

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРНІВЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЮРІЯ ФЕДЬКОВИЧА

Навчально-науковий інститут біології, хімії та біоресурсів

Кафедра молекулярної генетики та біотехнології

ВМІСТ БІОЕЛЕМЕНТІВ У ГЕМОЛІМФІ МЕДОНОСНИХ БДЖІЛ ПРИ
ТЕМПЕРАТУРНОМУ, ХАРЧОВОМУ ТА КОМБІНОВАНОМУ
СТРЕСАХ

Кваліфікаційна робота

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Виконала:

Студентка 4 курсу, групи 400

спеціальність 162 Біотехнології та
біоінженерії

Куляк Евеліна Вадимівна

Керівник:

Кандидат біологічних наук,
доцент **Язловицька Л.С.**

До захисту допущено:

на засіданні кафедри

протокол № 10 від 09 червня 2025 р.

Зав. кафедри _____ проф. Волков Р.А.

Чернівці - 2025 р.

АНОТАЦІЯ

У дипломній роботі досліджено вміст біоелементів заліза (Fe), кальцію (Ca), магнію (Mg) та фосфору (P) у гемолімфі робочих бджіл (*Apis mellifera*) за дії окремих і комбінованих стресових факторів: температурного (зниження температури до +14 °C) та харчового (вуглеводне навантаження різними типами цукрів). Метою дослідження було з'ясування змін мінерального складу гемолімфи під впливом різних температурних режимів та типів вуглеводного живлення (глюкоза, фруктоза, сахароза, глюкоза + фруктоза). Для досягнення мети було проведено експериментальне утримання молодих бджіл у лабораторних умовах з контролем температури та типу корму. Відбір гемолімфи здійснювали на 16-й день досліду, а вміст елементів визначали за допомогою колориметричного аналізу.

Установлено, що вміст Fe, Ca, Mg та P у гемолімфі суттєво змінюється під впливом стресових факторів. Зокрема, найвищий вміст кальцію спостерігався при утриманні бджіл на сахарозній дієті, магнію — при фруктозній та комбінованій дієтах, а фосфору — при глюкозному живленні. Температурний стрес зумовлював зниження рівня більшості елементів, але деякі дієти (особливо фруктозна) частково компенсували цей ефект.

Результати можуть бути використані для розробки оптимальних схем підгодівлі бджіл з урахуванням стресових умов, що є актуальним у контексті зміни клімату та індустріалізації бджільництва.

Ключові слова: *Apis mellifera*. біометали, гемолімфа,

ANNOTATION

This bachelor's thesis investigates the content of bioelements — iron (Fe), calcium (Ca), magnesium (Mg), and phosphorus (P) — in the hemolymph of worker honey bees (*Apis mellifera*) under the influence of individual and combined stress factors: thermal (decreased temperature to +14 °C) and nutritional (different carbohydrate-based diets).

The aim of the study was to determine how the mineral composition of hemolymph changes depending on temperature conditions and carbohydrate type (glucose, fructose, sucrose, glucose + fructose). Experimental bees were reared under controlled laboratory conditions, with standardized feeding regimens and temperature treatments. Hemolymph samples were collected on day 16 of the experiment, and elemental content was analyzed using colorimetric methods.

The results showed significant variations in Fe, Ca, Mg, and P concentrations in response to stress factors. The highest calcium content was observed in bees fed with sucrose, magnesium levels were highest under fructose and glucose+fructose diets, and phosphorus content peaked under glucose feeding. Exposure to low temperatures led to a general decrease in element concentrations, although some diets (especially fructose-based) helped mitigate this effect.

These findings can be applied to improve bee feeding strategies, particularly under environmental stress conditions, and are relevant for the sustainable management of honey bee colonies amid climate change and intensification of beekeeping practices.

Key words: *Apis mellifera*, bioelements hemolymph

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів наукових досліджень інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Куляк Евеліна

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	7
1.1. Гемолімфа медоносних бджіл: склад та функції	7
1.2 Особливості живлення бджіл та метаболізм біоелементів	9
1.3 Вплив стресових факторів на фізіологічний стан бджіл	13
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	20
2.1. Об'єкт дослідження	20
2.2. Умови проведення експерименту	20
2.3. Методи відбору та підготовки зразків гемолімфи	22
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	30
3.1. Вміст біоелементів у гемолімфі бджіл за нормальних умов	30
3.2. Зміни вмісту біоелементів у гемолімфі бджіл за дії температурного стресу	35
3.3. Вплив сумісної дії температури та складу дієти на вміст біоелементів у гемолімфі бджіл	40
ВИСНОВКИ	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	47
ДОДАТКИ	52

ВСТУП

Бджільництво є важливою галуззю сільського господарства України, що забезпечує виробництво меду, воску, прополісу, бджолиного обніжжя, маточного молочка, а також відіграє вирішальну роль у запиленні ентомофільних сільськогосподарських культур. В умовах зростаючого антропогенного навантаження на екосистеми та глобальних кліматичних змін, медоносні бджоли (*Apis mellifera* L.) стикаються з численними стресовими факторами, які негативно впливають на їхній фізіологічний стан, продуктивність та життєздатність (Жук та інші, 2024).

Останніми роками в різних країнах світу спостерігається масова загибель бджолиних сімей, яку пов'язують з комплексним впливом патогенів, пестицидів, зміною клімату та якістю кормової бази (Язловицька & Панчук 2024). Механізми відповіді організму бджоли на дію стресових факторів досліджені недостатньо, особливо на рівні обміну мікроелементів. Гемолімфа бджіл, яка виконує транспортну, захисну та гомеостатичну функції, є інформативним індикатором фізіологічного стану організму комах і може відображати вплив різноманітних несприятливих чинників (Савчук 2024).

Мікроелементи відіграють важливу роль у метаболічних процесах бджіл, беручи участь у функціонуванні ферментативних систем, процесах адаптації та детоксикації (Федорук та ін., 2021). Вивчення змін вмісту мікроелементів у гемолімфі бджіл за дії стресових факторів дозволить глибше зрозуміти механізми адаптації та розробити ефективні методи підвищення резистентності бджолиних сімей до несприятливих умов довкілля.

Метою дослідження є визначення вмісту окремих біоелементів у гемолімфі медоносних бджіл та аналіз їх змін за дії температурного стресу і вуглеводного навантаження.

Для досягнення поставленої мети визначено наступні завдання:

1. Дослідити вміст есенціальних біоелементів (Fe, Ca, Mg, P) у гемолімфі бджіл за нормальних умов утримання.
2. Визначити зміни вмісту біоелементів у гемолімфі бджіл за дії температурного стресу.
3. Встановити вплив вуглеводного навантаження на рівень мікроелементів у гемолімфі бджіл.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Гемолімфа медоносних бджіл: склад та функції

Гемолімфа представляє собою рідину внутрішнього середовища організму комах, яка забезпечує виконання низки критично важливих біологічних функцій. На відміну від кровоносної системи хребетних тварин, гемолімфа циркулює в системі лакун та порожнин, а не в замкненій судинній мережі. Вона відповідає за транспортування поживних речовин, гормонів, метаболітів і продуктів екскреції між тканинами та органами, бере активну участь у процесах терморегуляції, імунного захисту та підтримання гомеостазу організму (Поліщук, 2001).

Медоносна бджола (*Apis mellifera* L.) як високоорганізований представник соціальних комах відзначається складною внутрішньою організацією та інтенсивним метаболізмом, де гемолімфа виконує центральну координуючу роль у фізіологічних процесах. Морфологічно гемолімфа складається з рідкої фракції – плазми та клітинних елементів – гемоцитів. Плазма містить воду (70-80%), білкові сполуки, ліпіди, вуглеводи, гормони (табл. 1.1.1.), ферменти, амінокислоти, а також широкий спектр мінеральних речовин. Склад гемолімфи характеризується динамічністю і залежить від багатьох факторів: віку особини, фізіологічного стану, сезонних змін, характеру харчування, умов зовнішнього середовища тощо (Федорук та ін., 2021).

Білковий профіль гемолімфи бджіл представлений переважно альбумінами та глобулінами, які виконують транспортні, захисні та регуляторні функції. Концентрація білків у гемолімфі робочої бджоли коливається від 4 до 8% залежно від віку та фізіологічного стану (Калачнюк, 2023). Максимальна концентрація білків спостерігається у молодих бджіл-

годувальниць (9-12-денного віку), що корелює з розвитком гіпофарингеальних залоз та інтенсивною продукцією маточного молочка.

Таблиця 1.1.1.

Хімічний склад гемолімфи робочих бджіл різного віку

Показники	Личинки	Лялечки	Молоді бджоли (1-10 днів)	Робочі бджоли (11-30 днів)	Бджоли осінньої генерації
Вода, %	85-90	82-85	80-83	78-80	75-78
Білки, %	1-3	3-4	6-8	4-6	5-7
Ліпіди, %	0,5-1	1-1,5	1,5-2	1-1,5	60-80
Вуглеводи, %	60-80	1-2	1-2	1,5-2,5	60-80
Мінеральні речовини, %	0,4-0,6	0,5-0,7	0,6-0,8	0,7-0,9	0,8-1,0
pH	6,8-7,0	6,8-7,0	6,9-7,1	7,0-7,2	7,0-7,2

Джерело: складено за даними (Поліщук, 2001; Калачнюк, 2023)

Наприкінці літа та восени концентрація білків у гемолімфі зростає у зв'язку з підготовкою бджіл до зимівлі (Дребот & Височанська, 2023).

Ліпідна фракція гемолімфи бджіл включає жирні кислоти, фосфоліпіди, стерини та жироподібні речовини. Ці сполуки відіграють ключову роль у метаболізмі, слугують резервним джерелом енергії, беруть участь у формуванні клітинних мембран, біосинтезі гормонів, процесах терморегуляції та підготовки до зимівлі (Богданов та ін., 2003). За даними Ковальської та співавторів (2008), у гемолімфі бджіл переважають ненасичені жирні кислоти, зокрема олеїнова (C18:1) та лінолева (C18:2), які становлять понад 60% загального вмісту жирних кислот.

Вуглеводний компонент гемолімфи бджіл представлений переважно глюкозою, фруктозою та трегалозою. Концентрація вуглеводів у гемолімфі прямо залежить від інтенсивності обмінних процесів, рівня фізичної активності та характеру живлення бджіл. Під час активних польотів концентрація глюкози в гемолімфі знижується, а при споживанні цукрового сиропу – різко зростає (Дружб'як та ін., 2013).

Мінеральні речовини гемолімфи бджіл представлені макро- і мікроелементами, які виконують структурну, каталітичну, регуляторну та захисну функції. Серед макроелементів у гемолімфі переважають калій, натрій, кальцій, магній, фосфор; серед мікроелементів – залізо, цинк, мідь, марганець, хром та інші (Здирко & Шульган, 2022).

При дослідженні мінерального складу гемолімфи бджіл встановлено, що найвищу концентрацію мають калій (400-500 мг/л) та натрій (150-200 мг/л), що зумовлено їх роллю в підтриманні осмотичного тиску та поляризації клітинних мембран. Вміст кальцію становить 40-60 мг/л, магнію – 30-40 мг/л, фосфору – 70-90 мг/л. Серед мікроелементів у гемолімфі бджіл переважає залізо (20-30 мг/л), далі йдуть цинк (5-10 мг/л), мідь (1-3 мг/л), марганець (0,5-1 мг/л) та хром (0,1-0,3 мг/л) (Скрипка та ін., 2021).

Гемоцити гемолімфи бджіл представлені декількома типами клітин: прогемоцитами, плазмоцитами, гранулоцитами, сферулоцитами та еноцитоїдами. Вони виконують фагоцитарну, інкапсуляційну, коагуляційну, трофічну та транспортну функції. Загальна кількість гемоцитів у гемолімфі робочої бджоли становить 2000-4000 клітин на 1 мм³ і залежить від віку, фізіологічного стану та умов навколишнього середовища (Поліщук, 2001).

Особливу увагу дослідників привертає вивчення вмісту мікроелементів у гемолімфі бджіл, оскільки ці речовини відіграють критичну роль у метаболічних процесах, функціонуванні ферментативних систем, адаптаційних реакціях та детоксикації ксенобіотиків. Крім того, мікроелементний склад гемолімфи може слугувати надійним індикатором екологічного стану навколишнього середовища та виявляти рівень антропогенного забруднення територій (Локутова та ін., 2021; Bilalov et al., 2015).

1.2 Особливості живлення бджіл та метаболізм біоелементів

Медоносні бджоли як високоорганізовані соціальні комахи характеризуються складною та високоспеціалізованою системою живлення, що забезпечує надходження в організм усіх необхідних поживних речовин, включаючи життєво важливі мікроелементи. Основними природними джерелами поживних речовин для бджіл є нектар, медяна роса, квітковий пилок та вода (Поліщук, 2001).

