

<https://doi.org/10.15407/frg2024.06.482>

УДК 581.14+581.198]:582.683.2:[631.8:546.28]

ДИНАМІКА ФІЗІОЛОГО-БІОХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У РОСЛИН РОДИНИ BRASSICACEAE ЗАЛЕЖНО ВІД ВИКОРИСТАННЯ КРЕМНІЄВМІСНОГО ДОБРИВА

Д.Б. РАХМЕТОВ¹, Н.В. ЗАІМЕНКО¹, О.П. БОНДАРЧУК¹, Я.Б. БЛЮМ²,
С.О. РАХМЕТОВА¹, В.В. ФІЩЕНКО¹

¹Національний ботанічний сад імені М.М. Гришка Національної академії наук України

01014 Київ, вул. Садово-Ботанічна, 1

²Інститут харчової біотехнології та геноміки Національної академії наук України
04123 Київ, вул. Осиповського, 2а

e-mail: rjb2000.16@gmail.com, bondbiolog@gmail.com

Виявлено особливості накопичення сухої речовини, біологічно активних сполук, мінеральних речовин та зміну 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. Встановлено, що найсприятливіший вплив кремнієвмісних сполук простежувався у *Brassica napus* f. *annua* DC. сорту Rimal, для решти видів використання цих сполук спричинювало чутливість до стресових чинників довкілля, що відображалось у різкій відмінності накопичення окремих біологічно активних сполук у надземній масі впродовж вегетаційного періоду. Загалом у всіх досліджуваних зразків відмічено покращення роботи фотосинтетичного апарату, водночас з максимальним проявом для рослин *B. napus* f. *annua* DC. сорту Rimal за використання мікродобрив.

Ключові слова: *Camelina sativa* (L.) Crantz., *Brassica carinata* A. Braun, *Brassica napus* DC., генотип, стійкість, фізіолого-біохімічний стан.

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 найповнішою мобілізацією фізіологічних процесів у рослин внаслідок об'єктно-орієнтованої стратегії підбору технологічного регламенту їх вирощування (зокрема добрив, гербіцидів, інсектицидів тощо). Натепер доведено, що неконтрольоване застосування органічних і мінеральних добрив призводить до забруднення довкілля, порушення нормального функціонування агроєкосистем, зменшення врожаїв сільськогосподарських

Цитування: 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. 56, № 6. С. 482–494. <https://doi.org/10.15407/frg2024.06.482>

культур [1, 2]. Ця проблема спонукає до пошуку не лише оптимального дозування наявних на ринку добрив, а й розробки сучасних макро-, мікро- або нанодобрив [3, 4].

Відомо, що мікродобрива сприяють оздоровленню ґрунтів, а також значно покращують фізіологічні процеси у рослин [4, 5]. Разом з тим, існує 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 [6–9]. Мікродобрива на основі кремнію наразі активно використовуються як універсальні препарати для кореневого та позакореневого підживлення олійних, зернобобових, злакових, овочевих і плодових культур. Але з огляду на останні дослідження виявлено, що кремнієвмісні сполуки досить вибірково впливають на фізіолого-біохімічний стан, продуктивність рослин, у тому числі представників родини капустяні (Brassicaceae).

Родина Brassicaceae є однією із найпоширеніших груп рослин, представники якої здавна культивуються та мають важливе економічне й господарське значення [10, 11]. Серед різноманіття відомих і широкоживаних культур цієї родини на особливу увагу заслуговують *Camelina sativa* (L.) Crantz, *Brassica carinata* A. Braun та *Brassica napus* f. *annua* DC. як високопродуктивні олійні, цінні харчові, лікарські, кормові, медоносні культури [12–15]. 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 й використовуються людством багато тисячоліть [16, 17]. 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, антиракову та антидіабетичну дію [10, 18, 19]. 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 [19–22]. Макуху, отриману після віджиму олії, використовують для годівлі тварин та біологічних добрив [22].

В умовах України рослини *C. sativa*, *B. carinata* та *B. napus* f. *annua* виявили високу продуктивність та стійкість і можуть бути перспективними олійними культурами за використання відповідних молекулярно-генетичних та біотехнологічних методів для створення цінних генотипів і сортів із заданими кількісними й якісними характеристиками олії. Зважаючи на високий адаптивний і продуктивний потенціал рослин *C. sativa*, *B. carinata* і *B. napus* f. *annua* та враховуючи потреби вітчизняного енергетичного й 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 та світової літератури, а також зібрану в Національному ботанічному саду імені М.М. Гришка НАН

України унікальну за якісними й кількісними показниками генотипну колекцію рижію посівного (*Camelina sativa*) — 35 зразків; капусти (гірчиці) ефіопської (*Brassica carinata*) — 17; ріпаку (*Brassica napus*) — 32 зразки, сформувалась важлива наукова мета — встановити закономірності фізіолого-біохімічних процесів у сортів і сортозразків власної селекції на різних фазах розвитку рослин за впливу кремнієвмісних добрив.

Методика

Експериментальні дослідження проведено на інтродукційних ділянках і в біохімічній лабораторії відділу культурної флори Національного ботанічного саду імені М.М. Гришка НАН України та у Дослідному сільськогосподарському виробництві Інституту фізіології рослин і генетики НАН України (с-ще Глеваха Фастівського р-ну Київської обл.).

Польові досліди проведено відповідно до існуючих методик для Держсортмережі та науково-дослідних установ у 4-разовому повторенні. Розмір посівних ділянок — 35—40 м², їх облікова площа — 25—30 м². Розміщення варіантів за повтореннями було рендомізоване. Кремнієвмісне добриво, до складу якого входять мулові відклади (70 %) і природний мінерал анальцим (30 %), вносили з розрахунку 300 кг/га.

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. Біохімічні аналізи рослинних зразків проведено згідно із загальноприйнятими методиками у біохімічній лабораторії відділу культурної флори.

