

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ І. І. МЕЧНИКОВА

Odesa National University Herald

ВІСНИК ОДЕСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Серія: *Біологія*

Науковий журнал
Виходить 2 рази на рік
Серія заснована у липні 2007 р.

Том 29, випуск 2(55) 2024

Одеса
ОНУ
2024

Засновник та видавець:

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова

Редакційна рада журналу:

В. І. Труба, д-р юр. наук (голова ред. ради); В. О. Іваниця, д-р біол. наук (заступник голови ред. ради); С. М. Андрієвський, д-р фіз.-мат. наук; В. В. Глебов, канд. іст. наук; Л. М. Дунаєва, д-р політ. наук; В. В. Заморов, канд. біол. наук; О. В. Запорожченко, канд. біол. наук; О. А. Іванова, д-р наук із соц. комунікацій; В. Є. Круглов, канд. фіз.-мат. наук; В. Г. Кушнір, д-р іст. наук; В. В. Менчук, канд. хім. наук; О. В. Суровцева, директор Наукової бібліотеки; Н. М. Крючкова, канд. екон. наук; Л. М. Токарчук, д-р юр. наук; М. І. Ніколаєва, канд. політ. наук; В. В. Яворська, д-р геогр. наук; Н. В. Кондратенко, д-р філол. наук.

Редакційна колегія журналу:

А. Бьорнер, д.б.н., професор (Німеччина); С. Верба, к.б.н. (Польща); В. В. Заморов, к.б.н., доцент (Україна); В. О. Іваниця, д.б.н., професор (Україна); К. Ковальчик, д.б.н., професор (Польща); Г. В. Майкова, к.б.н. (Польща); О. А. Макаренко, д.б.н., ст.н.с. (Україна); С. Мішева, д.б.н., професор (Болгарія); Ю. М. Олійник, к.б.н., доцент (Україна); С. Н. Оленін, професор (Литва), З. Селка, к.б.н., (Польща); Г. Федак, професор (Канада); С. С. Чернадчук, к.б.н., доцент (Україна); С. В. Чеботар, д.б.н., член-кор. НААНУ (Україна) – науковий редактор; Т. Г. Алексеева, к.б.н., доцент (Україна) – відповідальний секретар.

«Вісник Одеського національного університету. Біологія»
входить до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б»)
Затверджено Наказом МОН України № 1301 від 15.10.2019 р.

Українською та англійською мовами

Згідно з Рішенням Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення
№ 1050 від 28.03.2024 р. журнал зареєстрований як друковане медіа
і внесений до Реєстру суб'єктів у сфері медіа з ідентифікатором R30-03679

Затверджено до друку Вченою радою
Одеського національного університету імені І. І. Мечникова

Адреса редакції: вул. Всеволода Змієнка, 2, м. Одеса, 65082
Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,
Тел: (+380-48) 68-79-32
E-mail: gerald_biology@onu.edu.ua

© Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, 2024

ЗМІСТ

БОТАНІКА І ФІЗІОЛОГІЯ РОСЛИН

Зубровська О. М., Чипиляк Т. Ф.
ФОРМУВАННЯ ВЕГЕТАТИВНОЇ СФЕРИ ВИДІВ РОДІВ *HYLOTELEPHIUM* Н. ОНВА
І *SEDUM* L. ЗА РІЗНОГО РІВНЯ ОСВІТЛЕНOSTІ..... 9

Юхименко Ю. С., Данильчук О. В., Бойко Л. І.
ВПЛИВ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН НА ПОЧАТОК ЦВІТІННЯ ДЕРЕВНИХ РОСЛИН
У СТЕПОВІЙ ЗОНІ УКРАЇНИ 27

ГЕНЕТИКА І МОЛЕКУЛЯРНА БІОЛОГІЯ

**Фанін Я. С., Литвиненко М. А., Молодченкова О. О., Міщенко І. А., Моцний І. І.,
Дуніч А. А., Міщенко Л. Т.**
ДОСЛІДЖЕННЯ НОВИХ ГЕНЕТИЧНИХ ДЖЕРЕЛ ВИСОКОЇ БІЛКОВОСТІ ЗЕРНА
ТА УРОЖАЙНОСТІ ВІД *AEGILOPS TAUSCHII* ТА *TRITICUM DICOCCHOIDES* 47

ФІЗІОЛОГІЯ ЛЮДИНИ ТА ТВАРИН

Бендас С. І., Галкін Б. М., Кириленко Н. А.
IN SILICO ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОТИЗАПАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
PFOA, PFOS, КСЮ₄ ТА АСІ₃ 67

Молодан Ю. О., Ларіонов В. Б.
ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ПРОТИЗАПАЛЬНОЇ АКТИВНОСТІ КВЕРЦЕТИНУ ТА
ДИКЛОФЕНАКУ НАТРІЮ НА МОДЕЛІ КАРАГІНАНОВОГО ЗАПАЛЕННЯ У ЩУРІВ 87