Нектар і медяна роса служать первинними джерелами вуглеводів (глюкоза, фруктоза, сахароза), які забезпечують енергетичні потреби організму бджіл. Квітковий пилок містить білки, ліпіди, вітаміни та широкий спектр мінеральних речовин, необхідних для росту, розвитку та репродуктивної функції. Вода використовується для розведення меду, охолодження вулика та як додаткове джерело мінеральних речовин (Богданов та ін., 2003).

Мікроелементи надходять в організм бджіл переважно з квітковим пилком та водою, меншою мірою – з нектаром та медяною росою. Концентрація мікроелементів у квітковому пилку різних рослин суттєво варіює залежно від ботанічного виду рослини, ґрунтово-кліматичних умов, екологічного стану території тощо (Богданов та ін., 2003; Manning, 2001).

За даними досліджень, у квітковому пилку різних рослин вміст заліза становить 40-300 мг/кг, цинку – 30-250 мг/кг, міді – 6-30 мг/кг, марганцю – 20-100 мг/кг, хрому – 0,3-0,8 мг/кг (Богданов та ін., 2003). Дослідження Локутової та співавторів (2021) показали, що концентрація мікроелементів у квітковому пилку залежить від екологічних умов регіону. Так, у квітковому пилку, зібраному на територіях з високим рівнем техногенного забруднення, вміст важких металів (свинець, кадмій, ртуть) був у 2-3 рази вищим порівняно з екологічно чистими територіями.

Вода як джерело мікроелементів для бджіл має важливе значення, особливо у весняно-літній період, коли бджоли активно споживають воду для розведення меду та охолодження вулика. Концентрація мікроелементів у природних водоймах залежить від геохімічних особливостей місцевості та антропогенного впливу (Локутова та ін., 2021).

Мікроелементи в організмі бджіл виконують різноманітні та критично важливі функції:

Ферментативна функція – входять до складу активних центрів ферментів або виступають їх кофакторами. Наприклад, мідь входить до складу цитохромоксидази, залізо – до складу каталази та пероксидази, цинк – до складу карбоангідрази та лужної фосфатази, марганець – до складу аргінази та піруваткарбоксилази, хром – до складу карбоксипептидази (Калачнюк, 2023; Solayman et al., 2016).

Структурна функція – беруть участь у формуванні біологічних структур. Наприклад, залізо входить до складу хітинової кутикули, зміцнюючи її структуру, цинк – до складу клітинних мембран, підвищуючи їх стабільність (Solayman et al., 2016; Matuszewska et al., 2021).

Регуляторна функція – беруть участь у регуляції метаболічних процесів, активності ферментів, проникності клітинних мембран. Наприклад, мідь регулює активність тирозинази, яка бере участь у процесах меланізації та склеротизації кутикули, цинк регулює активність ДНК- і РНК-полімераз, які забезпечують процеси транскрипції та трансляції генетичної інформації (Калачнюк, 2023; Solayman et al., 2016).

Антиоксидантна функція – захищають клітини від пошкоджувальної дії вільних радикалів та активних форм кисню. Наприклад, залізо, мідь та цинк входять до складу супероксиддисмутази, яка нейтралізує супероксидний аніон-радикал, залізо входить до складу каталази, яка розщеплює пероксид водню (Будник & Волощук, 2021; Solayman et al., 2016).

Детоксикаційна функція – беруть участь у нейтралізації та виведенні з організму токсичних речовин. Наприклад, мідь та цинк активують ферменти системи цитохрому Р450, які забезпечують метаболізм ксенобіотиків (Локутова та ін., 2021; Solayman et al., 2016).

Метаболізм мікроелементів в організмі бджіл характеризується певними особливостями:

1. Особливості абсорбції – мікроелементи надходять в організм бджіл через стінки середньої кишки шляхом активного транспорту, пасивної дифузії або ендоцитозу. Швидкість та ефективність абсорбції залежать від хімічної форми мікроелемента, кислотності середовища, наявності інших речовин, які можуть утворювати комплекси з мікроелементами (Ковальська та ін., 2008; Solayman et al., 2016).

2. Особливості транспорту та розподілу – після абсорбції мікроелементи потрапляють у гемолімфу, де зв'язуються з білками (металопротеїнами), які забезпечують їх транспорт до клітин та тканин. Розподіл мікроелементів в організмі бджіл нерівномірний: вони можуть накопичуватися в певних органах та тканинах (жирове тіло, ректальні залози, мальпігієві судини) або рівномірно розподілятися по всьому організму (Ковальська та ін., 2008; Здирко & Шульган, 2022).

3. Особливості екскреції – мікроелементи виводяться з організму бджіл через мальпігієві судини, ректальні залози, кишечник, а також з продуктами секреції (мед, віск, маточне молочко). Швидкість виведення залежить від виду мікроелемента, його концентрації в організмі, фізіологічного стану бджоли (Локутова та ін., 2021; Solayman et al., 2016).

Дослідження показали, що концентрація мікроелементів у гемолімфі бджіл залежить від низки факторів:

1. Вік бджіл – у молодих бджіл (1-7 днів) концентрація заліза, міді та цинку в гемолімфі вища порівняно з літніми бджолами (старше 30 днів),

що пов'язано з інтенсивним розвитком гіпофарингеальних залоз та синтезом маточного молочка.

2. Сезон року – восени та взимку концентрація мікроелементів у гемолімфі бджіл зростає, що пов'язано з підготовкою до зимівлі та зменшенням об'єму гемолімфи.

3. Фізіологічний стан – у бджіл-годувальниць концентрація мікроелементів у гемолімфі вища порівняно з льотними бджолами, що пов'язано з розвитком гіпофарингеальних залоз та продукцією маточного молочка.

4. Харчування – при збагаченні корму мікроелементами їх концентрація у гемолімфі зростає, що дозволяє використовувати мікроелементні добавки для корекції мінерального живлення бджіл.

5. Екологічні умови – при техногенному забрудненні території концентрація важких металів у гемолімфі бджіл зростає, що може слугувати індикатором екологічного стану довкілля.

Для забезпечення оптимального мінерального живлення бджіл використовують різноманітні підгодівлі з додаванням мікроелементів. Традиційно у бджільництві застосовують неорганічні солі мікроелементів (сульфати, хлориди, нітрати), однак вони мають ряд недоліків: низьку біодоступність, можливу токсичність при передозуванні, негативний вплив на органолептичні властивості корму (Поліщук, 2001; Kovalchuk et al., 2017).

Перспективним напрямком є використання органічних форм мікроелементів, зокрема цитратів, які характеризуються високою біодоступністю, низькою токсичністю, стабільністю в кислому середовищі кишечника бджіл (Федорук та ін., 2021; Karlunen et al., 2017).

Таким чином, мікроелементи відіграють фундаментальну роль у метаболізмі медоносних бджіл, беручи участь у процесах росту, розвитку, репродукції, адаптації до змін умов навколишнього середовища. Забезпечення оптимального мінерального живлення бджіл, особливо в

періоди підвищеного фізіологічного навантаження та при дії стресових факторів, є важливою умовою підтримання їх життєздатності та продуктивності.

1.3 Вплив стресових факторів на фізіологічний стан бджіл

Медоносні бджоли як високоорганізовані соціальні комахи характеризуються складною системою адаптації до змін умов навколишнього середовища. Однак в умовах зростаючого антропогенного навантаження на екосистеми та глобальних кліматичних змін бджоли стикаються з численними стресовими факторами, які негативно впливають на їхній фізіологічний стан, продуктивність та життєздатність (Bilalov et al., 2015; Yang et al., 2017).

Стресом у фізіології комах називають стан напруження адаптаційних механізмів організму у відповідь на дію несприятливих чинників довкілля. Стресові фактори, які впливають на організм бджіл, можна класифікувати за декількома групами:

Фізичні фактори – температура, вологість, освітлення, шум, вібрація, електромагнітне випромінювання тощо. Найбільший вплив на бджіл мають температурні коливання, особливо екстремально високі або низькі температури, які порушують терморегуляцію всередині вулика (Куртяк, 2024; Поліщук, 2001).

Хімічні фактори – пестициди, гербіциди, важкі метали, промислові відходи, вихлопні гази автотранспорту. Серед хімічних стресорів найбільшу небезпеку для бджіл становлять неонікотиноїди, які діють на нервову систему комах, порушуючи їх поведінку, орієнтацію в просторі, здатність до навчання та запам'ятовування (Локутова та ін., 2021; Bilalov et al., 2015).

Біологічні фактори – патогени (віруси, бактерії, гриби), паразити (кліщі, ноземи), шкідники (восковий міль, хижак), конкуренти за кормові ресурси.

Особливо небезпечним для бджіл є поєднання кількох біологічних стресорів, наприклад, інвазія кліща *Varroa destructor* та вірусні інфекції (Будник & Волощук, 2021; Поліщук, 2001).

Аліментарні фактори – нестача або дисбаланс поживних речовин, низька якість корму, монофлорний тип живлення, одноманітний штучний корм. Недостатнє або незбалансоване живлення призводить до зниження імунітету, скорочення тривалості життя, порушення розвитку внутрішніх органів бджіл (Поліщук, 2001; DeGrandi-Hoffman et al., 2018).

Антропогенні фактори – механічні пошкодження при огляді вуликів, транспортування на запилення, недотримання технології утримання, неправильне застосування лікувальних препаратів. Інтенсивне промислове бджільництво з частими переміщеннями пасік, штучним виведенням маток, високою щільністю розміщення вуликів створює додаткове навантаження на організм бджіл (Поліщук, 2001; Bilalov et al., 2015).

Дія стресових факторів на організм бджіл призводить до ряду фізіологічних змін, які можна розглядати як реакцію-відповідь на стрес. Ці зміни охоплюють різні рівні організації: від молекулярного та клітинного до організмового та популяційного.

На молекулярному рівні стрес викликає активацію специфічних генів, які кодують білки теплового шоку (HSP), антиоксидантні ферменти, антибактеріальні пептиди та інші захисні молекули. Наприклад, при тепловому стресі у бджіл активується експресія генів HSP70, HSP90, які кодують білки теплового шоку, що захищають клітинні білки від денатурації та агрегації (Куртяк, 2024; Yang et al., 2017).

На клітинному рівні стрес призводить до змін у структурі та функціях мембран, мітохондрій, ендоплазматичного ретикулуму, лізосом. Порушується іонний гомеостаз, активуються процеси перекисного окислення ліпідів, змінюється активність ферментів. Наприклад, при окисному стресі у бджіл зростає активність антиоксидантних ферментів (каталази,

супероксиддисмутази, глутатіонпероксидази), які нейтралізують вільні радикали та активні форми кисню (Будник & Волощук, 2021; Fu & Xi, 2020).

На організмовому рівні стрес викликає зміни у поведінці, фізіології, біохімії, імунитеті бджіл. Порушується терморегуляція, газообмін, обмін речовин, діяльність нервової, ендокринної, імунної систем. Наприклад, при температурному стресі у бджіл змінюється активність метаболічних ферментів, швидкість циркуляції гемолімфи, інтенсивність дихання (Куртяк, 2024; Yang et al., 2017).

На популяційному рівні стрес призводить до зміни демографічної структури бджолоїної сім'ї, скорочення тривалості життя окремих особин, зменшення плодючості маток, зниження продуктивності та резистентності до захворювань. Наприклад, при дії пестицидів у бджолоїній сім'ї зростає смертність льотних бджіл, зменшується кількість розплоду, порушується процес зміни поколінь (Локутова та ін., 2021; Bilalov et al., 2015).

Серед стресових факторів, які впливають на організм бджіл, особливу увагу дослідників привертають температурний стрес та вуглеводне навантаження, оскільки вони є найбільш поширеними та значущими в умовах сучасного бджільництва.

Медоносні бджоли є пойкилотермними комахами, тобто температура їхнього тіла залежить від температури навколишнього середовища. Однак, на відміну від інших комах, бджоли здатні підтримувати відносно постійну температуру всередині вулика шляхом колективної терморегуляції. Оптимальна температура у гнізді бджіл становить 34-35°C у зоні розплоду та 25-27°C у зоні запасів корму (Куртяк, 2024; Поліщук, 2001).

При підвищенні температури навколишнього середовища бджоли активують механізми охолодження вулика: розосередження по стінках вулика, вентилявання крилами, випаровування води з принесеного нектару, розбризкування краплин води. При зниженні температури бджоли утворюють

клуб, зменшуючи площу тепловіддачі, та генерують тепло шляхом скорочення грудних м'язів (Куртяк, 2024; Yang et al., 2017).