Для виявлення біохімічної цінності рослин визначали: абсолютно суху речовину висушуванням зразків за температури 105 °С до постійної маси; золу — методом спалювання зразків у муфельній печі «СНОЛ 7,2-1100» (Termolab) (за 500...700 °С). Загальний вміст азоту у рослинних зразках оцінювали за методом Кьельдаля на апараті KDN-04D-Kjeldal Digestion Unit та апараті ATN-100. Загальний вміст цукрів — методом Бертрана, вміст ліпідів — методом визначення знежиреного залишку за допомогою апарату Сокслета, вміст аскорбінової кислоти — методом титрування 2,6-дихлорфеноліндофенолом.

Для діагностики динаміки фотосинтетичної активності листків рослин використовували портативний флуорометр «Флоратест» (Україна). Спостереження проводили на листках, відібраних із середньої частини головного пагона досліджуваних рослин, після їх адаптації до темряви (тривалість адаптації кожного зразка 10 хв).

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.

Результати та обговорення

Численні функції кремнію в біології рослин, включно захист від абіотичних і біотичних стресів, надають рослинним організмам низку 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. Упродовж вегетаційного періоду проаналізовано динаміку накопичення абсолютно сухої речовини у надземній масі рослин *Camelina sativa* Crantz f. *annua* сорту Перемога, *Brassica carinata* A. Braun (ВФ-відібрана форма) та *Brassica napus* f. *annua* DC. сорту Rimal за використання кремнієвмісних добрив.

Варто зазначити, що рослини по-різному реагували на внесення добрив, зокрема у *Camelina sativa* сорту Перемога у фазу плодоношення та дозрівання спостерігалось більше накопичення у надземній масі абсолютно сухої речовини у контрольному варіанті досліді (рис. 1). Можна припустити, що для даного генотипу такі мікродобрива спричинюють порушення фізіологічних процесів, або можливо варто підібрати оптимальну концентрацію при внесенні у ґрунт, оскільки у дослідженнях інших авторів продемонстровано зростання накопичення сухої речовини у надземній масі за позакореневого підживлення рослин кремнієвими добривами [23].

Рослини *Brassica carinata* виявилися ще чутливішими до кремнієвмісних сполук і накопичували значно менше сухої речовини при підживленні порівняно з контролем. З огляду на це, необхідно визначитися із концентраціями цих сполук з метою пошуку оптимальних варіантів технології підживлення. Для різних генотипів рослин *Brassica carinata* позитивним рішенням щодо підвищення врожайності надземної біомаси та накопичення біологічно активних сполук,

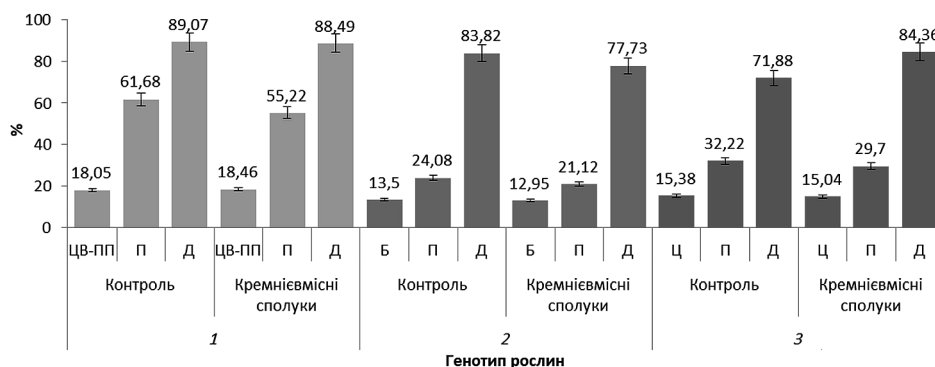


Рис. 1. Вміст сухої речовини у рослин родини Brassicaceae:

1 — *Camelina sativa* Crantz f. *annua* сорт Перемога; 2 — *Brassica carinata* A. Braun (ВФ-відібрана форма); 3 — *Brassica napus* f. *annua* DC. сорт Rimal залежно від фази розвитку рослин (Б — бутонізація; Ц — цвітіння; ЦВ-ПП — цвітіння—початок плодоношення; П — плодоношення; Д — дозрівання насіння) та використання кремнієвмісного добрива

у тому числі сухої речовини, є внесення азотовмісних добрив [24]. У дослідженнях Seeraul та співавт. [25] накопичення абсолютно сухої речовини у надземній частині рослин у різні фази розвитку забезпечувалось на рівні наших результатів.

Порівнюючи із попередніми видами позитивний вплив підживлення рослин кремнієвмісними добривами відмічено у *Brassica napus* сорту Rimal. Так, у фазу цвітіння й плодоношення вміст сухої речовини був майже однаковим у варіанті без підживлення та із підживленням, а у фазу дозрівання цей показник був значно вищим за використання добрив. Варто зазначити, що за результатами аналізу літератури подібні дослідження нам не відомі. Лише у праці Ahmad та співавт. [26] відзначено позитивний вплив на накопичення абсолютно сухої речовини у вегетативних і генеративних органах рослин за використання миш'яку.

Дослідження вмісту цукрів у надземній частині рослин *Camelina sativa* сорту Перемога (рис. 2) підтверджує припущення, що рослини даного генотипу піддаються стресу, оскільки за використання кремнієвмісних добрив виявлено зростання рівня загального вмісту цукрів та моноцукрів, яке свідчить про переналаштування фізіолого-біохімічних процесів для захисту білкових структур організму рослин [27]. У дослідженнях цього виду іншими авторами також було відзначено підвищення вмісту цукрів від 2 до 6 % за стресових умов [27].