ІСТОРІЯ ФАКУЛЬТЕТУ ТА УНІВЕРСИТЕТУ

Петров С. А., Чернадчук С. С., Будняк О. К., Сорокін А. В.
СТАНОВЛЕННЯ ТА РОЗВИТОК КАФЕДРИ БІОХІМІЇ ОДЕСЬКОГО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ І. І. МЕЧНИКОВА 100

З'ЇЗДИ ТА КОНФЕРЕНЦІЇ

БІОЛОГІЧНА СЕКЦІЯ (23 СЕРПНЯ 2024 р.) В МЕЖАХ ХХІV ГАМОВСЬКОЇ
МІЖНАРОДНОЇ АСТРОНОМІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ «АСТРОНОМІЯ ТА НЕ ТІЛЬКИ:
АСТРОФІЗИКА, КОСМОЛОГІЯ ТА ГРАВІТАЦІЯ, АСТРОФІЗИКА ЕЛЕМЕНТАРНИХ
ЧАСТИНОК, РАДІОАСТРОНОМІЯ, АСТРОБІОЛОГІЯ ТА ГЕНЕТИКА», ЯКА
ПРОВОДИЛАСЬ 19–23 СЕРПНЯ 2024 р. В ОНУ ІМЕНІ І. І. МЕЧНИКОВА, ОДЕСА,
УКРАЇНА 113

Борісюк М., Степаненко А., Чен П., Міхаель Т., Лем Е., Шуберт В., Шуберт І.
ПЕРША СТРУКТУРА НА НУКЛЕОТИДНОМУ РІВНІ ЛОКУСІВ 5S ТА 35S рДНК
У РОСЛИН 116

Тинкевич Ю. О., Панчук І. І., Волков Р. А.
КОНСЕРВАТИВНІ ЕЛЕМЕНТИ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ В МГС 5S рДНК
ПОКРИТОНАСІННИХ 117

Сатпагі П., Мірзахмедов М., Бюхнер Х., Чамас С., Хоффі І., Дагма Д. С., Кумлен Й.
СТВОРЕННЯ ГАПЛОІНДЮСОРІВ ЯЧМЕНЮ ЗА ДОПОМОГОЮ CAS9-
ІНДУКОВАНОГО НОКАУТУ ФОСФОЛІПАЗИ А1 118

Попович Ю. А., Благодарова О. М., Школіна К. С., Чеботар С. В. ЗАСТОСУВАННЯ НОВИХ МОЛЕКУЛЯРНИХ МАРКЕРІВ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ПОЛІМОРФІЗМУ ГЛАДИНОВИХ ЛОКУСІВ <i>TRITICUM DURUM</i> DESF.	119
Чеботар Г., Котні П., Опперманн М. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОСТУПНОСТІ ТА ПОВТОРНОГО ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ: ПІДХІД FAIR ДО УПРАВЛІННЯ ДОСЛІДНИЦЬКИМИ ДАНИМИ	121
Ющук О., Бархатова А., Чиж А., Маст І., Марінеллі Ф., Федоренко В. СТВОРЕННЯ ЗНАРЯДЬ ДЛЯ ГЕННО-ІНЖЕНЕРНИХ МАНІПУЛЯЦІЙ ІЗ НЕТИПОВИМ АКТИНОНОМІЦЕТОМ <i>UMEZAWAEA ENDOPHYTICA</i> DSM 103496	122
Мельник С., Штергоф М., Братійчук Д., Ребець Ю., Лужецький А., Осташ Б. ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНОМНОГО ПОТЕНЦІАЛУ <i>STREPTOMYCES</i> <i>ROSEOCHROMOGENES</i> NRRL 3504 ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ МЕТАБОЛІТІВ	123
Цедуляк В.-М., Кошла О., Осташ Б., Лужецький А., Мацумото С., Оцубо Й., Нагата Ю. ЕФЕКТИ МУТАНТНОГО РИБОСОМАЛЬНОГО БІЛКА S12 НА <i>STREPTOMYCES</i> <i>ALBIDOFLAVUS</i> J1074	124
Роман І., Федоренко В., Громико О. ЗНАЧЕННЯ БІОІНФОРМАЦІЙНИХ ІНСТРУМЕНТІВ У КЛАСИФІКАЦІЇ ПРОКАРІОТІВ: НА ПРИКЛАДІ РОДУ <i>ACTINOPLANES</i>	125
Жарікова Д., Соерз Р., Барнес Х. Дж. НЕВИВЧЕНИЙ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК МІЖ ЕПІГЕНОМОМ І КОРЕНЕВИМ МІКРОБІОМОМ.....	126
Снейп К. ГЕНОМІКА РАКУ: КЛІНІЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОХ ГЕНОМІВ ПАЦІЄНТІВ З РАКОМ	127
Сидор Р., Сенченко Н., Шендеровська Н., Гейченко М., Старенка І., Савінова І., Семенюк Д., Грубіян Н., Вєтров Р., Новосолов С., Панащук С., Ольховська А., Трокоз М., Губар О. БАГАТОФАКТОРНИЙ ІНЖИНІРИНГ мРНК БЕЗ КЕПУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ПОТЕНЦІЙ <i>IN VITRO</i>	128
Мончак Ю. ВИМІРЮВАЛЬНА РЕЗИДУАЛЬНА ХВОРОБА (ВРХ) ПРИ ЛІМФОЇДНИХ ЗЛОЯКІСНИХ НОВОУТВОРЕННЯХ: ГОЛКА В СКІРТІ СІНА І ЯК ЇЇ ЗНАЙТИ.....	129
Лі С. ПОБУДОВА ГРАФІКІВ НА ОСНОВІ ГАПЛОТИПІВ З ВЕЛИКИМИ ІНДЕЛАМИ З ПАН-ГЕНОМУ СПРИЯЄ ВІДКРИТТЮ ГЕНІВ	131
КЕРІВНИЦТВО ДЛЯ АВТОРІВ.....	133