Температурний стрес виникає, коли температура навколишнього середовища виходить за межі фізіологічної норми для бджіл. Високотемпературний стрес (гіпертермія) виникає при температурі вище 40°C, низькотемпературний стрес (гіпотермія) – при температурі нижче 10°C (Yang et al., 2017).

При високотемпературному стресі у бджіл спостерігаються наступні фізіологічні зміни:

1. Порухення водного балансу організму внаслідок підвищеного випаровування вологи.
2. Зниження концентрації глюкози в гемолімфі внаслідок підвищення енергетичних витрат на охолодження.
3. Підвищення активності антиоксидантних ферментів (каталази, супероксиддисмутази) у відповідь на окисний стрес.
4. Збільшення концентрації білків теплового шоку в гемолімфі, які захищають клітинні білки від денатурації.
5. Зміна гормонального статусу, зокрема підвищення рівня ювенільного гормону, який регулює терморегуляторну поведінку бджіл.

При низькотемпературному стресі у бджіл спостерігаються наступні фізіологічні зміни:

1. Зниження рухової активності внаслідок погіршення провідності нервових волокон та скоротливої здатності м'язів.
2. Підвищення концентрації кріопротекторів (гліцерин, трегалоза) в гемолімфі, які захищають клітини від замерзання.
3. Зміна метаболізму вуглеводів, зокрема перехід від використання глюкози до використання глікогену та жирів як джерел енергії.
4. Зниження активності ферментів, що каталізують реакції енергетичного обміну, внаслідок чого знижується інтенсивність обміну речовин.

5. Зміна складу фосфоліпідів клітинних мембран, що забезпечує підтримання їх плинності при низьких температурах.

Вуглеводи є основним джерелом енергії для бджіл, забезпечуючи їхню фізичну активність, терморегуляцію, синтез жирів та глікогену. У природних умовах бджоли отримують вуглеводи з нектару та медяної роси, які містять глюкозу, фруктозу, сахарозу та інші моно-, ди- та полісахариди (Поліщук, 2001; Bogdanov et al., 2008).

В умовах промислового бджільництва та при несприятливих погодних умовах, які обмежують збір нектару, бджолам часто згодовують цукровий сироп або інші вуглеводні корми (інвертований цукор, крохмальну патоку, високофруктозний кукурудзяний сироп тощо). Надмірне споживання таких кормів створює вуглеводне навантаження на організм бджіл, яке може спричинити ряд фізіологічних змін (Поліщук, 2001; Bogdanov et al., 2008).

Вуглеводне навантаження – це стан, коли кількість спожитих вуглеводів перевищує фізіологічні потреби організму, що призводить до перенапруження механізмів їх засвоєння, транспорту та утилізації. Вуглеводне навантаження може бути кількісним (надмірна кількість вуглеводів) або якісним (невідповідність складу вуглеводів фізіологічним потребам) (Поліщук, 2001; Bogdanov et al., 2008).

При вуглеводному навантаженні у бджіл спостерігаються наступні фізіологічні зміни:

1. Підвищення концентрації глюкози та фруктози в гемолімфі, що може призводити до гіперглікемії та осмотичного стресу.
2. Зміна активності ферментів вуглеводного обміну (інвертази, амілази, мальтази), що може порушувати процеси перетравлення та засвоєння вуглеводів.
3. Підвищення інтенсивності синтезу глікогену та жирів у жировому тілі, що може призводити до його гіпертрофії та порушення функцій.

4. Зміна мікрофлори кишечника, зокрема збільшення кількості дріжджів та зменшення кількості молочнокислих бактерій, що може порушувати процеси травлення та імунітет.
5. Підвищення метаболічної активності та теплопродукції, що може призводити до перегрівання організму та підвищення витрат енергії.

Особливу увагу дослідників привертає вивчення впливу вуглеводного навантаження на активність ферментів, які містять мікроелементи у своєму складі. Дослідження показали, що при тривалому споживанні цукрового сиропу у бджіл знижується активність каталази – ферменту, який містить залізо у своєму активному центрі та забезпечує захист клітин від пошкоджувальної дії пероксиду водню (Будник & Волощук, 2021). Зниження активності каталази може бути пов'язане зі зміною концентрації заліза в гемолімфі або з конформаційними змінами білкової частини ферменту під впливом підвищеної концентрації глюкози.

Для зниження негативного впливу вуглеводного навантаження на організм бджіл використовують різноманітні підходи:

1. Технологічні заходи – обмеження кількості згодовуваного цукрового сиропу, поступове згодовування малими порціями, застосування менш концентрованих розчинів, забезпечення бджіл природним кормом (медом) (Поліщук, 2001).
2. Кормові добавки – застосування ензимів (інвертаза, амілаза), органічних кислот (лимонна, яблучна), пробіотиків (лактобактерії, біфідобактерії), мікроелементів (Fe, Ca, Mg, P) (Поліщук, 2001; Sebotari et al., 2015).

Особливий інтерес представляє застосування цитратів мікроелементів для зниження негативного впливу вуглеводного навантаження на організм бджіл. Дослідження Федорука та співавторів (2021) показали, що застосування цитратів Fe, Ca, Mg, Zn у годівлі бджіл сприяє нормалізації вуглеводного обміну, підвищенню активності ферментів, які беруть участь у

метаболізмі вуглеводів, покращенню засвоєння цукрового сиропу та його перетворення на мед.

Таким чином, стресові фактори суттєво впливають на фізіологічний стан бджіл, змінюючи метаболізм мікроелементів та активність ферментів, які містять мікроелементи у своєму складі. Вивчення механізмів впливу стресових факторів на організм бджіл та розробка методів підвищення їх резистентності є актуальним завданням сучасного бджільництва та фізіології комах.

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження були робочі бджоли (*Apis mellifera* L), що утримувалися на навчально-дослідній пасіці навчавльно-наукового інституту біології, хімії та біоресурсів Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Рамку з запечатаним розплодом літньої генерації транспортували в лабораторію та утримували в термостаті при +34 °C та відносній вологості 80 % до початку виходу імаго з комірок (рис. 2.1.1).



Рисунок 2.1.1. Стільник з запечатаним розплодом в однорамочному ізоляторі.

2.2. Умови проведення експерименту

Експериментальна частина включала чотири групи:

1. Контрольна група – бджоли, що утримувалися при температурі +28 °C на суміші моноцукрів.
2. Температурний стрес – утримання бджіл при +14 °C.

1. Харчовий стресс - утримання бджіл на незбалансованій вуглеводній дієті.
2. Комбінований стрес – поєднання температурного та харчового стресу.

Одно-дводенних бджіл з рамки відбирали у бокси-годівнички (приблизно 200 бджіл) та утримували в термостаті (+28°C, 70% відносній вологості) (рис. 2.1.3).

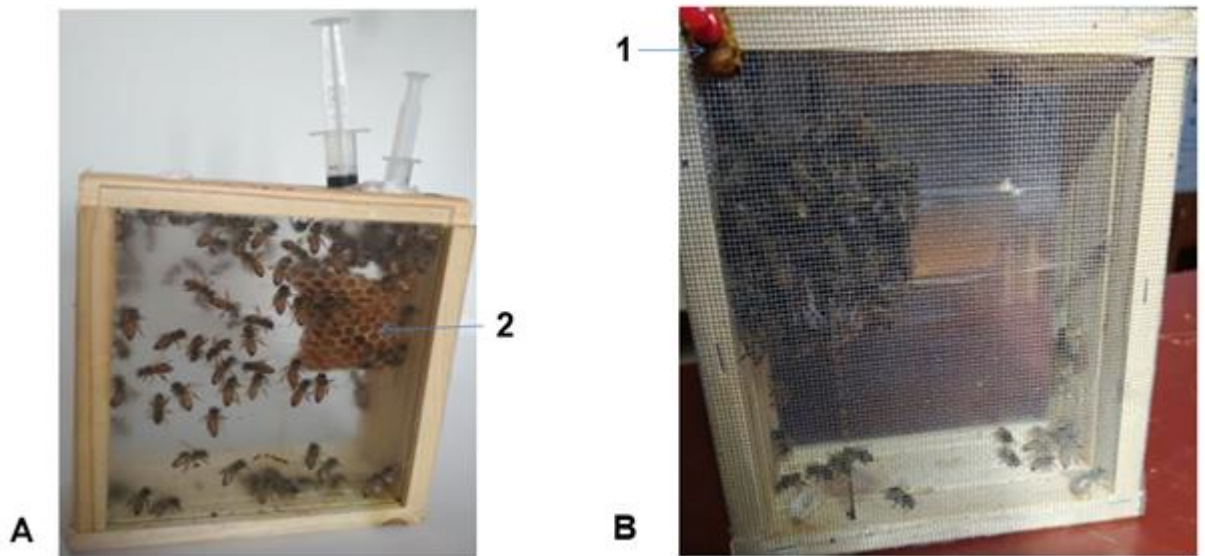


Рисунок. 2.1.3. Бокси годівнички з одно-дводенними бджолами. А – передня стінка, В – задня стінка з маточником (1); фрагмент стільника в клітці (2).

З метою адаптації до умов утримання комахи протягом 4-х днів споживали водний розчин вуглеводів, що містив 25% глюкозу та 25% фруктозу (1:1).

Потім комах переводили на різні вуглеводні дієти: 1) 25% глюкоза + 25% фруктоза (контроль), 2) 50 % сахароза), 3) 50% фруктоза, 4) 50% глюкоза. Адаптаційний та кожен експериментальний розчин вуглеводів містив 1% розчин суміші амінокислот (ізолейцин, лейцин, лізин, метіонін, цистеїн, фенілаланін, треонін, триптофан, валін, аргінін, гістидин, гліцин, аланін, пролін, серин) для збалансованості дієти за азотовмісними компонентами. Доступ комах до їжі був необмежений.

Починаючи з 10-го дня досліду половину бджіл піддавали дії температурного (+14 °C) стресу протягом 6 днів, а іншу залишали при 28 °C.

2.3. Методи відбору та підготовки зразків гемолімфи

Відбір гемолімфи бджіл проводили за методом (Borsuk et al., 2017) на 16-й день досліду.

Для відбору гемолімфи використовуються наступні обладнання: прямокутна пластина з пінополістиролу для утримання комах, пінцет, автоматична піпетка, марлеві серветки, крижана ванна для охолодження та пробірки типу Eppendorf (0,2 мл).

Клітки з комахами, перед відбором гемолімфи, поміщали в холодильну камеру за +4°C на 30 хв для знерухомилення бджіл.

Після охолодження бджолу брали пінцетом та переносили на край пінополістиролової пластини, обережно притиснувши її грудну клітку вказівним пальцем в положення, яке не дозволяло бджолі вжалити пальці дослідника. Енергійним рухом відривають пінцетом цілу антену. Далі вказівним пальцем натискають на бджолу від черевця до грудей, збільшуючи тиск гемолімфи, що призводить до появи чистої краплі гемолімфи.

Відбирали по 2 мкл з кожної бджоли отриману краплю переносили автоматичною піпеткою (до 10 мкл) (рис. 2.2.1. В) в епандорф, який знаходився на крижаній бані (2–4°C).

Попередньо в епандорф додавали фенілтіосечовину, у співвідношенні 1 : 4 (фенілтіосечовина : гемолімфа), щоб запобігти меланізації.

Гемолімфа використовувалась для визначення певних біохімічних показників. Для цього ми готували об'єднаний зразок гемолімфи, отриманий з 20 бджіл по 2 мкл з кожної.

Пробу центрифугували 5 хв при 1200 g для осадження клітин гемолімфи, отриманий супенатант переносили у інший епендорф та заморожували при -80 °C для подальших досліджень.