Встановлено значне зростання вмісту вуглеводів у надземній масі рослин *Brassica carinata* упродовж вегетаційного періоду: майже у два рази у фазу бутонізації та в межах 17 % у фазу плодоношення і дозрівання насіння порівняно з контролем (див. рис. 2), що, очевидно, також може бути спричинене підвищенням чутливості рослин до дії стресових чинників довкілля [28]. За даними Kumar та співавт. [29] загальний вміст цукрів у надземній масі *Brassica carinata* коливався від 7,5 до 10 %.

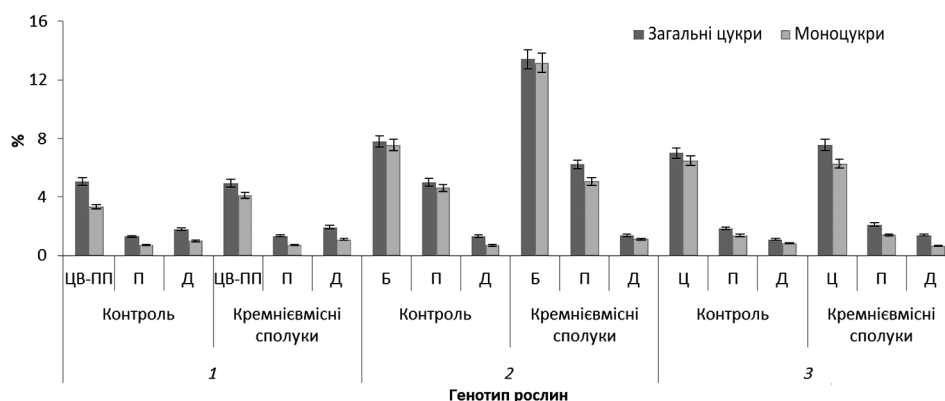


Рис. 2. Вміст вуглеводів у рослин родини Brassicaceae:

1 — *Camelina sativa* Crantz f. *annua* сорт Перемога; 2 — *Brassica carinata* A. Braun (ВФ-відібрана форма); 3 — *Brassica napus* f. *annua* DC. сорт Rimal залежно від фази розвитку рослин (Б — бутонізація; Ц — цвітіння; ЦВ-ПП — цвітіння—початок плодоношення; П — плодоношення; Д — дозрівання насіння) та використання кремнієвмісного добрива

На відміну від інших культур, зростання вмісту цукрів у надземній масі рослин *Brassica napus* сорту Rimal було незначним (в межах 10—15 %) (див. рис. 2). Це свідчить про позитивний вплив кремнієвмісного добрива на ріст і розвиток рослин. Варто зазначити, що вміст цукрів у рослинній сировині у нашому досліді збігається із даними, отриманими Jamshidi Zinab та співавт. [30].

Під час дослідження вмісту аскорбінової кислоти у *Camelina sativa* сорту Перемога встановлено, що найбільший вміст вітаміну С був у рослин під час цвітіння—початку плодоношення у варіанті без внесення кремнієвмісного добрива (рис. 3). За його внесення спостерігали незначне зростання вмісту аскорбінової кислоти порівняно з контролем. Очевидно, накопичення вітаміну С не залежить від підживлення рослин кремнієм. Як показують дані Ahmad та співавт. [31], накопичення аскорбінової кислоти у *Camelina sativa* та *Brassica napus* залишається майже на одному рівні й змінюється в межах 150 мг %.

Подібна тенденція щодо накопичення аскорбінової кислоти у надземній частині спостерігалася й у рослин *Brassica carinata* (ВФ-відібрана форма) у фазу бутонізації. Цей показник був найвищим у варіанті без внесення кремнієвмісних добрив, а у фазу плодоношення і дозрівання насіння був вищий у варіанті з кремнієм порівняно із контролем (див. рис. 3). Дослідження інших авторів показують що рослини *Brassica carinata* здатні накопичувати до 50 мг/100 г аскорбінової кислоти у фазу цвітіння [32].

Протилежні результати, порівняно із іншими дослідженими видами, встановлено для рослин *Brassica napus* сорту Rimal (див. рис. 3). Так, у варіанті із внесенням кремнієвмісного добрива спостерігається зростання вмісту аскорбінової кислоти у фазу цвітіння та плодоношення рослин. Разом з тим варто зазначити, що порівняно з даними інших авторів [31], у наших дослідженнях виявлено вищу концентрацію вітаміну С у надземній частині.

З'ясовано, що за внесення кремнієвмісного добрива у рослин *Camelina sativa* сорту Перемога зростає вміст дубильних речовин та зни-



Рис. 3. Вміст аскорбінової кислоти у рослин родини Brassicaceae:

1 — *Camelina sativa* Crantz f. annua сорт Перемога; 2 — *Brassica carinata* A. Braun (ВФ-відібрана форма); 3 — *Brassica napus* f. annua DC. сорт Rimal залежно від фази розвитку рослин (Б — бутонізація; Ц — цвітіння; ЦВ-ПП — цвітіння—початок плодоношення; П — плодоношення; Д — дозрівання насіння) та використання кремнієвмісного добрива

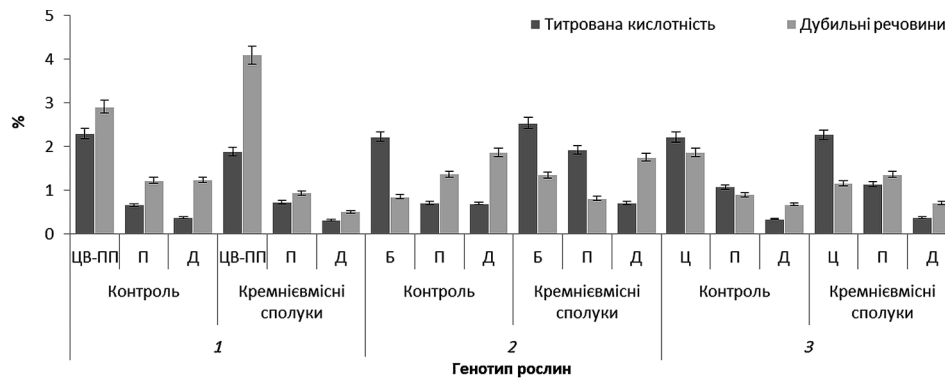


Рис. 4. Титрована кислотність та вміст дубильних речовин у рослин родини Brassicaceae:

1 — *Camelina sativa* Crantz f. *annua* сорт Перемога; 2 — *Brassica carinata* A. Braun (ВФ-відібрана форма); 3 — *Brassica napus* f. *annua* DC. сорт Rimal залежно від фази розвитку рослин (Б — бутонізація; Ц — цвітіння; ЦВ-ПП — цвітіння—початок плодоношення; П — плодоношення; Д — дозрівання насіння) та використання кремнієвмісного добрива

жується титрована кислотність у фазу цвітіння—початок плодоношення (рис. 4). Для інших фаз розвитку ці показники були менші порівняно з контролем. Відомо, що вміст дубильних речовин і титрована кислотність у рослин *Camelina sativa* змінюються в межах від 0,5 до 1,5 %, що певною мірою цілком порівняне із вмістом цих сполук у наших досліджах [33].

Рослини *Brassica carinata* (ВФ-відібрана форма) інакше накопичували дубильні речовини та титровану кислотність у надземній частині (див. рис. 4). Так, у варіанті із внесенням кремнієвмісного добрива спостерігали зростання порівняно з контролем титрованої кислотності й, навпаки, зменшення вмісту дубильних речовин. Для повного розуміння причинно-наслідкового зв'язку доцільне поглиблене вивчення динаміки фізіолого-біохімічних процесів у рослин родини Brassicaceae залежно від використання різних концентрацій кремнію. Також варто зазначити, що подібних досліджень у сучасній науковій літературі ми не знайшли.

Як і у випадку із накопиченням інших структурно-функціональних та біологічно активних сполук спостерігався позитивний вплив кремнієвмісного добрива на накопичення дубильних речовин та титрована кислотність у рослин *Brassica napus* сорту Rimal (див. рис. 4).

Виявлено, що рослини *Camelina sativa* сорту Перемога також активніше накопичують мінеральні сполуки у варіанті без внесення кремнію, що може свідчити про блокування певних механізмів обміну речовин між рослиною та навколишнім середовищем (рис. 5). Як демонструє Juodka та співавт. [34] вміст цих речовин подібний до даних, отриманих у наших дослідженнях.

Рослини *Brassica carinata* (ВФ-відібрана форма), на відміну від *Camelina sativa* сорту Перемога, у варіанті із внесенням кремнієвмісного добрива накопичували більше мінеральних речовин, лише у фазу бутонізації вміст золи у надземній частині був вищим у контрольному варіанті (див. рис. 5). Отримані результати цілком порівняні із результатами досліджень [35].

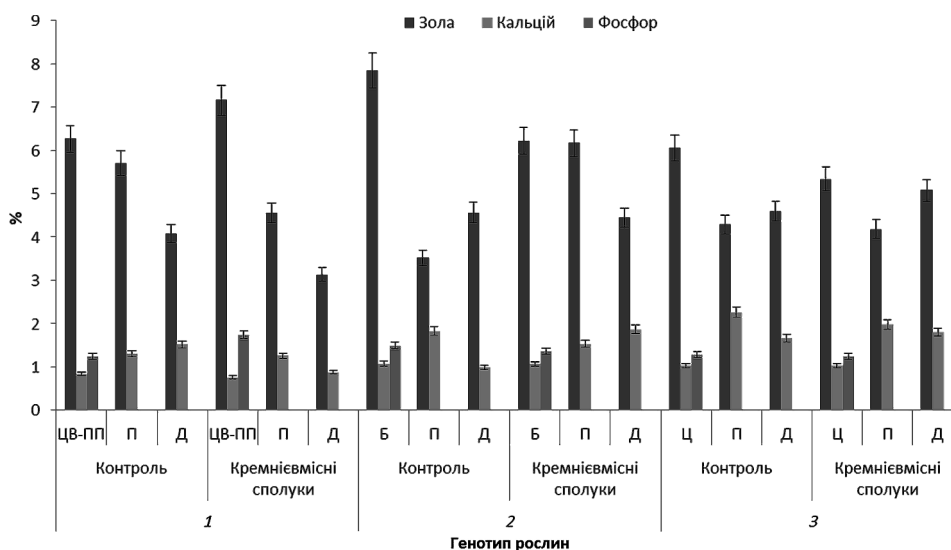


Рис. 5. Накопичення мінеральних речовин у рослин родини Brassicaceae:

1 — *Camelina sativa* Crantz f. *annua* сорт Перемога; 2 — *Brassica carinata* A. Braun (ВФ-відібрана форма); 3 — *Brassica napus* f. *annua* DC. сорт Rimal залежно від фази розвитку рослин (Б — бутонізація; Ц — цвітіння; ЦВ-ПП — цвітіння—початок плодоношення; П — плодоношення; Д — дозрівання насіння) та використання кремнієвімісного добрива

Аналіз вмісту мінеральних речовин у тканинах *Brassica napus* сорту Rimal показав незначну різницю за їх накопиченням у варіантах із кремнієм та в контролі (див. рис. 5). Це свідчить на користь припущення про позитивну реакцію рослинного організму цього виду на внесення кремнієвімісного добрива.