CONTENTS

BOTANY AND PLANT PHYSIOLOGY

Zubrovska O. M., Chypyliak T. F.

FORMATION OF THE VEGETATIVE SPHERE OF SPECIES OF THE GENERA
HYLOTELEPHIUM H. OHBA AND *SEDUM* L. AT DIFFERENT LEVELS OF
ILLUMINATION..... 9

Yukhymenko Yu. S., Danylchuk O. V., Boyko L. I.

THE INFLUENCE OF CLIMATE CHANGES ON THE FLOWERING START
OF WOODY PLANTS IN THE STEPPE ZONE OF UKRAINE 27

GENETICS AND MOLECULAR BIOLOGY

**Fanin Ya. S., Lytvynenko M. A., Molodchenkova O. O., Mishchenko I. A., Motsnyi I. I.,
Dunich A. A., Mishchenko L. T.**

STUDY OF NEW GENETIC SOURCES OF HIGH GRAIN PROTEIN CONTENT
FROM *AEGILOPS TAUSCHII* AND *TRITICUM DICOCCOIDES* 47

PHYSIOLOGY OF HUMAN AND ANIMALS

Bendas S. I., Galkin B. M., Kyrilenko N. A.

IN SILICO STUDY OF THE ANTI-INFLAMMATORY PROPERTIES
OF PFOA, PFOS, KClO₄, AND AlCl₃ 67

Molodan Yu. O., Larionov V. B.

COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE ANTI-INFLAMMATORY ACTIVITY
OF QUERCETIN AND DICLOFENAC SODIUM IN THE CARRAGEENAN
INFLAMMATION MODEL IN RATS 87

HISTORY OF THE FACULTY AND THE UNIVERSITY

Petrov S. A., Chernadchuk S. S., Budnyak O. K., Sorokin A. V.

FORMATION AND DEVELOPMENT OF THE DEPARTMENT OF BIOCHEMISTRY
OF ODESA I. I. MECHNIKOV NATIONAL UNIVERSITY 100

CONGRESSES AND CONFERENCES

THE BIOLOGICAL SECTION

(23 AUGUST 2024) WITHIN THE XXIV GAMOW INTERNATIONAL
ASTRONOMICAL CONFERENCE "ASTRONOMY AND BEYOND: ASTROPHYSICS,
COSMOLOGY AND GRAVITATION, ASTROPARTICLE PHYSICS, RADIO
ASTRONOMY, ASTROBIOLOGY AND GENETICS", HELD ON 19–23 AUGUST 2024
AT ODESA I. I. MECHNIKOV NATIONAL UNIVERSITY, ODESA CITY, UKRAINE.... 113

Borisjuk M., Stepanenko A., Chen G., Michael T., Lam E., Schubert V., Schubert I.

FIRST NUCLEOTIDE LEVEL STRUCTURE OF 5S AND 35S rDNA
LOCI FOR PLANTS 116

Tynkevich Yu. O., Panchuk I. I., Volkov R. A.

CONSERVED SEQUENCE ELEMENTS IN THE IGS 5S rDNA OF ANGIOSPERMS.... 117

Satpathy P., Mirzakhmedov M., Büchner H., Chamas S., Hoffie I.,

Daghma D. S., Kumlehn J.

