жири тваринні і рослинні та олії. Визначення вмісту неомилюваних речовин. Метод з використанням екстрагування діетиловим ефіром.
3. ДСТУ ISO 5508-2001. Жири та олії тваринні й рослинні. Аналізування методом газової хроматографії метилових ефірів жирних кислот.
4. ДСТУ ISO 5509-2002. Жири та олії тваринні і рослинні. Приготування метилових ефірів жирних кислот.
5. ДСТУ ISO 6799-2002. Жири та олії тваринні і рослинні. Визначання складу стеринової фракції. Газохроматографічний метод.
6. ISO 12078:2006. Anhydrous milk fat. Determination of sterol composition by gas liquid chromatography (Reference method).
7. ISO 12228-1:2014. Determination of individual and total sterols contents – Gas chromatographic method – Part 1: Animal and vegetable fats and oils.
8. ISO 12228-2:2014. Determination of individual and total sterols contents – Gas chromatographic method – Part 2: Olive oils and olive pomace oils.
9. ISO 15304:2002. Animal and vegetable fats and oils – Determination of the content of trans fatty acid isomers of vegetable fats and oils – Gas chromatographic method.
10. ISO 15884:2002. Milk fat – Preparation of fatty acid methyl esters.
11. ISO 15885:2002. Milk fat – Determination of the fatty acid composition by gas-liquid chromatography.
12. ISO/TS 17383:2014. Determination of the triacylglycerol composition of fats and oils – Determination by capillary gas chromatography.
13. ISO 17678:2010. Milk and milk products – Determination of milk fat purity by gas chromatographic analysis of triglycerides (Reference method).
14. ISO 23275-1:2006. Animal and vegetable fats and oils – Cocoa butter equivalents in cocoa butter and plain chocolate – Part 1: Determination of the presence of cocoa butter equivalents
15. ISO/TS 23647:2010. Vegetable fats and oils – Determination of wax content by gas chromatography.
16. CODEX STAN 210-1999. Standard for named vegetable oils
17. CODEX STAN 33-1981. CODEX standard for olive oil, virgin and refined, and for refined olive-pomace oil.
18. ДСТУ 4306:2004. Олія пальмова. Загальні технічні умови.

19. ДСТУ 4438:2005. Олейн пальмовий. Загальні технічні умови.
20. ДСТУ 4439:2005. Стеарин пальмовий. Загальні технічні умови.
21. ДСТУ 4492:2005. Олія соняшникова. Технічні умови.
22. ДСТУ 4534:2006. Олія соєва. Технічні умови.
23. ДСТУ 4562:2006. Олія кокосова. Технічні умови постачання.
24. ДСТУ 4563:2006. Олія пальмоядрова. Технічні умови постачання.
25. ДСТУ 4598:2006. Олія гірчична. Технічні умови.
26. ДСТУ 7620:2014. Стеарин пальмоядровий. Технічні умови постачання.
27. ДСТУ 8175:2015. Олія ріпакова. Технічні умови.
28. ДСТУ ГОСТ 8808:2003. Олія кукурудзяна. Технічні умови.

Патент на корисну модель «Спосіб лабораторного випікання хліба пшеничного з рижієм посівним»

Корисна модель відноситься до галузі сільського господарства та харчової промисловості.

Мета розробки – розширення асортименту вітчизняних хлібобулочних виробів за рахунок використання *helsi* добавок у рецептурі.

Суть розробки ґрунтується на зменшенні в рецептурі випікання хліба деякої кількості борошна пшеничного та додавання до рецептури борошна та олії рижію посівного (*Camelina sativa* L.) сорту Перемога.

Борошно рижію посівного виготовляється шляхом подрібнення макухи (знежирене насіння), що залишається після вилучення олії з насіння рижію методом холодного пресування (за температури до 40°C). Попередньо макуху подрібнюють за допомогою млинка до розміру частинок 30-40 мкм і перемішують для взяття рецептурної наважки.