Вміст ліпідів у надземній частині рослин *Camelina sativa* був найвищим у варіанті без внесення кремнієвімісного добрива у фазу плодоношення, при цьому загальний вміст азоту зростав за наявності

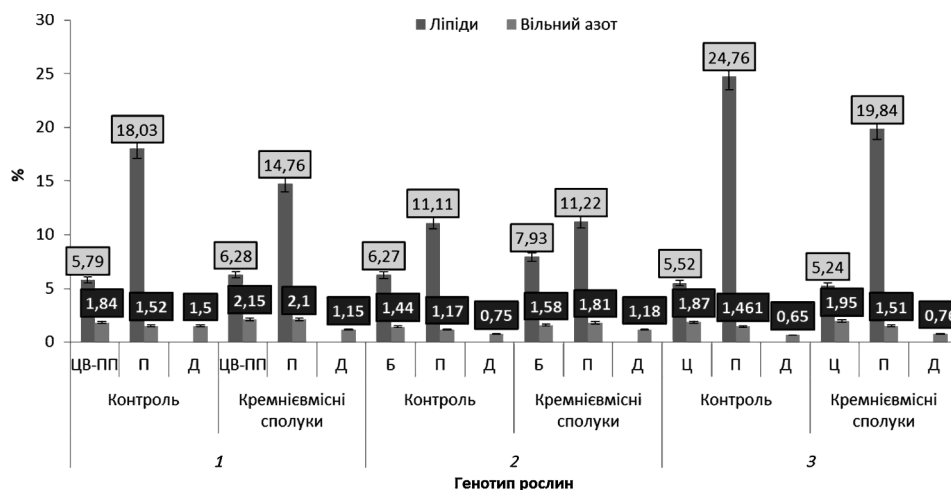


Рис. 6. Вміст ліпідів та загальний вміст азоту в рослин родини Brassicaceae:

1 — *Camelina sativa* Crantz f. *annua* сорт Перемога; 2 — *Brassica carinata* A. Braun (ВФ-відібрана форма); 3 — *Brassica napus* f. *annua* DC. сорт Rimal залежно від фази розвитку рослин (Б — бутонізація; Ц — цвітіння; ЦВ-ПП — цвітіння—початок плодоношення; П — плодоношення; Д — дозрівання насіння) та використання кремнієвімісного добрива

кремнію (рис. 6). За результатами Ahmad та співавт. [31] відомо, що рослини у фазу плодоношення здатні забезпечувати накопичення близько 20 % ліпідів та до 2 % загального азоту.

З'ясовано, що у рослин *B. carinata* (ВФ-відібрана форма) вміст ліпідів та загального азоту майже не залежав від внесення кремнієвмісного добрива, хоча незначне зростання цих речовин зафіксовано у фазу бутонізації—плодоношення. Дослідженню вмісту ліпідів та загального азоту у надземній масі рослин приділялось мало уваги, наявні дані здебільшого спрямовані на аналіз вмісту цих речовин у насінні. Відомо, що рослини *B. carinata* здатні накопичувати від 27 до 40 % ліпідів і в межах 1 % загального азоту [36].

За використання кремнієвмісного добрива зафіксовано незначне зростання вмісту загального азоту у надземній частині рослин *B. napus* сорту Rimal. Натомість простежується зменшення вмісту ліпідів (див. рис. 6). Наші дані корелюють із даними Gagour та співавт. [37].

Аналіз параметрів флуоресценції хлорофілу є потужним інструментом вивчення впливу найрізноманітніших екологічних чинників на рослинні організми [38, 39, 40]. Біотичні й абіотичні чинники часто є інгібіторами і активаторами біоенергетичних процесів, що відбуваються в клітинах рослин, та мають виражений вплив на параметри кінетики й спектральні особливості флуоресценції, а також на її стаціонарний рівень [40, 41]. Метод індукції флуоресценції хлорофілу (ІФХ) дає змогу продемонструвати адаптаційні зміни фотосинтетичного апарату, які виникають у зв'язку із підвищенням рівня антропогенного навантаження [41, 42].

Крива індукції флуоресценції хлорофілу відображає фізіологічний стан усього електронтранспортного ланцюга фотосинтезу і кінетику його різних частин. Як показано на рис. 7, інтенсивність індукції флуоресценції залежала від генотипових особливостей та внесення кремнієвмісного добрива. Рослини *C. sativa* сорту Перемога і *B. carinata* (ВФ-відібрана форма) мали вищу ІФХ, що свідчить про високу активність фотосинтетичного апарату порівняно із *B. napus* сорту Rimal.

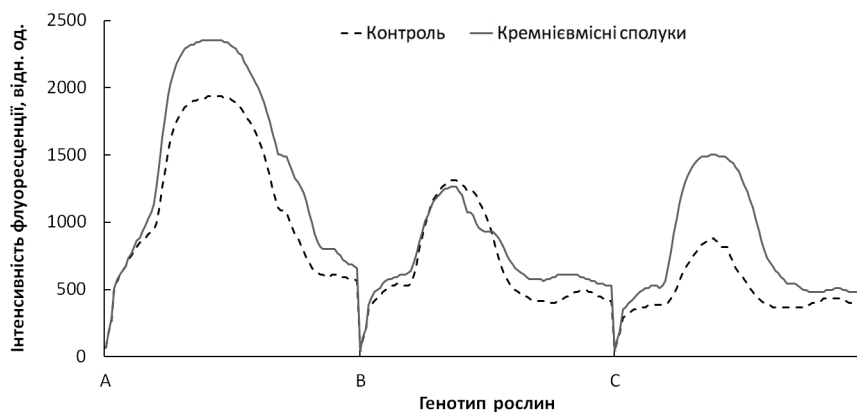


Рис. 7. Інтенсивність індукції флуоресценції хлорофілу у рослин родини Brassicaceae:

A — *Camelina sativa* Crantz f. *annua* сорт Перемога; B — *Brassica carinata* A. Braun (ВФ-відібрана форма); C — *Brassica napus* f. *annua* DC. сорт Rimal залежно від генотипних особливостей та використання кремнієвмісного добрива (фаза цвітіння)

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 фазу плодоношення в контролі й надалі спостерігали кращу ІФХ у рослин *C. sativa* сорту Перемога і *B. carinata* (ВФ-відібрана форма) порівняно із рослинами *B. napus* сорту Rimal (рис. 8). Використання кремнієвмісного добрива позитивно впливало на фізіологічний стан рослин *B. napus* сорту Rimal. 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 біохімічного складу 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 порізно впливає на фізіолого-біохімічні процеси в організмі. Найсприятливіший вплив кремнію простежувався у *Brassica napus* f. *annua* DC. сорту Rimal, для решти культур використання цього добрива спричинювало чутливість до стресових чинників довкілля, що відображалось у різкій відмінності накопичення окремих біологічно активних сполук у надземній масі упродовж вегетаційного періоду.