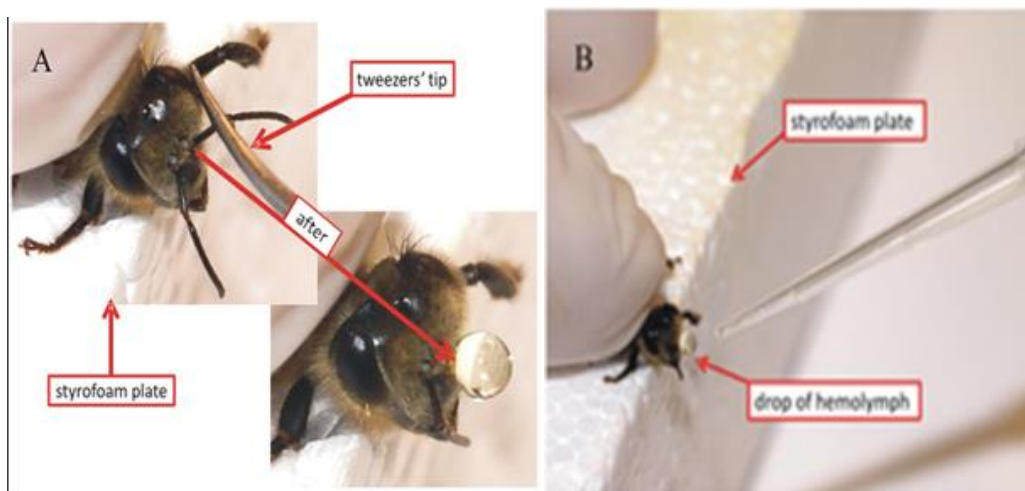


Рис 2.2.1. Метод відбору гемолімфи. (А) Спосіб від'єднання антени та утворення краплі гемолімфи у робочої бджоли, (В) відбір гемолімфи в піпетку.

Визначення вмісту фосфору. Неорганічний фосфат утворює з молібденовою кислотою у сильно кислих умовах фосфомолібденовий комплекс, що відновлюється у присутності аскорбінової кислоти (II) до фосфомолібденової сині. Білки, які осаджуються кислотами, заважають проведенню фотометричного визначення, а отже і уніфікації унітарної методики. Оптична щільність пропорційна концентрації неорганічного фосфору в пробі. Усі рідини вносяться у вказаному порядку.

1. Перемішати вміст кожної пробірки.
2. Витримати 15 хвилин при температурі 20–25°C.
3. Провести фотометрію:
 - Виміряти оптичну щільність дослідної проби та калібрувальної.
 - Холоста проба використовується для обнулення приладу.

Розрахунок концентрації фосфору:

Концентрацію фосфору в дослідній пробі (мг/л) розраховують за формулою:

$$\text{Едосл} \times 1,615 \div \text{Екалібр}$$

де:

- Едосл — оптична щільність дослідної проби,
- Екалібр — оптична щільність калібрувальної проби,
- 1,615 — коефіцієнт, що відповідає вмісту фосфору у калібрувальній пробі (0,20 мг/л).

Порядок виконання:

1. Внести в пробірки компоненти згідно таблиці:

Компонент	Дослідна проба	Калібрувальна проба	Холоста проба
Сироватка крові	0,05 мл	—	—
Дистильована вода	0,05 мл	—	0,10 мл
Калібрувальний розчин	—	0,05 мл	—
Набірний реагент	2,00 мл	2,00 мл	2,00 мл

Визначення вмісту заліза

Вміст заліза вимірювали на фотоколориметрі (довжина хвилі 562 нм, кювети з товщиною шару 5 мм або 10 мм).

1. Відбір проб:
- приготувати калібрувальні проби 1 і 2;
 - підготувати холосту пробу

2. Внести в пробірки компоненти у такій послідовності поданій в таблиці:

Компонент	Дослідна проба	Калібрувальна проба 1	Калібрувальна проба 2	Холоста проба
Буферний розчин	1,00мл	1,00мл	1,00мл	1,00мл
Сировата крові	1,00 мл	-	-	-
Калібр. розчин заліза	-	1,00 мл	2,00 мл	-
Деіонізована вода	-	1,00 мл	-	2,00 мл
Колорореагент (ферозин)	1,00 мл	1,00 мл	1,00 мл	1,00 мл

3. Перемішати вміст пробірок.

Інкубувати 10 хв при температурі (20–25)°С;

Виміряти оптичну щільність дослідної проби (Е_{досл}), калібрувальних проб (Е_{кал1} і Е_{кал2}) та холостої проби (Е_{хол}) на фотоколориметрі при довжині хвилі 562 нм.

Розрахунок:

Обчислити концентрацію заліза у сироватці за формулою:

$$C_{\text{заліза}} = ((E_{\text{досл}} - E_{\text{хол}}) / (E_{\text{кал}} - E_{\text{хол}})) \times 20 \text{ (мкмоль/л або мкг/мл)}$$

де:

- $C_{\text{заліза}}$ — концентрація заліза у сироватці;
- $E_{\text{досл}}$ — оптична щільність дослідної проби;
- $E_{\text{хол}}$ — оптична щільність холостої проби;
- $E_{\text{кал}}$ — середнє значення оптичної щільності калібрувальних проб;
- 20 — вміст заліза у калібрувальному розчині (мкмоль/л або мкг/мл).

Визначення загального кальцію.

Визначення проводиться за 2-точковим калібруванням, використовуючи колориметричний метод (довжина хвилі 570 нм) з урахуванням холостої проби.

Принцип методу

Іони кальцію в лужному середовищі реагують з о-крезолфталеїн комплексом і утворюють кольоровий комплекс. Інтенсивність забарвлення комплексу фіолетового кольору пропорційна концентрації кальцію в дослідній пробі.

Реагенти

1. Хромоген

- о-крезолфталейн комплексон - $(0,12 \pm 0,01)$ ммоль/л

- 8-оксихінолін - $(16,00 \pm 0,16)$ ммоль/л

2. Буфер

- моноетаноламін - $(0,80 \pm 0,08)$ моль/л

3. Калібрувальний розчин кальцію $(2,50 \pm 0,05)$ ммоль/л

Обладнання

- Фотоелектроколориметр або спектрофотометр з довжиною хвилі 570 нм

- Кювети з товщиною шару 5 або 10 мм

- Піпетки на 0.02 мл та 1.0 мл

- Термостат або водяна баня з температурою 20–25°C

Проведення аналізу

Компонент	Холоста проба	Калібр. проба № 1	Калібр. проба № 2	Дослідна проба
Хромоген	1.0 мл	1.0 мл	1.0 мл	1.0 мл
Деіонізована вода	0.02 мл	—	—	—
Калібр. розчин №1	—	0.02 мл	—	—
Калібр. розчин №2	—	—	0.02 мл	—
Біологічний матеріал	—	—	—	0.02 мл

- Змішати, інкубувати 10 хв при температурі 20–25°C

- Виміряти оптичну щільність усіх проб при 570 нм

Розрахунок результатів

Розрахувати концентрацію кальцію у зразку за формулою:

$$C_{\text{кальцію}} = ((E_{\text{досл}} - E_{\text{хол}}) / (E_{\text{кал2}} - E_{\text{хол}})) \times 2.5$$

де:

- $C_{\text{кальцію}}$ — концентрація кальцію в зразку (ммоль/л)

- $E_{\text{досл}}$ — оптична щільність дослідної проби
- $E_{\text{хол}}$ — оптична щільність холостої проби
- $E_{\text{кал2}}$ — оптична щільність калібрувальної проби №2 (2.5 ммоль/л)

Визначення магнію.

Принцип методу базується на тому, що магній утворює пурпурний забарвлений комплекс, коли вступає в реакцію з магон сульфонатом в лужному середовищі. Інтенсивність кольору пропорційна концентрації магнію в зразку

Реагенти

1. Реагент 1. Барвник: ксиліділовий блакитний - 0.1 mmol/l (ммоль/л);
2. тіогліколева кислота - 0.7 mmol/l (ммоль/л);
3. ДМСО - 3000 mmol/l (ммоль/л).
4. Стандарт. Водний розчин магнію - 0.824 mmol/l (ммоль/л).

Обладнання:

- Фотоелектроколориметр або спектрофотометр
- Довжина хвилі: 546 нм
- Кювети товщиною 10 мм
- Водяна баня або термостат (температура 37°C)

Компонент	Холоста проба	Стандарт	Дослідна проба
Реагент 1. (мл)	1.0	1.0	1.0
Стандарт(мкл)	—	10	—
Дослідна проба	—	—	10

1. У пробірки додають реагент і зразки згідно таблиці.
2. Інкують при 37°C протягом 3 хв.
3. Вимірюють оптичну щільність при 546 нм.

Розрахунок результатів

$$C_{\text{магнію}} = ((E_{\text{досл}} - E_{\text{хол}}) / (E_{\text{ст}} - E_{\text{хол}})) \times C_{\text{ст}}$$

де:

- $C_{\text{магнію}}$ — концентрація магнію у зразку (ммоль/л)
- $E_{\text{досл}}$ — оптична щільність дослідної проби
- $E_{\text{хол}}$ — оптична щільність холостої проби
- $E_{\text{ст}}$ — оптична щільність стандарту
- $C_{\text{ст}}$ — концентрація стандарту, зазвичай 1.0 ммоль/л

Усі аналізи виконували у трьох повтореннях.

Статистичний аналіз здійснювався за непараметричним U- критерієм Манна Уїтні.

Для всіх аналізів приймали рівень значущості $p < 0,05$, що дозволяло вважати отримані результати достовірними.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1. Вміст біоелементів у гемолімфі бджіл за нормальних умов

На початковому етапі дослідження було проаналізовано вміст біоелементів заліза (Fe), кальцію (Ca), магнію (Mg) та фосфору (P) у гемолімфі бджіл, які утримувалися при фізіологічно оптимальних умовах — температурі +28 °C, відносній вологості 70 %, та стандартному харчуванні сумішшю моноцукрів (25% глюкоза + 25% фруктоза).

Результати показали, що у таких умовах концентрації досліджуваних мікроелементів перебували в межах, характерних для здорових бджіл. Значення медіани та нижнього і верхнього квартилей були наступними:

- Fe — 16,15 [15,01;17,28] ммоль/л
- Ca — 4,16 [3,87; 4,46] ммоль/л
- Mg — 3,74 [3,47; 4,0] ммоль/л
- P – 5,78 [5,37; 6,18] ммоль/л

Ці показники свідчать про стабільний обмін речовин та нормальну фізіологічну активність бджіл. Магній, як відомо, є ключовим кофактором багатьох ферментативних процесів, особливо в енергетичному метаболізмі. Кальцій бере участь у скоротливості м'язів, передачі нервових імпульсів та формуванні кутикули. Залізо — компонент гемоціаніну, а фосфор — важливий елемент енергетичного обміну (у складі АТФ). Дослідження вмісту мікроелементів у гемолімфі бджіл за нормальних умов утримання (контрольна група) дозволило встановити фонові рівні Fe, Ca, Mg, P, які використовувалися як референтні значення для порівняння з дослідними групами, що піддавалися дії стресових факторів.

Аналіз вмісту заліза (Fe) у гемолімфі бджіл, які утримувалися при оптимальній температурі +28 °C, показав, що характер вуглеводного живлення суттєво впливає на концентрацію цього мікроелемента (рис.3.1.1.).

На рисунку 3.1.1. представлено вміст біоелементів в гемолімфі робочих бджіл 16 денного віку, залежно від вуглеводного складу дієти.

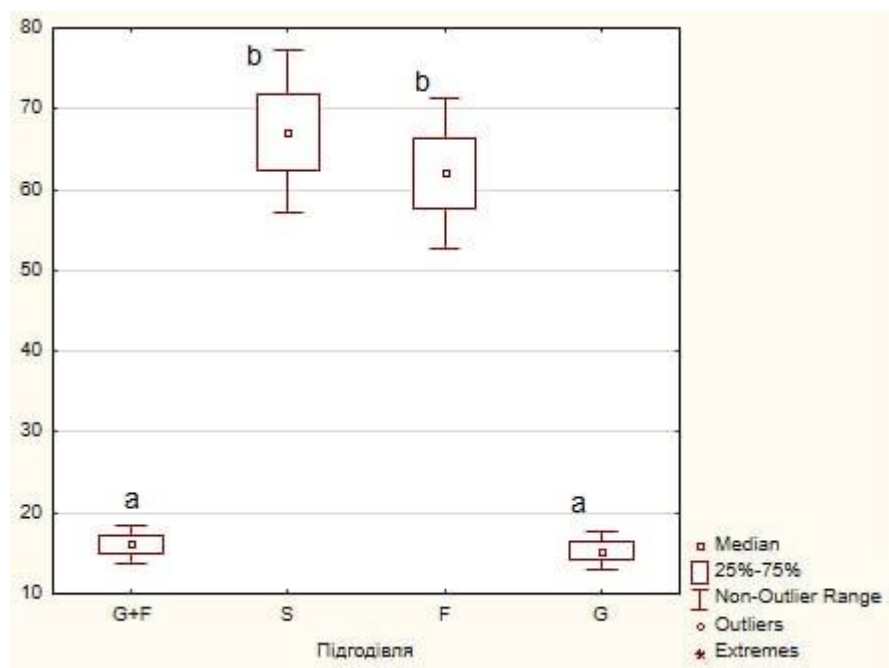


Рис.3.1.1. Вміст заліза (ммоль/л) у гемолімфі бджіл за різних типів вуглеводного живлення бджіл при температурі +28 °C

Примітка: G+F-глюкоза+фруктоза; S-сахароза; F-фруктоза; G-глюкоза. Статистично значуща різниця позначена різними літерами.