GENERATION OF HAPLOIDY INDUCERS IN BARLEY BY CAS9-MEDIATED
KNOCKOUT OF PHOSPHOLIPASE A1 118

Popovych Yu. A., Blagodarova O. M., Shkolina K. S., Chebotar S. V. APPLICATION OF NEW MOLECULAR MARKERS FOR DETECTING OF GLIADIN LOCI POLIMORPHISM OF <i>TRITICUM DURUM</i> DESF.	119
Chebotar G., Kotni P., Oppermann M. ENSURING DATA ACCESSIBILITY AND REUSABILITY: THE FAIR APPROACH TO RESEARCH DATA MANAGEMENT	121
Yushchuk O., Barkhatova A., Chyzh A., Mast Y., Marinelli F., Fedorenko V. DEVELOPING A GENETIC TOOLKIT TO MANIPULATE THE RARE ACTINOBACTERIUM <i>UMEZAWAEA ENDOPHYTICA</i> DSM 103496.....	122
Melnyk S., Stierhof M., Bratiichuk D., Rebets Yu., Luzhetskyy A., Ostash B. EXPLORING THE GENOMIC POTENTIAL OF <i>STREPTOMYCES</i> <i>ROSEOCHROMOGENES</i> NRRL 3504 FOR SPECIALIZED METABOLITE PRODUCTION	123
Tseduliak V.-M., Koshla O., Ostash B., Luzhetskyy A., Matsumoto S., Ohtsubo Y., Nagata Y. EFFECTS OF MUTATED RIBOSOMAL PROTEIN S12 ON <i>STREPTOMYCES</i> <i>ALBIDOFLAVUS</i> J1074	124
Roman I., Fedorenko V., Gromyko O. THE IMPACT OF BIOINFORMATICS TOOLS IN THE CLASSIFICATION OF PROKARYOTES, THE CASE OF THE GENUS <i>ACTINOPLANES</i>	125
Zharikova D., Sawers R., Barnes C. J. THE UNEXPLORED RELATIONSHIP BETWEEN THE EPIGENOME AND THE ROOT MICROBIOME	126
Snape K. CANCER GENOMICS: CLINICAL INTERROGATION OF THE TWO GENOMES OF CANCER PATIENTS.....	127
Sydor R., Senchenko N., Shenderovska N., Heichenko M., Starenka I., Savinova I., Semeniuk D., Hrubiiian N., Vietrov R., Novosolov S., Panashchuk S., Olkhovska A., Trokoz M., Hubar O. MULTIFACTORIAL ENGINEERING OF CAP-LESS mRNAs FOR ENHANCED <i>IN VITRO</i> POTENCIES	128
Monczak Yu. MEASURABLE RESIDUAL DISEASE (MRD) IN LYMPHOID MALIGNANCIES: THE HAYSTACK, THE NEEDLE, AND HOW TO FIND IT	129
Li X. GRAPHING LARGE INDEL-BASES HAPLOTYPES FROM PAN-GENOME FACILITATES GENE DISCOVERY	131

БОТАНІКА І ФІЗІОЛОГІЯ РОСЛИН



УДК 581.4+581.522.4:582.715(477.63)

[https://doi.org/10.18524/2077-1746.2024.2\(55\).320486](https://doi.org/10.18524/2077-1746.2024.2(55).320486)

О. М. Зубровська, к.б.н., науковий співробітник;

<https://orcid.org/0000-0002-4173-2457>

Т. Ф. Чипиляк, к.б.н., завідувачка відділом;

<https://orcid.org/0000-0003-2193-5350>

Криворізький ботанічний сад НАН України, відділ природної та культурної флори, вул. Ботанічна, 50, м. Кривий Ріг, 50089, Україна
e-mail: zubrovska@ukr.net

ФОРМУВАННЯ ВЕГЕТАТИВНОЇ СФЕРИ ВИДІВ РОДІВ *HYLOTELEPHIUM* Н. ОНВА І *SEDUM* L. ЗА РІЗНОГО РІВНЯ ОСВІТЛЕНОСТІ

Вивчені особливості розвитку і росту вегетативної системи видів родів *Hylotelephium* Н. Онва і *Sedum* L. за різного рівня освітленості протягом сезонного розвитку в умовах степової зони України. Вплив тіньових умов зростання на досліджувані види виявлявся у зменшенні галуження пагонів, скороченні довжини однорічних пагонів, кількості листків на них та площі листової поверхні, що призводило до зменшення загального габітусу рослин і зниження рівня декоративності очитків. Зроблено висновки про можливість культивування в тіні *S. album* та *H. spectabile*.

Ключові слова: декоративні очитки, рівень освітленості, система пагонів, листки, сезонний розвиток, степова зона.

На сучасному етапі розвитку суспільства, у зв'язку з постійно зростаючим техногенним навантаженням на довкілля, особливої актуальності набуває вирішення питань його захисту і оздоровлення. На густозаселених, суттєво трансформованих територіях існує необхідність підвищення комфортності середовища існування, для чого створюють території зі значною кількістю рослин, переважна більшість яких представляє культурну урбанofлору і є одним із найефективніших методів оптимізації довкілля [7]. Поліпшити якість структури та декоративність таких насаджень можна шляхом розширення асортименту рослин за рахунок малопоширених в Україні, витривалих та невибагливих у догляді видів [13]. Відбір декоративних рослин необхідно здійснювати на основі наукового прогнозування їх адаптаційної здатності до дії екстремальних чинників [9, 26]. Результати таких досліджень є необхідною умовою раціонального природокористування в регіонах зі значним рівнем техногенного навантаження, до яких відноситься і Криворіжжя (степова зона України) [17]. Центром залізородного конгломерату є місто Кривий Ріг, в якому розміщена значна площа рекреаційних зон (парки, міські сади, бульвари, сквери тощо). Велика кількість у місті саме паркових насаджень – необхідний елемент цілих житлових районів. Парки були закладені багато років тому і з часом, завдяки розрос-

танню деревних насаджень, досить велика їх площа стала затіненою [15]. Для оптимізації та забезпечення стійкості насаджень на цих територіях виникає потреба використання принципу «багатоповерховості», який спостерігається в природних рослинних угрупованнях та забезпечує їм стабільність – верхній ярус для дерев, середній – кущів, нижній – трав'янистих рослин [14]. Значна частина декоративних рослин не витримує тіньових умов розвитку, адже світло відіграє важливу роль у житті рослин як джерело енергії для фотосинтезу і як фактор, регулюючий ростові та формотворчі процеси. Складні умови недостатньо зволжених затінених ділянок витримують небагато багаторічних рослин, тому необхідним є залучення найбільш стійких і достатньо декоративних з них [17]. За попередніми дослідженнями значна частина саме представників родини Crassulaceae J. St.-Hil. є декоративними рослинами, які невимогливі до умов вирощування [1, 4, 6, 11, 18].