Аналіз кривих індукції флуоресценції хлорофілу показав, що рослини *C. sativa* сорту Перемога, *B. carinata* (ВФ-відібрана форма) характеризуються кращим функціонуванням фотосинтетичного апарату порівняно із *B. napus* сорту Rimal. Виявлено 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).

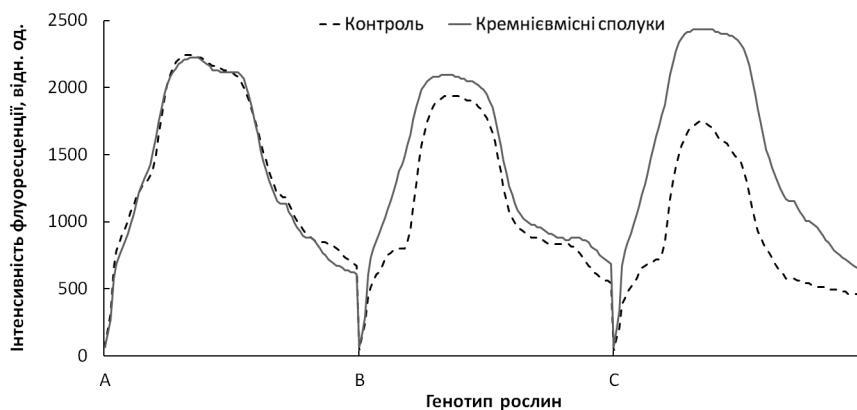


Рис. 8. Інтенсивність індукції флуоресценції хлорофілу у рослин родини Brassicaceae: А — *Camelina sativa* Crantz f. *annua* сорт Перемога; В — *Brassica carinata* A. Braun (ВФ-відібрана форма); С — *Brassica napus* f. *annua* DC. сорт Rimal залежно від генотипних особливостей та використання кремнієвмісного добрива (фаза плодоношення)

REFERENCES

1. Craswell, E. (2021). Fertilizers and nitrate pollution of surface and ground water: an increasingly pervasive global problem. *SN Appl. Sci.*, 3 (4), 518. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04521-8>
2. Ren, K., Xu, M., Li, R., Zheng, L., Liu, S., Reis, S. & Gu, B. (2022). Optimizing nitrogen fertilizer use for more grain and less pollution. *J. Clean. Prod.*, 360, 132180. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132180>
3. Chen, Y., Hu, S., Guo, Z., Cui, T., Zhang, L., Lu, C. & Jin, Y. (2021). Effect of balanced nutrient fertilizer: A case study in Pinggu District, Beijing, China. *Sci. Total Environ.*, 754, 142069. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142069>
4. Astaneh, N., Bazrafshan, F., Zare, M., Amiri, B. & Bahrani, A. (2021). Nano-fertilizer prevents environmental pollution and improves physiological traits of wheat grown under drought stress conditions. *Scientia Agropecuaria*, 12 (1), pp. 41-47. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.005>
5. Tao, W., Zeng, S., Yan, K., Alwahibi, M.S. & Shao, F. (2024). Effects of Boron and Zinc Micro-Fertilizer on Growth and Quality of Jujube Trees (*Ziziphus jujuba*) in the Desert Area. *Agronomy*, 14 (4), 741. <https://doi.org/10.3390/agronomy14040741>
6. Astiari, N.K.A., Sulistiawati, N.P.A., Mahardika, I.B.K. & Rai, I.N. (2019). 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.*, 3 (3), pp. 16-24. <https://doi.org/10.29332/ijls.v3n3.358>
7. Hanhur, V.V., Kocherha, A.A., Pypko, O.S. & Len, O.I. (2021). The effectiveness of microfertilizers for seed treatment and foliar applications of winter wheat crops. *Bul. of Poltava State Agrarian Acad.*, 2, pp. 46-51. <https://doi.org/10.31210/visnyk2021.02.05>
8. Gorash, O., Klymyshena, R., Zinchenko, O. & Strilets, O. (2021). Influence of foliar fertilization with micro-fertilizers on physiological grain quality of spring malting barley. *Ukr. J. of Ecol.*, 11 (5), pp. 15-20. https://doi.org/10.15421/2021_205
9. Xiong, Y.N., Han, D., Wang, F.Z., Ma, X.H., Jin, Y.N., Chen, B. ... & Xu, Z.C. (2019). Effects of Micro-fertilizer Combined with Small-Molecule Organic Matter on Growth and Quality of Flue-cured Tobacco. *Biotechnology Bulletin*, 35 (2), pp. 29-38.
10. Raza, A., Hafeez, M.B., Zahra, N., Shaikat, K., Umbreen, S., Tabassum, J. & Hasanuzzaman, M. (2020). The Plant Family Brassicaceae: Introduction, Biology, And Importance. In: Hasanuzzaman, M. (eds) *The Plant Family Brassicaceae*. Springer, Singapore, pp. 1-43. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6345-4_1
11. Jabeen, N. (2020). Agricultural, Economic and Societal Importance of Brassicaceae Plants. In: Hasanuzzaman, M. (eds) *The Plant Family Brassicaceae*. Springer, Singapore, pp. 45-128. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6345-4_2
12. Sydor, M., Kurasiak-Popowska, D., Stuper-Szablewska, K. & Rogoziński, T. (2022). *Camelina sativa*. Status quo and future perspectives. *Ind. Crops Prod.*, 187, 115531. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115531>
13. Seepaul, R., Kumar, S., Iboyi, J.E., Bashyal, M., Stansly, T.L., Bennett, R. ... & Wright, D.L. (2021). *Brassica carinata*: Biology and agronomy as a biofuel crop. *Gcb Bioenergy*, 13 (4), pp. 582-599. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12804>
14. Blume, R.Y., Lantukh, G.V., Levchuk, I.V., Lukashevych, K.M., Rakhmetov, D.B. & Blume, Y.B. (2020). Evaluation of potential biodiesel feedstocks: camelina, turnip rape, oil radish and tyfon. *The Open Agric. J.*, 14 (1). <https://doi.org/10.2174/1874331502014010299>
15. Raboanatahiry, N., Li, H., Yu, L. & Li, M. (2021). Rapeseed (*Brassica napus*): Processing, utilization, and genetic improvement. *Agronomy*, 11 (9), 1776. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091776> <https://www.gbif.org/uk/>
16. Salehi, B., Quispe, C., Butnariu, M., Sarac, I., Marmouzi, I., Kamle, M. ... & Martorell, M. (2021). Phytotherapy and food applications from Brassica genus. *Phytotherapy research*, 35 (7), pp. 3590-3609. <https://doi.org/10.1002/ptr.7048>
17. Ayadi, J., Debouba, M., Rahmani, R. & Bouajila, J. (2022). Brassica genus seeds: A review on phytochemical screening and pharmacological properties. *Molecules*, 27 (18), 6008. <https://doi.org/10.3390/molecules27186008>
18. Mandrich, L. & Caputo, E. (2020). Brassicaceae-derived anticancer agents: Towards a green approach to beat cancer. *Nutrients*, 12 (3), 868. <https://doi.org/10.3390/nu12030868>