Найвищий вміст Fe зафіксовано у груп бджіл, які споживали 50% фруктозу та 50% сахарозу. У цих групах концентрація заліза вірогідно перевищувала аналогічні показники бджіл, які споживали суміш глюкози і фруктози (25%+25%) або 50% глюкозу.

Це може свідчити про більшу активність метаболічних процесів за умов споживання сахарози та фруктози окремо, що може бути пов'язано із специфікою перетворення цих цукрів у тканинах та змінами в транспорті іонів заліза. Натомість у групі з глюкозним живленням спостерігався найнижчий рівень Fe, що може свідчити про нижчий рівень метаболічного навантаження або інші механізми регуляції залізовмісних.

Згідно з результатами дослідження, тип вуглеводної дієти істотно впливає на концентрацію кальцію (Ca) у гемолімфі бджіл. Найвищий вміст

кальцію було зафіксовано у групі бджіл, які споживали 50% сахарозу (рис.3.1..2). Дещо нижчий, але також підвищений рівень Са спостерігався у бджіл, які отримували суміш сахарози та фруктози (по 25%) (рис.3.1.2). У групах, де бджоли споживали 50% фруктозу або 50% глюкозу, рівень кальцію був істотно нижчим (рис.3.1.2.), що свідчить про менш сприятливий вплив цих моноцукрів на мінеральний обмін, зокрема на регуляцію кальцієвого балансу.

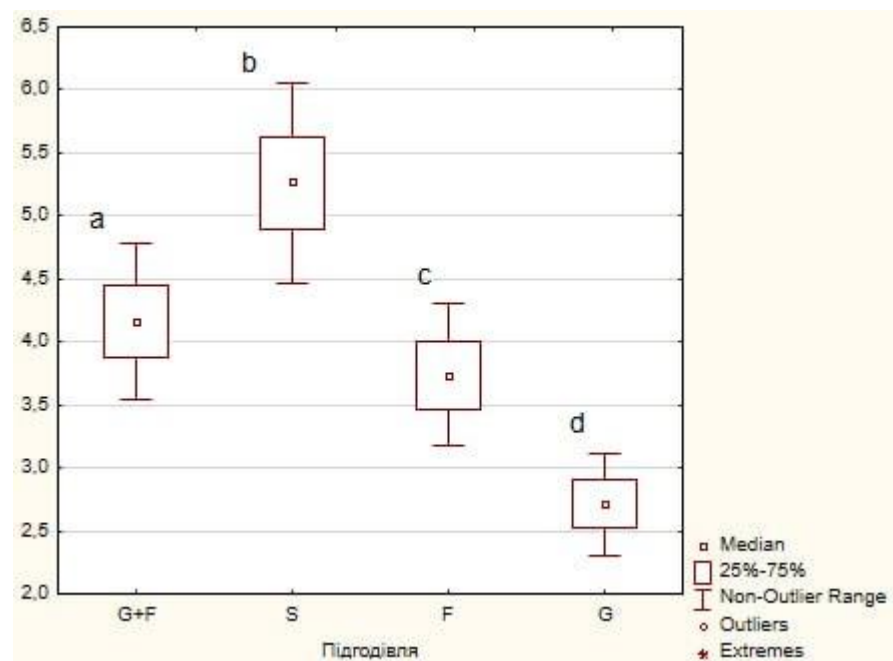


Рис.3.1..2. Вміст кальцію (ммоль/л) у гемолімфі бджіл за різних типів вуглеводного живлення комах при температурі +28 °С

Примітка: G+F-глюкоза+фруктоза; S-сахароза; F-фруктоза; G-глюкоза. Статистично значуща різниця позначена різними літерами.

У групах, де бджоли споживали 50% фруктозу або 50% глюкозу, рівень кальцію був істотно нижчим (рис.3.1.2.), що свідчить про менш сприятливий вплив цих моноцукрів на мінеральний обмін, зокрема на регуляцію кальцієвого балансу.

Отримані дані можуть вказувати на те, що сахароза як дисахарид стимулює обмінні процеси, пов'язані з мобілізацією кальцію або покращує

його засвоєння в організмі бджіл, що особливо важливо для нормального функціонування м'язової та нервової систем.

Дослідження показали, що вміст магнію (Mg) у гемолімфі бджіл суттєво залежав від типу вуглеводного живлення. У бджіл, які споживали фруктозу, сахарозу та їхню комбінацію (25% фруктози + 25% сахарози), рівень магнію залишався на стабільно високому рівні (рис.3.1.3.). Це свідчить про сприятливий вплив цих дієт на мінеральний обмін, зокрема на підтримання магнієвого балансу.

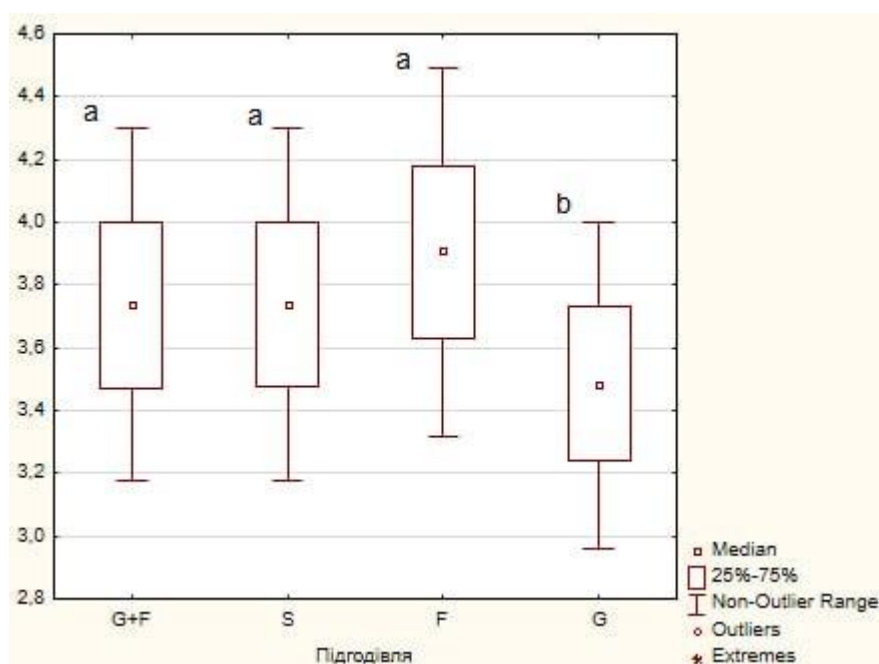


Рис..3.1.3.Вміст магнію (ммоль/л) у гемолімфі бджіл за різних типів вуглеводного живлення бджіл при температурі +28 °С

Примітка: G+F-глюкоза+фруктоза; S-сахароза; F-фруктоза; G-глюкоза. Статистично значуща різниця позначена різними літерами.

Натомість у групі, що отримувала 50% глюкозу, вміст магнію був найнижчим серед усіх експериментальних груп (рис.3.1.3.). Такий результат може бути пов'язаний із особливостями засвоєння глюкози бджолами або з меншим залученням цього вуглеводу у процеси, що потребують магній-залежних ферментів.

З огляду на ключову роль магнію в енергетичному метаболізмі, а також у стабілізації структури рибосом і мембран, ці результати свідчать про більшу метаболічну активність бджіл при споживанні фруктози та сахарози, на відміну від глюкозної дієти.

Аналіз вмісту фосфору (P) у гемолімфі бджіл за різного вуглеводного навантаження виявив найбільш виражене зростання концентрації P у групі, яка споживала 50% глюкозу (рис.3.1.4). Це може свідчити про посилену інтенсивність енергетичного обміну, адже фосфор є основним структурним компонентом молекул АТФ, а також бере участь у синтезі нуклеотидів і фосфоліпідів.

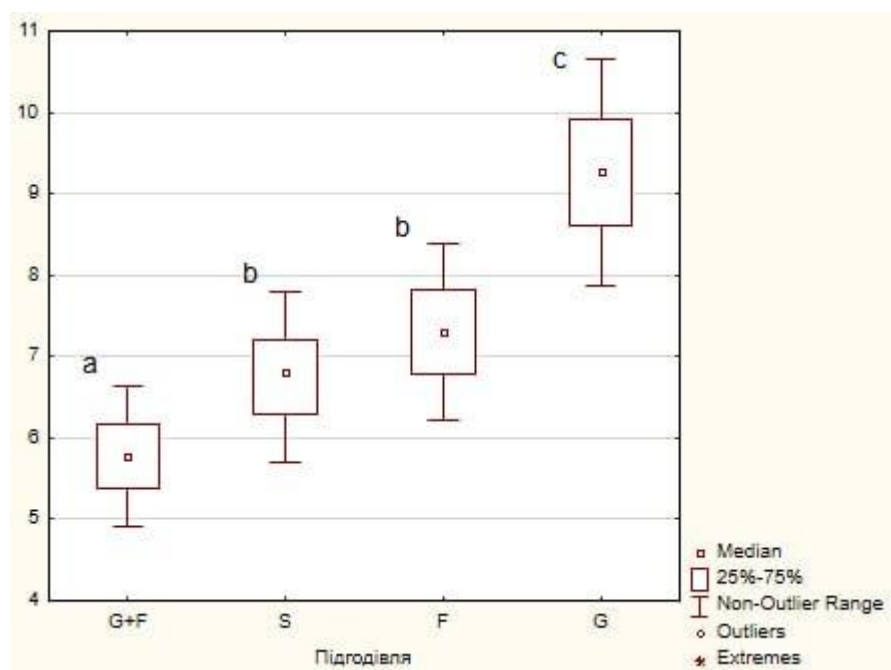


Рис.3.1.4. Вміст фосфору (ммоль/л) у гемолімфі бджіл за різних типів вуглеводного живлення при температурі +28 °C

Примітка: G+F-глюкоза+фруктоза; S-сахароза; F-фруктоза; G-глюкоза. Статистично значуща різниця позначена різними літерами.

Найнижчий рівень фосфору було виявлено у бджіл, які споживали комбіновану дієту з глюкози та фруктози (по 25%) (рис.3.1.4.), що, ймовірно, пов'язано з особливостями засвоєння такої суміші або з меншими

енергетичними витратами при її метаболізмі. У бджіл, які споживали фруктозу та сахарозу окремо, рівень Р був помірним і не мав значних відмінностей, залишаючись на середньому рівні порівняно з іншими дієтами (рис.3.1.4.) Ці результати вказують на те, що глюкоза сприяє більшій активності метаболічних процесів, пов'язаних із участю фосфору, тоді як комбіноване цукрове навантаження не стимулює фосфорний обмін на такому ж рівні.

3.2. Зміни вмісту біоелементів у гемолімфі бджіл за дії температурного стресу

Температурне навантаження є одним із ключових факторів, що впливають на гомеостаз комах. Після переведення бджіл у підгрупи з утриманням при зниженій температурі (+14 °C протягом 6 діб) було виявлено суттєві зрушення у вмісті біоелементів у гемолімфі.

За умов зниженого температурного режиму (+14 °C), який моделює помірний температурний стрес, спостерігались суттєві зміни у вмісті заліза (Fe) у гемолімфі бджіл залежно від типу вуглеводного живлення (рис.3.2.1.). Найвищий рівень Fe було зафіксовано у групі, яка споживала 50% глюкозу, що може свідчити про компенсаторну активацію метаболізму, зокрема процесів, пов'язаних з транспортом кисню та активністю залізовмісних ферментів. Натомість найнижчий вміст заліза виявлено у бджіл, які споживали 50% сахарозу (рис.3.2.1). Це може бути пов'язано з тим, що за умов охолодження сахароза не забезпечує достатній рівень енергетичної підтримки, необхідної для стабілізації залізовмісних білків (наприклад, феритину чи цитохромів).

Загалом, за умов температурного стресу глюкоза виявилася більш ефективним джерелом енергії для підтримки залізовмісного обміну порівняно з іншими джерелами вуглеводів.