Залежно від тривалості і сили впливу різноманітних абіотичних чинників відбуваються перебудови рослинного організму не лише на рівні фізіологічних реакцій, а й його морфологічних структур [22]. Так, на зміну рівня освітленості, найчастіше, рослини реагують збільшенням чи зменшенням індивідуального розміру та величини листкових пластинок, а дефіцит вологи призводить до скорочення кількості листків на рослині й тривалості їх життя [19, 24, 30]. Вивчення морфогенезу окремих органів багаторічних видів рослин, тобто особливостей формування їх вегетативної сфери, дозволить передбачити поведінку рослин та охарактеризувати їх розвиток у певних умовах зростання за стресової дії багатьох чинників [27]. Визначення таких змін, як прояву адаптації інтродуцентів до різних умов вирощування, є важливим питанням інтродукції багаторічних трав'янистих рослин [13].

Зважаючи на вищесказане **мета роботи** полягала у вивченні особливостей формування однорічної пагонової системи та морфологічних показників листків видів родів *Hylotelephium* Н. Ohba і *Sedum* L. за різного рівня освітленості протягом сезону в умовах Криворізького ботанічного саду Національної академії наук України (далі КБС).

Матеріали і методи дослідження

Об'єктами дослідження були рослини *Hylotelephium ewersii* (Ledeb.) Н. Ohba (очиток Еверса), *Hylotelephium spectabile* (Boreau) Н. Ohba (очиток показний), *Sedum album* L. (очиток білий), *Sedum reflexum* L. (очиток скельний) та *Sedum spurium* М. Віб (очиток несправжній) [12]. Дослідження проводилися у КБС, для території якого характерні кліматичні умови степової зони, а саме нестача вологи в повітрі і ґрунті, високі літні температури повітря (посушлива агрокліматична зона). За останні 30 років середньорічна температура повітря на Криворіжжі підвищилася і складає +10,0–+11,5°C (у 1987 р.– +8,5°C). У літній період фіксуються високі добові температури повітря (+36,7–+38,1°C), часті суховії. Річна сума опадів складає 350–450 мм, при цьому протягом літніх мі-

сяців баланс зволоження відзначається дефіцитом – за вегетаційний період випадає лише 100–150 мм опадів [16].

Для досліджень були закладені ділянки у відкритому ґрунті (чорнозем звичайний) з різним рівнем освітлення: добре освітлене місце зростання (контрольна ділянка) – рівень освітленості в обідній час коливався в межах 39 000–56 500 люкс в ясну погоду і 14 500–23 500 люкс в похмурий день; тіньова ділянка – рівень освітленості в обідній час в ясну погоду сягав 2 500–3 500 люкс, а в похмурий день 1 200–2 000 люкс. На обох ділянках на початку вересня минулого року були висаджені по 10 особин кожного виду, типових у фенологічному відношенні і тотожних за морфологічною будовою, які успішно вкоренилися до середини жовтня. Протягом наступного року під час досліджень (квітень-жовтень) всі рослини зростали в умовах природного вологозабезпечення (без додаткового поливу). Вивчення особливостей формування асиміляційних органів очитків проводили у такі терміни: III декада травня, III декада липня, III декада вересня.

Морфологічні показники надземних пагонів описували за С. М. Зиман зі співавторами [5], а життєві форми – за С. Раункієром [25]. Для вивчення особливостей розвитку системи однорічних пагонів у кожен з термінів відбирали по 50 пагонів I порядку і підраховували кількість пагонів II та III порядку на них. Визначали довжину пагону I порядку, кількість вузлів на ньому та довжину міжвузлів із середньої частини пагона.

Для аналізу морфологічних показників на рослинах досліджуваних видів відбиралися листки з середньої частини однорічних вегетативних (*S. album*, *S. reflexum*, *S. spurium*) чи вегетативно-генеративних пагонів (*H. spectabile*, *H. ewersii*). Розмір вибірки (n) для кожного виду та в кожному з двох варіантів досліду становив 125 листків. Площу листка очитків визначали за методом відбитків [8] і обчислювали за формулою:

$$S = a \cdot C / b,$$

де S – площа листка; a – маса контуру листка, мг; C – площа квадрату паперу, см²; b – маса квадрату паперу, мг. Площу листової пластинки *S. album* та *S. reflexum* не вираховували через специфічність форми листків. Коефіцієнт видовженості листка визначали як відношення довжини листової пластинки до її ширини [2]. Статистичне опрацювання даних проводили методами параметричної варіаційної статистики на 95% рівні значущості (P≤0,05) [3, 10], використовуючи пакет програм Microsoft Office Excel.