19. Alberghini, B., Zanetti, F., Corso, M., Boutet, S., Lepiniec, L., Vecchi, A. & Monti, A. (2022). Camelina [*Camelina sativa* (L.) Crantz] seeds as a multi-purpose feedstock for bio-based applications. *Ind. Crops Prod.*, 182, 114944. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114944>
20. Hagos, R., Shaibu, A.S., Zhang, L., Cai, X., Liang, J., Wu, J. ... & Wang, X. (2020). Ethiopian mustard (*Brassica carinata* A. Braun) as an alternative energy source and sustainable crop. *Sustainability*, 12 (18), 7492. <https://doi.org/10.3390/su12187492>
21. Raj, S.P., Solomon, P.R., Thangaraj, B. (2022). Brassicaceae. In: *Biodiesel from Flowering Plants*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4775-8_8
22. Teimoori, N., Ghobadi, M., Kahrizi, D. (2023). Improving the growth characteristics and grain production of Camelina (*Camelina sativa* L.) under salinity stress by silicon foliar application. *Agrotech. Ind. Crops.*, 3 (1), pp. 1-13. <https://doi.org/10.22126/atic.2023.8681.1081>
23. Bashyal, M., Mulvaney, M.J., Lee, D., Wilson, C., Iboyi, J.E., Leon, R.G., Boote, K.J. (2021). 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*, 13 (8), pp. 1275-1289. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12846>
24. Seepaul, R., Marois, J., Small I.M., George, S., Wright, D.L. (2019). Carinata Dry Matter Accumulation and Nutrient Uptake Responses to Nitrogen Fertilization. *Agronomy J.*, 111 (4), pp. 2038-2046. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.10.0678>
25. Bano, K., Kumar, B., Alyemeni, M.N., Ahmad, P. (2022). Exogenously-sourced salicylic acid imparts resilience towards arsenic stress by modulating photosynthesis, antioxidant potential and arsenic sequestration in Brassica napus plants. *Antioxidants*, 11 (10), 2010. <https://doi.org/10.3390/antiox11102010>
26. Ahmad, Z., Waraich, E. A., Barutcular, C., Alharby, H., Bamagoos, A., Kizilgeci, F., El Sabagh, A. (2020). Enhancing drought tolerance in Camelina sativa L. and canola (*Brassica napus* L.) through application of selenium. *Pak. J. Bot.*, 52 (6), pp. 1927-1939. [https://doi.org/10.30848/PJB2020-6\(31\)](https://doi.org/10.30848/PJB2020-6(31))
27. Mezgebe, A., Azerefegne, F. (2021). Effect of water stress on glucosinolate content of Brassica carinata and performance of Brevicoryne brassicae and Myzus persicae. *Int. J. Trop. Insect Sci.*, 41, pp. 953-960. <https://doi.org/10.1007/s42690-020-00340-3>
28. Kumar, A., Yadav, S., Ahlawat, N., Yadav, J. (2020). Biochemical basis of resistance to mustard aphid lipaphis erysimi (Kaltenbach). *Indian J. of Entomology*, 82 (4), pp. 875-879. <https://doi.org/10.5958/0974-8172.2021.00027.4>
29. Jamshidi Zinab, A., Hasanloo, T., Naji, A.M., Delangiz, N., Farhangi-Abriz, S., Asgari Lajayer, B., Farooq, M. (2023). Physiological and biochemical evaluation of commercial oilseed rape (*Brassica napus* L.) cultivars under drought stress. *Gesunde Pflanzen*, 75 (4), pp. 847-860. <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00755-7>
30. Ahmad, Z., Anjum, S., Skalicky, M., Waraich, E.A., Muhammad Sabir Tariq, R., Ayub, M.A., El Sabagh, A. (2021). Selenium alleviates the adverse effect of drought in oilseed crops camelina (*Camelina sativa* L.) and canola (*Brassica napus* L.). *Molecules*, 26 (6), 1699. <https://doi.org/10.3390/molecules26061699>
31. Hailemariam, G.A. & Wudineh, T.A. (2020). Effect of cooking methods on ascorbic acid destruction of green leafy vegetables. *J. of Food Quality*, 2020 (1), 8908670. <https://doi.org/10.1155/2020/8908670>
32. Mondor, M., Hernández-Álvarez, A.J. (2022). Camelina sativa composition, attributes, and applications: A review. *European J. Lipid Sci. Tech.*, 124 (3), 2100035. <https://doi.org/10.1002/ejlt.202100035>
33. Juodka, R., Nainienė, R., Juškienė, V., Juška, R., Leikus, R., Kadžienė, G., Stankevičienė, D. (2022). Camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) as Feedstuffs in Meat Type Poultry Diet: A Source of Protein and n-3 Fatty Acids. *Animals*, 12 (3), 295. <https://doi.org/10.3390/ani12030295>
34. Kazemi, S., Rafati Alashti, M. & Hosseini, S.J. (2021). Response of biochemical and physiological properties of camellia (*Camelina sativa* L.) to foliar application of calcium and silicon nanoparticles. *Silicon*, 14, pp. 6817-6828. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01464-y>
35. Mohdaly, A.A.A., Ramadan, M.F. (2022). Characteristics, composition and functional properties of seeds, seed cake and seed oil from different Brassica carinata genotypes. *Food Bioscience*, 48, 100752. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100752>
36. Gagour, J., Ahmed, M.N., Bouzid, H.A., Oubannin, S., Bijla, L., Ibourki, M., Gharby, S. (2022). Proximate composition, physicochemical, and lipids profiling and elemental pro-