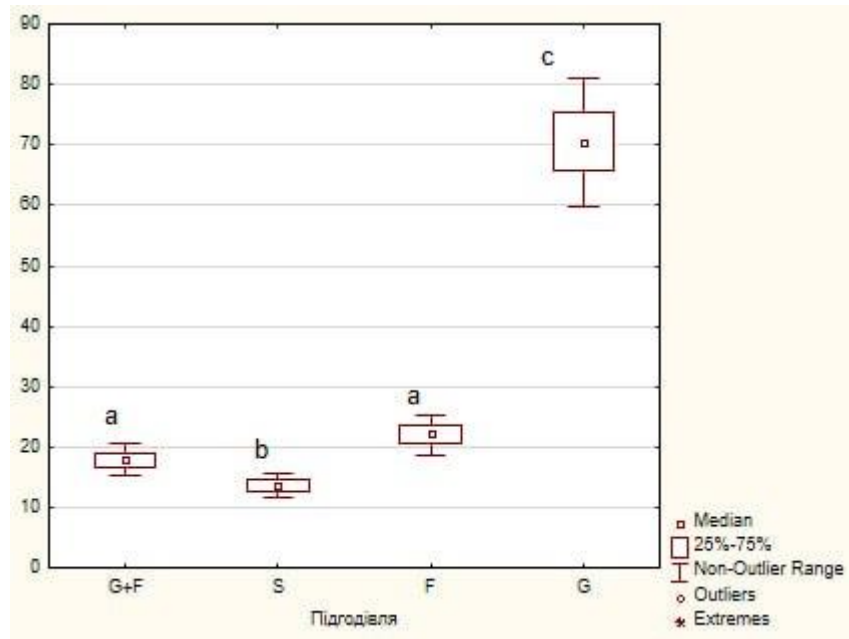


Рис.3.2.1.Вміст заліза (ммоль/л) у гемолімфі бджіл за різних типів вуглеводного живлення при температурному стресі (+14 °C)

Примітка: G+F-глюкоза+фруктоза; S-сахароза; F-фруктоза; G-глюкоза. Статистично значуща різниця позначена різними літерами.

За умов зниженої температури (+14 °C), яка імітує вплив температурного стресу, найвищий вміст кальцію (Ca) у гемолімфі спостерігався у бджіл, які отримували 50% сахарозу (рис.3.2.2). Це свідчить про те, що сахароза, як дисахарид, здатна ефективно підтримувати кальцієвий обмін навіть за умов зниженого метаболізму, характерного для охолоджених організмів.

Інші типи вуглеводного живлення (глюкоза, фруктоза, глюкоза+фруктоза) не сприяли такому накопиченню кальцію: рівень Ca у цих групах був помітно нижчим (рис.3.2.2.), що може свідчити про менш ефективне забезпечення або регуляцію кальцієвого гомеостазу за цих умов.

Підвищений рівень кальцію при споживанні сахарози в умовах температурного стресу може бути пов'язаний із її здатністю стабілізувати клітинні структури та підтримувати збудливість нервово-м'язових тканин.

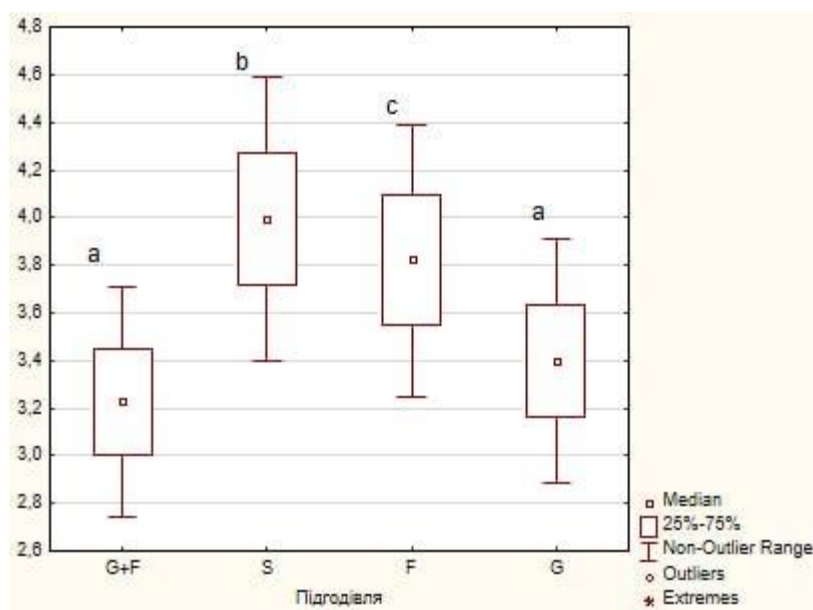


Рис.3.2.2.Вміст кальцію (ммоль/л) у гемолімфі бджіл за різного вуглеводного живлення бджіл при температурному стресі (+14 °C)

Примітка: G+F-глюкоза+фруктоза; S-сахароза; F-фруктоза; G-глюкоза. Статистично значуща різниця позначена різними літерами.

При температурі +14 °C вміст магнію (Mg) у гемолімфі бджіл значною мірою залежав від типу вуглеводного живлення (рис.3.2.3). Найвищі концентрації магнію були зафіксовані у бджіл, які споживали комбіновану дієту (25% глюкоза + 25% фруктоза), а також 50% фруктозу (рис.3.2.3.). Це свідчить про те, що саме ці джерела вуглеводів забезпечували найкращу підтримку магнієвого балансу за умов температурного стресу.

Магній є ключовим кофактором численних ферментів, зокрема тих, що беруть участь у процесах енергозабезпечення клітин. Отже, стабільно високий рівень Mg у групах з фруктозним та змішаним харчуванням може вказувати на активізацію адаптивних механізмів у відповідь на стресове охолодження.

В інших експериментальних групах, особливо за споживання сахарози та глюкози окремо, рівень магнію був нижчим (рис.3.2.3), що свідчить про обмежену ефективність цих дієт у підтримці магнієвого обміну в стресових умовах.

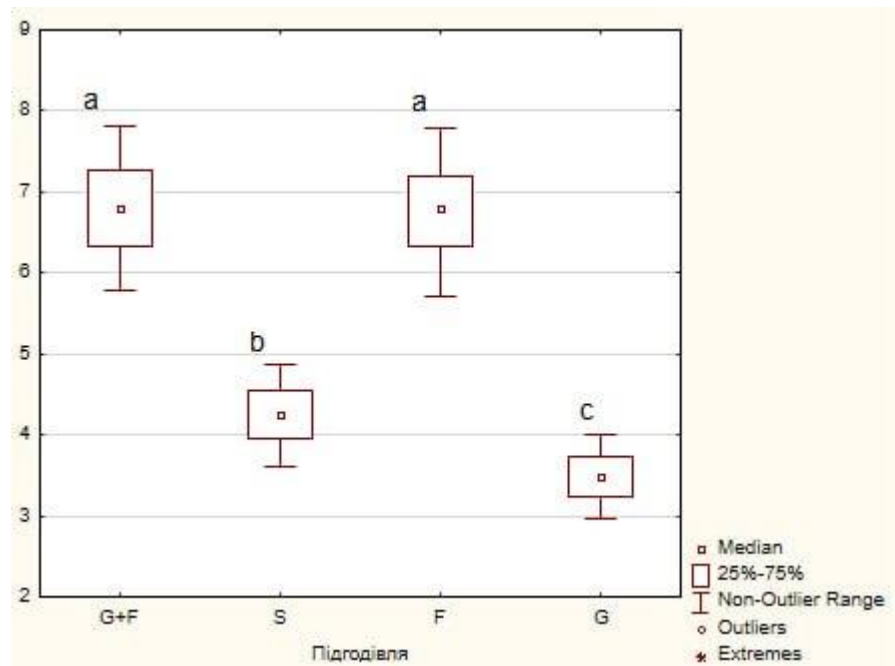


Рис.3.2.3. Вміст магнію (ммоль/л) у гемолімфі бджіл за різного вуглеводного живлення бджіл при температурному стресі (+14 °C)

Примітка: G+F-глюкоза+фруктоза; S-сахароза; F-фруктоза; G-глюкоза. Статистично значуща різниця позначена різними літерами

При зниженій температурі утримання (+14 °C) спостерігалися чіткі відмінності у вмісті фосфору (P) в гемолімфі бджіл залежно від характеру вуглеводного живлення. Найвищі концентрації фосфору були виявлені у групах, які отримували фруктозу (50%) та комбіновану дієту (25% глюкоза + 25% фруктоза) (рис.3.2.4.).

Це свідчить про позитивний вплив цих цукрів на фосфорний обмін за умов охолодження, що може бути пов'язано з активним використанням фосфорвмісних сполук (зокрема АТФ) для забезпечення клітинної адаптації до стресу.

Натомість найнижчий рівень фосфору зафіксовано у бджіл, які споживали сахарозу (рис.3.2.4.), що, ймовірно, свідчить про недостатнє енергозабезпечення клітин або гальмування фосфорного метаболізму за цього типу живлення в умовах температурного стресу.

Таким чином, результати дослідження вказують на те, що моноцукри, особливо фруктоза, краще підтримують фосфорний гомеостаз у бджіл при низьких температурах порівняно з дисахаридом сахарозою.

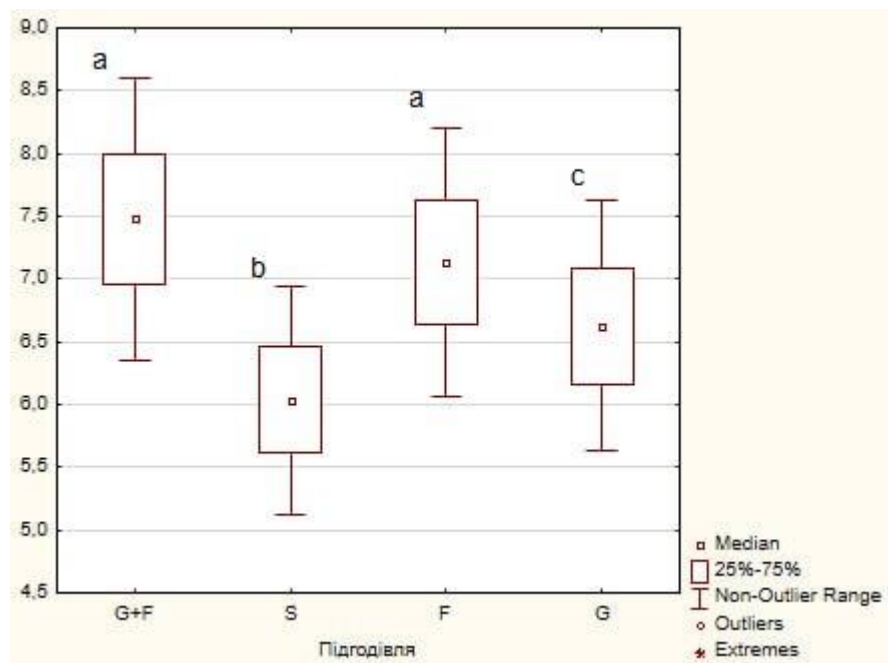


Рис.3.2.4. Вміст фосфору (ммоль/л) у гемолімфі бджіл за різного вуглеводного живлення бджіл при температурному стресі (+14 °C)

Примітка: G+F-глюкоза+фруктоза; S-сахароза; F-фруктоза; G-глюкоза. Статистично значуща різниця позначена різними літерами

Отримані результати можна пояснити з точки зору фізіології стресу та особливостей метаболізму мікроелементів у бджіл. Зниження вмісту мікроелементів у гемолімфі за умов гіпертермії може бути пов'язане з кількома факторами:

1. Підвищення інтенсивності метаболізму та посилене використання мікроелементів у складі ферментів, що беруть участь в адаптаційних реакціях організму на стрес.
2. Порушення процесів всмоктування мікроелементів у кишечнику внаслідок змін у функціонуванні травної системи при підвищеній температурі.

3. Перерозподіл мікроелементів між гемолімфою та тканинами, зокрема депонування в жировому тілі та інших органах.
4. Підвищене виведення мікроелементів з організму через мальпігіїв судини та ректальні залози внаслідок інтенсифікації процесів обміну речовин.
5. Підвищення вмісту мікроелементів у гемолімфі за умов гіпотермії може бути обумовлене наступними факторами:
6. Зниження інтенсивності метаболізму та зменшення використання мікроелементів у біохімічних реакціях.
7. Мобілізація мікроелементів з тканинних депо для забезпечення функціонування адаптаційних механізмів при низькій температурі.
8. Зменшення об'єму гемолімфи внаслідок втрати води, що призводить до відносного підвищення концентрації мікроелементів.
9. Зниження активності виділення мікроелементів через органи екскреції внаслідок загального уповільнення метаболічних процесів.

3.3. Вплив сумісної дії температури та складу дієти на вміст біоелементів у гемолімфі бджіл

Іншим ключовим чинником досліджу було варіювання вуглеводної дієти. Бджоли, які споживали різні типи цукрів (фруктоза, глюкоза, сахароза), демонстрували специфічні зміни у мінеральному складі гемолімфи.