Результати дослідження та їх обговорення

Досліджувані види за життєвою формою відносяться до хамефітів (*S. album*, *S. reflexum* і *S. spurium*) та гемікриптофітів (*H. spectabile* і *H. ewersii*) [25]. В умовах степової зони України за інтродукції у КБС *S. album*, *S. reflexum* і *S. spurium* виявляють себе зимовозеленими наземно-повзучими кореневищними росли-

нами з безрозеточною симподіальною моделлю пагоноутворення, де чітко вирізняються вегетативні і генеративні пагони. Вегетативні пагони багаторічні, зимуючі, найінтенсивніше розвиваються після цвітіння, генеративні пагони відмирають після плодоношення до базальної частини. На другий рік життя головний пагін набуває горизонтального положення, вкорінюється у міжвузлях, дерев'яніє, втрачає листки і виконує функцію епігеогенного кореневища. Натомість *H. spectabile* і *H. ewersii* в інтродукційних умовах – весняно-літньо-осінньозелені рослини з напіврозеточною моноподіальною моделлю пагоноутворення. У цих очитків надземні пагони вегетативно-генеративні, зимує лише їх базальна частина, тоді як вся надземна частина повністю відмирає з настанням осінніх заморозків [21, 30].

Аналіз отриманих результатів показав, що залежно від рівня освітленості видоспецифічно змінювався розвиток (ріст і галуження) пагонів досліджуваних видів. При достатньому освітленні у *S. album*, *S. reflexum* і *S. spurium* протягом вегетаційного сезону відбувалося активне пагоноутворення на вегетативних і генеративних пагонах, а завдяки вкоріненню плагіотропних пагонів формувалися компактні куртинки, які поступово рівномірно збільшувалися за розміром. Наприкінці вересня кількість пагонів II порядку на особині в середньому сягала 12 шт. (найбільше у *S. album* – 12–16 шт.), а пагони III порядку формувалися лише у *S. album* (2–4 шт.) та *S. reflexum* (1–2 шт.) (рис. 1). Види *Hylotelephium* в умовах повного освітлення формували компактні куштики, майже кулястої форми. Зазначимо, що у рослин *H. ewersii* пагони галузилися тільки до II порядку: у кінці травня їх було 1–2 шт., у вересні – 2–6 шт. У рослин *H. spectabile* розвивалися моноподіальні пагони, для яких не властиве галуження [30].

Тіньові умови зростання призводили до інгібування процесів пагоноутворення (рис. 1). Так, у *S. reflexum* і *S. spurium* на кінець вересня в базальній частині генеративних пагонів подекуди формувалися 1–2 пагони II порядку і за габітусом куртинки цих видів були зріджені і розлогі. Натомість у *S. album* в тіні, як і на світлі, розвивалися доволі компактні куртинки, чому сприяло формування на особині 3–7 шт. пагонів II порядку. У рослин *H. ewersii* в умовах тіні пагони I порядку не галузилися, базальна частина їх дерев'яніла і згодом приймала плагіотропне положення, куштики виглядали зрідженими.

Дослідження показників росту пагонів показало, що за умов вирощування рослин при достатній освітленості від травня до вересня довжина однорічного пагону очитків збільшувалася в 1,5 (*S. spurium*) – 2,2 (*S. album*) раза. Найдовший вегетативний пагін формувався у рослин *S. reflexum* і у 1,5–1,6 раза перевищував розміри однорічного пагону у *S. spurium* та *S. album* (рис. 2).

Відзначимо, що за умов інтродукції у КБС рослини *S. reflexum* і *S. album* мали на 10–15% більші розміри надземної частини, а у *S. spurium* довжина міжвузлів, як і всього однорічного пагону в 1,5 рази перевищувала таку в природних умовах [6, 21, 23], що, вочевидь, зумовлене ґрунтовим фактором місцезрос-