- filing of rapeseed (*Brassica napus* L.) and sunflower (*Helianthus annuus* L.) grown in Morocco. Evidence-based Complementary and Alternative Medicine, 2022 (1), 3505943. <https://doi.org/10.1155/2022/3505943>
37. Seliutina, O.V., Holoborodko, K.K., Pakhomov, O.Y. & Dubyna, A.O. (2021). Assessment of leaf damage degree in *Aesculus hippocastanum* L. during the growing season in the conditions of Dnipro city. Ecology and Noospherology, 32 (2), pp. 82-86. <https://doi.org/10.15421/032114>
 38. Rohacek, K., Bartak, M. (1999). Technique of the modulated chlorophyll fluorescence: basic concepts, useful parameters, and some applications. Photosynthetica, 37 (3), pp. 339-363. <https://doi.org/10.1023/A:1007172424619>
 39. Hrusha, V.M. (2015). Analysis of data measured by portable fluorometer «floratest». Computer Systems and Networks, 14, pp. 109-116.
 40. Maxwell, K., Johnson, G.N. (2000). Chlorophyll fluorescence—apactical guide. J. Exp. Bot., 51 (345), pp. 659-668. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.345.659>
 41. Mazura, M.Y., Miroshnyk, N.V. & Teslenko, I.K. (2021). 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, (1), pp. 201-206. <https://doi.org/10.37555/2707-3114.1.2021.247688>

Received 25.11.2024

DYNAMICS OF PHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL PROCESSES IN PLANTS OF THE BRASSICACEAE FAMILY DEPENDING ON THE USE OF SILICON-CONTAINING FERTILIZER

D.B. Rakhmetov¹, N.V. Zaimenko¹, O.P. Bondarchuk¹, Ya.B. Blum², S.O. Rakhmetova¹, V.V. Fishchenko¹

¹M.M. Gryshko National Botanical Garden, National Academy of Sciences of Ukraine
1 Sadovo-Botanicna St., Kyiv, 01014, Ukraine

²Institute of Food Biotechnology and Genomics, National Academy of Sciences of Ukraine
2a Osipovskogo St., Kyiv, 04123, Ukraine

The peculiarities of the accumulation of dry matter, biologically active substances, mineral substances, and changes in the chlorophyll fluorescence induction intensity in three different species of plants of the Brassicaceae family (*Camelina sativa* Crantz f. *annua*, cv. Peremoha, *Brassica carinata* A. Braun (SF-selected form) and *Brassica napus* f. *annua* DC., cv. Rimal) under the use of silicon-containing compounds were investigated. The most favorable effect of silicon-containing compounds was established in *Brassica napus* f. *annua* DC., cv. Rimal, for the rest of the species the use of these compounds caused sensitivity to environmental stress factors, which was reflected in a sharp difference in the accumulation of several biologically active substances in the above-ground mass during the growing season. In all studied samples, in general, the improvement of the photosynthetic apparatus was noted, along with the maximum manifestation for plants of *B. napus* f. *annua* DC., cv. Rimal under the use of microfertilizers.

Key words: *Camelina sativa* (L.) Crantz., *Brassica carinata* A. Braun, *Brassica napus* DC., genotype, resistance, physiological and biochemical state.

ORCID

Д.Б. РАХМЕТОВ — Dzhamal Rakhmetov <https://orcid.org/0000-0001-7260-3263>

Н.В. ЗАІМЕНКО — Nataliya Zaimenko <https://orcid.org/0000-0003-2379-1223>

О.П. БОНДАРЧУК — Oleksandr Bondarchuk <https://orcid.org/0000-0001-6367-9063>

Я.Б. БЛЮМ — Yaroslav Blume <https://orcid.org/0000-0001-7078-7548>

С.О. РАХМЕТОВА — Svitlana Rakhmetova <https://orcid.org/0000-0002-0357-2106>

В.В. ФІЩЕНКО — Valentyna Fishchenko <https://orcid.org/0000-0003-3647-7858>