Затим готують тісто: беруть 90 г борошна пшеничного 70% виходу вищого сорту (за вологості 14%) та 10 г борошна рижію посівного, с. Перемога (розмір частинок 30-40 мкм), дріжджі пресовані, сіль кухонна, цукор-пісок, олія рижієва – по 1,5% кожного від маси суміші борошна пшеничного та борошна рижію, вода питна – згідно водопоглинальної здатності борошна, що за показником фаринографа відповідає консистенції тіста 500 од. ф. або 50-55%. Після приготування тіста його піддають бродінню – ставлять у термостат на 150-180 хв за температури 28-32°C, потім тісто обминають, формують, уміщують у форму та знову ставлять у термостат. Кінець розстоювання тіста визначають органолептично. Випікають хліб зі зволоженням пекарної камери за температури 200-220°C упродовж 15-20 хв.

Таким чином, дана рецептура включає три етапи: оброблювання тіста, розстоювання та випікання хліба.

Для досягнення максимальних органолептичних і смакових показників в експерименті використано різну кількість борошна рижію посівного – 3, 5, 10 та 15%. За підсумком роботи комісії з оцінювання, найкращим був зразок із вмістом 10% борошна рижію. Власне ця рецептура і була визнаною найкращою та рекомендована до патентування.

Рахметов Д.Б., Костецька К.В., Ковтун-Водяницька С.М., Рахметова С.О., Кисіль А.А. Спосіб лабораторного випікання хліба пшеничного з рижієм посівним. Патент на корисну модель. Заявка № u 2023 04356 від 14.09.2023.

Зразки лабораторного хліба пшеничного з додаванням
різної частки борошна рижю посівного (*Camelina sativa* L.)



контроль



3%



5%



10%



15%



Загальний вигляд лабораторних хлібин

Наукове видання

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
Національний ботанічний сад імені М. М. Гришка**

Автори: Д. Б. Рахметов, Н. В. Заїменко, О. П. Бондарчук, Н. А. Павлюченко, С. М. Ковтун-Водяницька, Н. П. Дідик, О. М. Вергун, І. П. Харитонова, О. І. Дзюба, С. О. Рахметова, О. П. Юношева, І. В. Левчук, А. М. Гнатюк, О. В. Закрасов, Н. В. Нікішова, А. В. Любінська, А. Д. Рахметов, Р. Я. Блум, Я. Б. Блум

НОВІ ТА МАЛОПОШИРЕНІ ОЛІЙНІ КУЛЬТУРИ В УКРАЇНІ

Монографія

Authors : D. B. Rakhmetov, N. V. Zaimenko, O. P. Bondarchuk, N. A. Pavlyuchenko, S. M. Kovtun-Vodyanytska, N. P. Didyk, O. M. Vergun, I. P. Kharitonova, O. I. Dzyuba, S. O. Rakhmetova, O. P. Yunosheva, I. V. Levchuk, A. M. Gnatiuk, O. V. Zakrasov, N. V. Nikishova, A. V. Lyubinska, A. D. Rakhmetov, R. Ya. Blum, Ya. B. Blum

NOVEL AND LESS COMMON OILSEED CROPS IN UKRAINE

Monograph

Відповідальні редактори - чл.-кор. НАН України, професор **Рахметов Д. Б.**
- чл.-кор. НАН України, професор **Заїменко Н.В.**

Літературний редактор *В. В. Івченко*
Технічний редактор *С. О. Рахметова*

Керівник видавничого проекту *Віталій Зарицький*
Комп'ютерний дизайн *Олена Щербина*

Підписано до друку 17.11.2025. Формат 70х1001/16.
Папір офсетний. Друк офсетний. Гарнітура Times New Roman.
Умовн. друк. аркушів – 26,48. Обл.-вид. аркушів – 15,81.
Тираж 300

Видавець і виготовлювач: ТОВ «Видавництво Ліра-К»
Свідоцтво № 3981, серія ДК.
03115, м. Київ, вул. С. Чобану, 24
тел.: (050) 462-95-48; (067) 820-84-77
Сайт: lira-k.com.ua, редакція: zv_lira@ukr.net