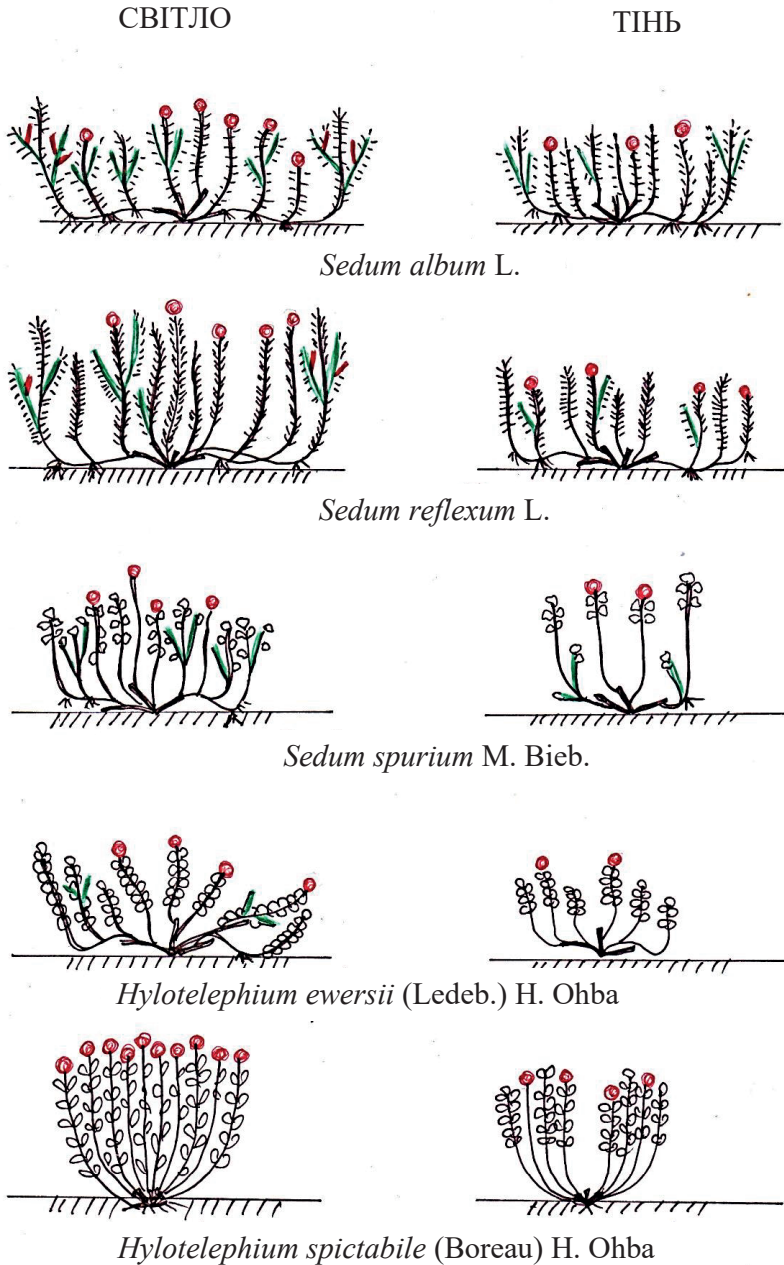


Рис. 1. Схема галузження пагонів видів родів *Hylotelephium* H. Ohba і *Sedum* L. наприкінці вересня за різного рівня освітленості в умовах Криворізького ботанічного саду Національної академії наук України. Позначки: чорним кольором – однорічні пагони I порядку і листки, зеленим – пагони II порядку, червоним – пагони III порядку, червоні кульки – суцвіття.

тання видів (кам'янисті схили гір). У рослин *H. ewersii* і *H. spectabile* довжина пагонів на освітленій ділянці впродовж сезону також зростала у 1,5–2 рази, як і у видів *Sedum*, і досягала відповідно $12,16 \pm 2,51$ см та $56,37 \pm 3,40$ см. Такі ж завдовжки вегетативно-генеративні пагони *H. spectabile* формує і в природних місцезростаннях [30].

Так як досліджувані види переважно відносяться до геліофітів, затінення призводило до зміни їх габітусу і морфометричних показників. В тінювих умовах розвитку у III декаді травня довжина пагонів тільки у *S. reflexum* достовірно була менше в 1,6 рази показників при достатньому освітленні. Тоді як до осені (кінець вересня) довжина однорічних вегетативних пагонів видів роду *Sedum*, хоч і була меншою, проте зростала у 1,6–2 рази, як і на світлі (рис. 2). Для рослин *H. ewersii* в умовах тіні були характерні найменші ростові показники – у травні довжина пагону була майже у 2 рази меншою від контролю, а у вересні досягала лише $8,86 \pm 0,94$ см. У рослин *H. spectabile* вегетативно-генеративні пагони наприкінці вересня були заввишки $43,42 \pm 2,57$ см, що було в 1,6 рази менше, ніж на світлі.

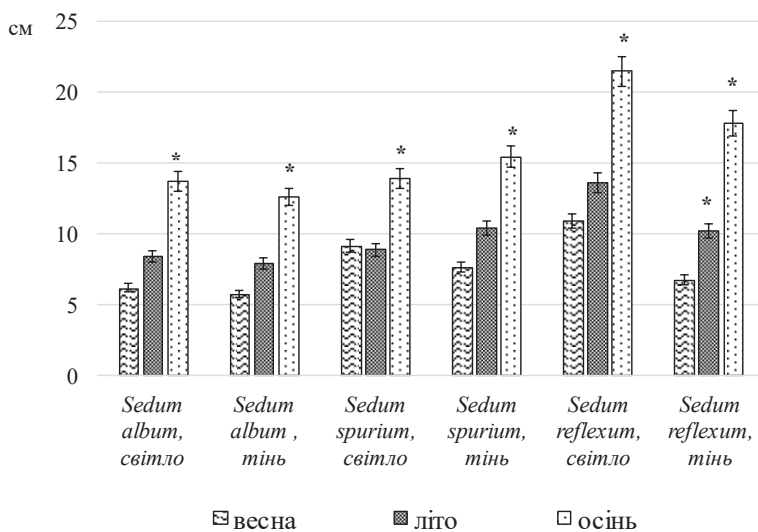


Рис. 2. Сезонний ріст однорічних вегетативних пагонів рослин видів роду *Sedum* L. за різного рівня освітленості в умовах Криворізького ботанічного саду Національно академії наук України (контроль – світло);