Встановлено, що вміст заліза (Fe) у гемолімфі бджіл достовірно залежить як від температурного режиму, так і від типу вуглеводної підгодівлі (рис.3.3.1). За температури 28°C найвищі концентрації Fe спостерігалися у бджіл, які отримували сахарозу – значення медіани перевищувало 70 мг/л. За

цієї ж температури інші варіанти підгодівлі (глюкоза, фруктоза) призводили до нижчих рівнів Fe (20–25 мг/л), без статистично значущої різниці між ними (рис.3.3.1). Натомість при температурі 14°C значне підвищення вмісту Fe спостерігалось при споживанні фруктози та глюкози, де середні концентрації сягали 70–80 мг/л, що суттєво перевищувало аналогічні показники за вищої температури. Підгодівля сахарозою за 14°C, навпаки, асоціювалась із найнижчим вмістом Fe (~12–15 мг/л).

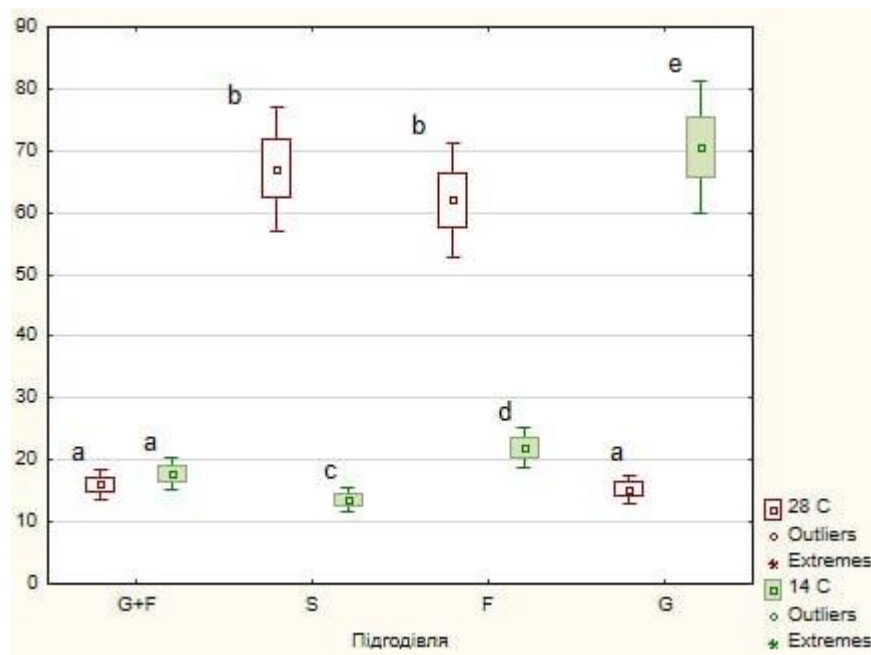


Рис.3.3.1.Вміст (ммоль/л) у гемолімфі бджіл за дії комбінованого стресу та різних типів підгодівлі (температури 14°C та 28°C)

Примітка: G+F-глюкоза+фруктоза; S-сахароза; F-фруктоза; G-глюкоза. Статистично значуща різниця позначена різними літерами.

Отже, утримання бджіл на сахарозній дієті ефективно підтримує рівень Fe при оптимальних температурах (28°C), натомість глюкоза та фруктоза сприяють акумуляції Fe при зниженій температурі (14°C). Різні типи цукрів мають специфічний температурно-залежний ефект на метаболізм заліза в організмі бджіл.

Аналіз впливу різних вуглеводних підгодівель за умов температурного стресу показав, що концентрація магнію (Mg) у гемолімфі бджіл змінюється

залежно як від типу цукру, так і від температури навколишнього середовища (рис.3.3.2). За температури 28°C максимальний вміст магнію спостерігався при споживанні глюкози (до 10 мг/л), що статистично достовірно перевищувало всі інші варіанти підгодовлі (рис.3.3.2). Значення при використанні фруктози, сахарози та комбінованої підгодовлі були помірними (7–8 мг/л), а мінімальні значення фіксувалися при поєднанні глюкози з фруктозою (~6 мг/л) (рис.3.3.2). За умов 14°C підвищення вмісту Mg спостерігалось при споживанні фруктози та G+F, де середні значення сягали 8 мг/л, що суттєво перевищувало рівень при підгодовлі сахарозою (~6 мг/л) (рис.3.3.2).

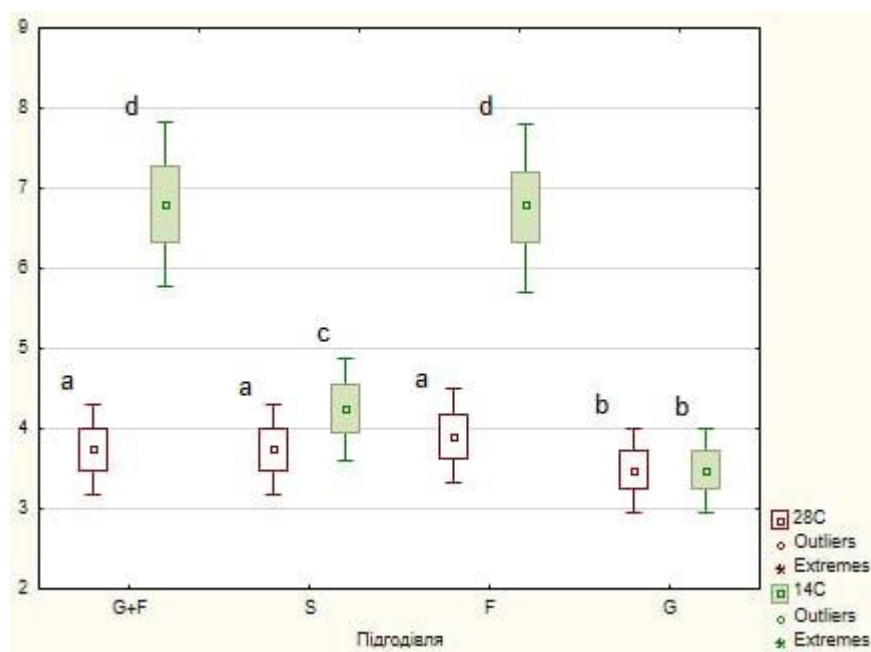


Рис.3.3.2.Вміст (ммоль/л) у гемолімфі бджіл за дії комбінованого стресу та різних типів підгодовлі (температури 14°C та 28°C)

Примітка:G+F-глюкоза+фруктоза; S-сахароза; F-фруктоза; G-глюкоза. Статистично значуща різниця позначена різними літерами.

Отже, Глюкоза при високій температурі (28°C) має стимулюючий ефект на концентрацію магнію, Фруктоза й комбінована підгодовля більш ефективні при зниженій температурі (14°C), Сахароза при будь-якій температурі дає найменший ефект щодо підтримання рівня Mg в гемолімфі комах.

Отримані дані свідчать, що рівень кальцію (Ca) у гемолімфі бджіл значною мірою залежав від поєднаної дії температурного режиму та типу вуглеводної дієти (рис.3.3.3). При температурі +28 °С найвищий рівень кальцію спостерігався у бджіл, які споживали 50% сахарозу (рис.3.3.3). Це свідчить про те, що сахароза є ефективним джерелом енергії для підтримки кальцієвого обміну в умовах нормальної температури. Порівняно високі рівні Са також були в групах із сумішшю глюкози та фруктози (G+F). Найнижчі значення вмісту кальцію спостерігалися у групі, яка споживала 50% глюкози (рис.3.3.3).

За температури +14 °С вміст кальцію загалом був нижчим у більшості дієт (рис.3.3.3). Проте найвищий рівень також спостерігався у групі, яка отримувала сахарозу (рис.3.3.3), що може свідчити про здатність цього вуглеводу підтримувати кальцієвий баланс навіть за умов охолодження.

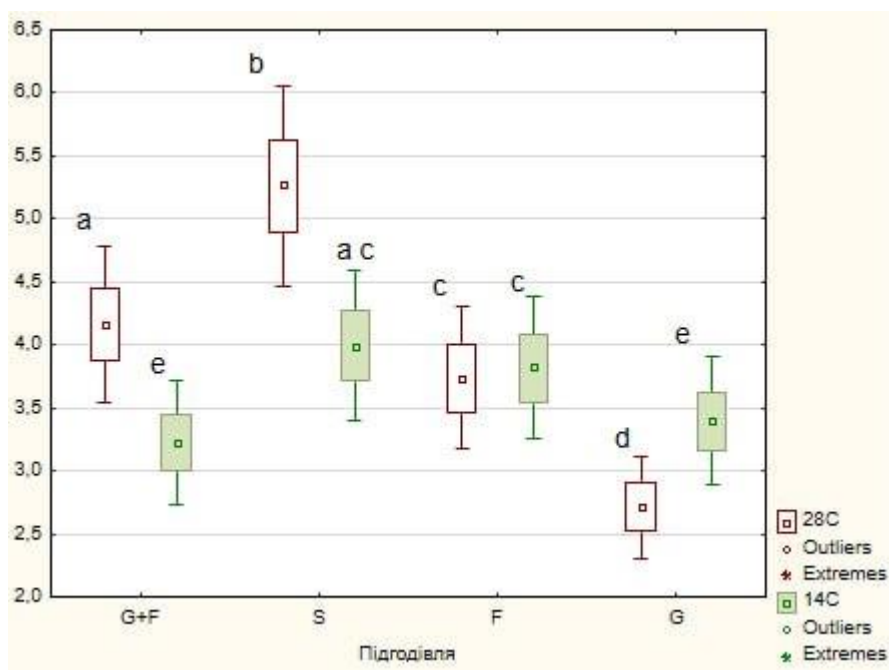


Рис.3.3.3. Вміст кальцію (ммоль/л) у гемолімфі бджіл за дії комбінованого стресу (температура + тип живлення)

Примітка: G+F-глюкоза+фруктоза; S-сахароза; F-фруктоза; G-глюкоза. Статистично значуща різниця позначена різними літерами.

Найнижчий рівень Са в цій температурній групі було виявлено при споживанні глюкози (рис.3.3.3), що свідчить про її обмежену здатність забезпечувати кальцієвий метаболізм у стресових умовах.

Статистично достовірні відмінності між експериментальними групами підтверджують суттєвий вплив як температури, так і типу вуглеводного живлення на вміст кальцію в гемолімфі ($p < 0,05$).

Аналіз даних показав, що концентрація фосфору (P) у гемолімфі бджіл значною мірою змінювалась залежно від умов температури утримання та типу вуглеводного живлення (рис.3.3.4.).

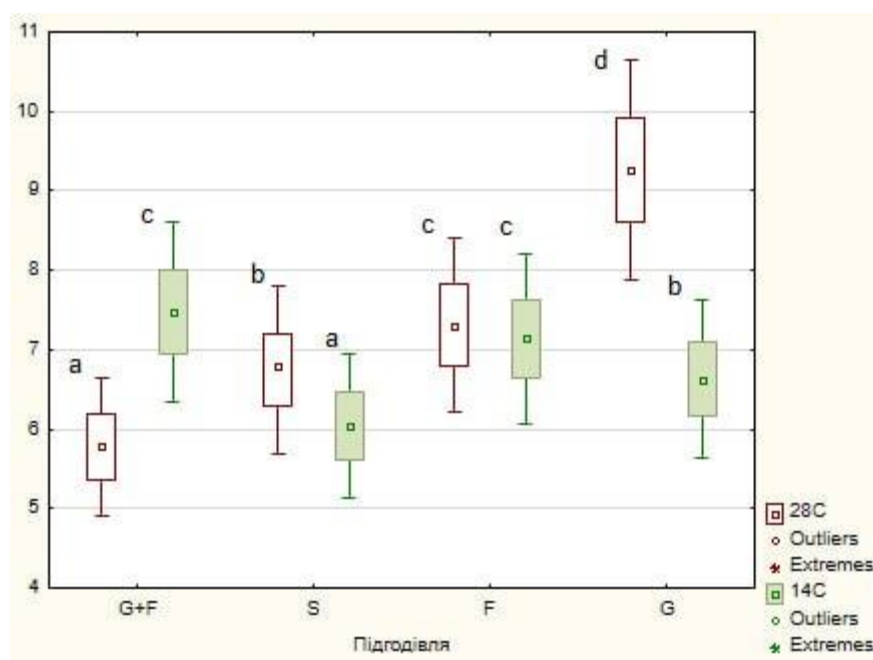


Рис.3.3.4. Вміст фосфору (ммоль/л) у гемолімфі бджіл за дії комбінованого температурного та харчового стресу

Примітка: G+F-глюкоза+фруктоза; S-сахароза; F-фруктоза; G-глюкоза. Статистично значуща різниця позначена різними літерами.

При температурі +28 °C найбільший вміст фосфору спостерігався у групі бджіл, які отримували 50% глюкози – значення були достовірно вищими за всі інші дієти (позначено літерою d) (рис.3.3.4), що свідчить про високу ефективність глюкози у підтриманні фосфорного обміну при нормальних умовах утримання. Помірні рівні P були у групах з фруктозою,

сахарозою, а також глюкозо-фруктозною сумішшю. Найнижчий рівень фосфору за цієї температури був зафіксований у групі G+F (глюкоза + фруктоза) (рис.3.3.4).

При температурі +14 °C вміст фосфору загалом був нижчим у всіх групах, що відповідає зниженій метаболічній активності в умовах холодового стресу. Водночас, найвищі рівні фосфору в цій температурній групі спостерігалися також у бджіл, які споживали фруктозу і глюкозу, тоді як найнижчі – у бджіл із дієтою G+F (рис.3.3.4).

Таким чином, глюкоза виявилася найефективнішим джерелом підтримки фосфорного обміну при температурі +28 °C, тоді як за охолодження найбільш сприятливими виявились фруктоза та глюкоза окремо.

Отже, у результаті проведених досліджень встановлено, що вміст основних біоелементів (Fe, Ca, Mg, P) у гемолімфі бджіл значною мірою залежить від зовнішніх умов, зокрема температурного режиму утримання та характеру вуглеводного живлення.

Загалом результати вказують, що моноцукри (фруктоза та глюкоза) мають кращу біодоступність та метаболічну адаптивність у стресових умовах, тоді як сахароза виявилася ефективнішою для підтримки кальцієвого балансу.

Отримані дані свідчать про важливу роль вуглеводного компоненту корму у підтримці мікроелементного балансу та адаптаційної здатності бджіл до температурних коливань. Це може бути враховано при розробці схем підгодівлі в умовах змін клімату або технологічного стресу

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що за оптимальних умов (температура +28 °С, відносна вологість 70%) найбільш збалансований рівень мікроелементів спостерігався у бджіл, які споживали змішану дієту (25% глюкози + 25% фруктози). Вміст Fe, Ca, Mg та P у цих бджіл перебував у фізіологічній нормі, що свідчить про ефективну підтримку мінерального гомеостазу.

2. Показано, що температурний стрес (зниження температури до +14 °С) спричиняв зниження концентрації більшості біоелементів у гемолімфі. Водночас, зберігалася дієтозалежна динаміка: Найвищий рівень Fe спостерігався у бджіл, що споживали глюкозу, кальцій досягав максимуму у групі із сахарозною дієтою, магній і фосфор найбільш ефективно підтримувалися при споживанні фруктози та її комбінації з глюкозою.

3. Виявлено, що комбінований стрес (поєднання температурного та харчового навантаження) ще виразніше проявив відмінності між типами дієт, зокрема, сахароза забезпечувала найвищий рівень Ca при обох температурах, фруктоза та суміш глюкоза+фруктоза сприяли збереженню стабільного рівня Mg та P за охолодження, вміст Fe при +14 °С був вищим у бджіл, які споживали глюкозу, а найнижчим — при сахарозній дієті.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Біджільництво України: стан, проблеми, шляхи розв'язання. (n.d.). *Національна академія аграрних наук України*. <http://naas.gov.ua/slide/bdzh-lnitstvo-ukra-ni-stan-problemi-shlyakhi-rozv-yazannya/>
2. Біджільництво: розвиток галузі через удосконалення технологій виробництва продуктів. (n.d.) *Agroportal*. <https://agroportal.ua/blogs/bdzhilnictvo-rozvitok-galuzi-cherez-udoskonalennya-tehnologiy-virobnictva-produktiv>
3. Богданов, Г. О., Поліщук, В. П., Рівіс, Н. Ф., & Локутова, О. А. (2003). Жирні кислоти пилку рослин та їх роль в метаболічних процесах і життєдіяльності бджіл. *Біологія тварин*, 2, 43–49.
4. Будник, О. В., & Волощук, І. В. (2021). Антиоксидантна система бджіл за дії стресових факторів. *Біологія тварин*, 23(2), 15–22.
5. Брюх, О. І., Синетар, Е. О., & Каплуненко, В. Г. (2015). Перспективи застосування наноаквахелатів металів. *Досягнення біології та медицини*, 2(26), 64–66.
6. Дработ, О. І., & Височанська, М. Я. (2023). Особливості розвитку галузі бджільництва в контексті світового досвіду. *Збалансоване природокористування*, 3, 52–58. <https://doi.org/10.33730/2310-4678.3.2023.287821>
7. Дружб'як, А. Й., & Кирилів, Я. І. (2013). Вплив мінеральних речовин на перебіг зимівлі бджіл. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С.З.Гжицького*, 15(3), 331–334.
8. Дружб'як, А. Й., & Кирилів, Я. І. (2013). Вплив якості кормових запасів на вміст мінеральних речовин у ректумі медоносних бджіл протягом зимівлі. *Науково-технічний бюлетень Інституту біології тварин і Державного науково-дослідного контрольного інституту ветпрепаратів та кормових добавок*, 14(1–2), 79–82.

9. Дружб'як, А. Й., Митронович, А. М., Ковальська, Л. М., & Ковальський, Ю. В. (2017). Пилковий аналіз вмістимого ректуму медоносних бджіл. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій С.З.Гжицького*, 19(79), 135–139.
10. Ковальська, Л. М., Кирилів, Я. І., & Ковальський, Ю. В. (2008). Дослідження ліпідного обміну в організмі медоносних бджіл під час зимівлі. *Науковий вісник Вінницького держ. аграрного університету*, 34(1), 150–155.
11. Коваль, О. В., & Бурко, К. В. (2022). Напрями удосконалення управлінського обліку в бджільництві. *Економіка, фінанси, менеджмент: актуальні питання науки і практики*, 1(59), 121–136.
12. Локутова, О. А., Адамчук, Л. О., & Романович, М. М. (2021). Вміст важких металів у гемолімфі бджіл та продуктах бджільництва залежно від екологічних умов. *Бджільництво України*, 7, 65–73.
13. Постоєнко, В., Сенчило, О., Сенчук, Н., Сенчук, Т., Адамчук, Л., Гречка, Г., & Ліпський, П. (2021). Сучасне бджільництво в Україні та світі: збірник матеріалів конференції. ННЦ „Інститут бджільництва ім. П. І. Прокоповича“.
14. Савчук Г.Г. (2024) Імунітет бджоли медоносної (*Apis Mellifera* L.) У Р.А Волков І.І. Панчук (Ред.), *Бджола медоносна* (с. 136-164) Чернівець. нац. ун-т ім. Ю.Федьковича .
15. Скрипка, Г. А., Супрун, Ю. О., & Міхно, А. С. (2021). Вплив мікроелементів на метаболічні процеси організму медоносної бджоли. *Бджільництво України*, 6, 103–111.
16. Федорук, Р. С., Ковальчук, І. І., & Романів, Л. І. (2021). Вплив цитратів мікроелементів на склад мінеральних речовин в організмі медоносних бджіл. *Біологія тварин*, 23(3), 44–49.
17. Галатюк, О. Є., Романишина, Т. О., & Застулка, М. В. (2024). *Інновації у бджільництві щодо профілактики хвороб* [Наукова монографія].

18. Жулай, В. В. (2000). Особливості білково-мінерального складу меду та біохімічне обґрунтування комплексної кормової добавки [Автореф. дис.]. Нац. аграр. ун-т. Київ 2000. 22с.
19. Жук А.В. Зароченцева О.Д. Тимочко Л.І. Филипчук Т.В. Федоряк М.М. (2024). Моніторинг зимових втрат бджолиних колоній в Україні. У Р.А. Волков І.І. Панчук (Ред.), *Бджола медоносна* (с.165-200.). Чернівець. нац. ун-т ім. Ю.Федьковича.
20. Язловицька Л.С. & Панчук І.І. (2024). Живлення медоносних бджіл. У Р.А. Волков І.І. Панчук (Ред.), *Бджола медоносна* (с. 88-135.) Чернівець. нац. ун-т ім. Ю.Федьковича .
21. Alvarez - Suarez, J. M. (2017). Bee Products—Chemical and Biological Properties. *Springer International Publishing*. 306.
22. Bilalov, F., Skrebneva, L., Nikitin, O., Shuralev, E., & Mukminov, M. (2015). Seasonal variation in heavy-metal accumulation in honey bees as an indicator of environmental pollution. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 6(4), 215–221.
23. Bogdanov, S., Jurendic, T., Sieber, R., & Gallmann, P. (2008). Honey for nutrition and health. *Journal of the American College of Nutrition*, 27(6), 677–689.
24. Cebotari, V., Buzu, I., & Gliga, O. (2015). New nutritional supplements for bees during deficient harvesting period. *Scientific Papers – Animal Science Series*, 67, 73–80.
25. Cebotari, V., Buzu, I., & Toderaş, I. (2015). Influence of some organic coordination compounds containing Fe and Bi on development of bee families. In *Int. Conf. Agric. Sci. & Vet. Med. of Bucharest, Faculty of Animal Science* (Vol. LVIII, pp. 181–188). Ceres.
26. Cho J. M., Chae J., Jeong S. R., Moon M. J., Shin D. Y., & Lee J. H. (2020). Immune activation of Bio-Germanium in a randomized, double-blind, placebo-controlled clinical trial with 130 human subjects: *Therapeutic*

- 27.Chunjiang T., Lu X., Wenlie C. 2015. Germanium in ginseng is low and causes no sodium and water retention or renal toxicity in the diuretic-resistant rats. *Experimental Biology and Medicine*. 11, 1505–1512.
- 28.DeGrandi-Hoffman G., Gage S. L., rby-Harris V., Carroll M., Chambers M., Graham H. (2018) Connecting the nutrient composition of seasonal pollens with changing nutritional needs of honey bee (*Apis mellifera* L.) colonies. *Journal Insect. Physiology*. 109. 114–124.
- 29.Fedoruk R. S., Dolaychuk O. P., Kovalchuk I. I., Tsap M. M. (2015.) Reactions of physiological systems rats' organism by watering them low and high doses Germanium «nanoaquacitrate». *Agriculture science and practice*. 2 (3), 15–21.
- 30.Fedoruk, R. S., Tesarivska, U. I., Khrabko, M. I., Tsap, M. M., & Denys, G G (2018). Influence of dispensing different doses of germanium cirate on the content of trace elements in tissues and organs of male rats F2.*Agriculture Science and Practice*, 5(3), 40–46.
- 31.Fu, Z., & Xi, S. (2020). The effects of heavy metals on human metabolism. *Toxicology Mechanisms and Methods*, 30(3), 167–176.
- 32.Li, L., Ruan, T., Lyu, Y., & Wu, B. (2017). Advances in effect of germanium or germanium compounds on animals. *Journal of Biosciences and Medicines*, 5(7), 56–73. <https://doi.org/10.4236/jbm.2017.57006>
- 33.Lukevics, E., & Ignatovich, L. (2003). Biological activity of organogermanium compounds. *ChemInform*, 34(17), 279–295.
- 34.Manning, R. (2001). Fatty acids in pollen: a review of their importance for honey bees. *Bee World*, 82(2), 60–75.
- 35.Matuszewska E., Klupczynska A., Maciotek K., Kokot Z. I., Matysiak J. (2021). *Multielemental Analysis of Bee Pollen, Propolis, and Royal Jelly llected in West-Central Poland. Molecules*. 26(9),2415. <https://doi.org/10.3390/molecules26092415>

- 36.Nefodova O. O., Halperin O. I., Shatorna V. F. (2019). The influence of cerium and germanium citrates on the process of embryogenesis of rat on the background of cadmium intoxication. *Bulletin of problems biology and medicine*. 1(148), 273–278. <https://doi.org/10.29254/2077-4214-2019-1-1-148-273-278>
- 37.Niu, Z. Y., Liu, F. Z., Wan, Y. S., Liang, X., & Xie, M. (2001). Effects of germanium on the growth of main immune organs in broilers. *Journal of Northwest A & F University* (Natural Science Edition), 10, 41–43.
- 38.Vlizlo, V. V., Fedoruk, R. S., & Iskra, R. Ya. (2018). Biological action of functional nanomaterials in different species of animals. *Вісник Аграрної Науки*, 96(11), 80–86.
- 39.Yang W., Tian Y., Han M., Miao X. (2017). Longevity extension of worker honey bees (*Apis mellifera*) by royal jelly optimal dose and active ingredient. *PeerJ*. 3118 <https://doi.org/10.7717/peerj.3118>

ДОДАТКИ