* – розбіжності достовірні відносно контролю за критерієм Ст'юдента при $p < 0,05$

Вивчення будови пагонів, а саме кількості вузлів та довжини міжвузлів дало можливість констатувати, що у наземноповзучих видів роду *Sedum* в умовах повного освітлення в період їх активного розвитку кількість вузлів з травня по вересень збільшувалася в 1,7 рази у *S. reflexum* і *S. spurium* та

Таблиця 1
Мінливість ознак будови однорічних пагонів видів родів *Hylotelephium* Н. Ohba і *Sedum* L. за різного рівня освітленості протягом сезонного розвитку в умовах Криворізького ботанічного саду Національної академії наук України

Термін дослідження	Рівень освітленості			
	Світло в ясну погоду 39 000–56 500 люкс, в похмурий день 14 500–23 500 люкс		Тінь в ясну погоду 2 500–3 500 люкс, в похмурий день 1 200–2 000 люкс.	
	Кількість вузлів, шт.	Довжина міжвузлів, см	Кількість вузлів, шт.	Довжина міжвузлів, см
<i>Sedum album</i> L.				
травень	11,0 ± 0,5	0,61 ± 0,06	6,3 ± 0,5*	0,62 ± 0,62
липень	10,3 ± 0,6	0,93 ± 0,05	11,0 ± 0,7*	0,98 ± 0,05*
вересень	33,3 ± 1,5	0,78 ± 0,05	29,5 ± 0,7*	0,68 ± 0,35*
<i>Sedum spurium</i> M. Bieb.				
травень	13,4 ± 0,9	0,95 ± 0,10	8,9 ± 0,4*	0,88 ± 0,06*
липень	14,2 ± 0,7	0,83 ± 0,07	9,7 ± 0,6*	0,95 ± 0,09*
вересень	24,9 ± 1,2	0,83 ± 0,02*	23,0 ± 1,9	1,10 ± 0,57*
<i>Sedum reflexum</i> L.				
травень	21,5 ± 1,4	0,83 ± 0,07	15,1 ± 0,4*	1,03 ± 0,12*
липень	24,5 ± 0,9	0,73 ± 0,03	23,3 ± 1,5*	1,23 ± 0,09*
вересень	36,3 ± 0,9	0,72 ± 0,03	38,2 ± 0,8*	1,23 ± 0,10*
<i>Hylotelephium ewersii</i> (Ledeb.) Н. Ohba				
травень	10,0 ± 0,2	0,65 ± 0,03	5,6 ± 0,3*	0,48 ± 0,09*
липень	10,3 ± 0,4	0,90 ± 0,09	6,0 ± 0,3*	1,06 ± 0,12*
вересень	13,6 ± 0,5	1,40 ± 0,07	11,0 ± 0,4*	1,50 ± 0,29*
<i>Hylotelephium spictabile</i> (Boreau) Н. Ohba				
травень	13,0 ± 0,3	2,29 ± 0,09	13,1 ± 0,3	2,29 ± 0,03
липень	12,1 ± 0,4	5,53 ± 0,12	11,3 ± 0,6*	3,50 ± 0,29*
вересень	13,7 ± 0,6	5,07 ± 0,29	12,1 ± 0,1*	3,83 ± 0,17*

Примітка: контрольні показники – світло, * – розбіжності достовірні відносно контролю за критерієм Стьюдента при $p < 0,05$.

в 3 рази у *S. album*, тоді як довжина міжвузлів залишалася сталою (табл. 1). У рослин видів роду *Hylotelephium* відбувалося збільшення, як кількості вузлів (у *H. ewersii* в 1,8 рази), так і довжини міжвузлів (в 2,2 рази у *H. spectabile* і в 3 рази у *H. ewersii*).

Тіньові умови розвитку рослин *S. reflexum*, *S. spurium* та *S. album*, відносно освітленої ділянки, призводили у травні до зменшення кількості вузлів у 1,4–1,7 рази, натомість до вересня їх кількість збільшувалася в 1,8–2,7 рази. При цьому, тільки у *S. spurium* протягом сезону міжвузля подовжувалися і у вересні в тіні були більшими, ніж на сонці, що спричиняло «витягування» пагонів.

У *H. ewersii* у травні в даних умовах зростання формувалося у 1,8 рази менше вузлів, ніж на світлі, а міжвузля були коротшими у 1,4 рази, тоді як у кінці вересня довжина міжвузлів збільшувалася у понад 2 рази. Для рослин *H. spectabile* не зафіксовано достовірних змін кількості вузлів, тоді як довжина міжвузлів на вересень збільшувалася в 1,2 рази, проте була меншою ніж на світлі.

Аналіз отриманих морфометричних показників розвитку листків доводить, що в умовах достатнього освітлення у більшості досліджуваних видів очитків (*S. reflexum*, *S. album*, *H. ewersii*, *H. spectabile*) на однорічних пагонах у вересні нараховувалося в 1,2–1,4 рази менше листків, ніж у травні (рис. 3).

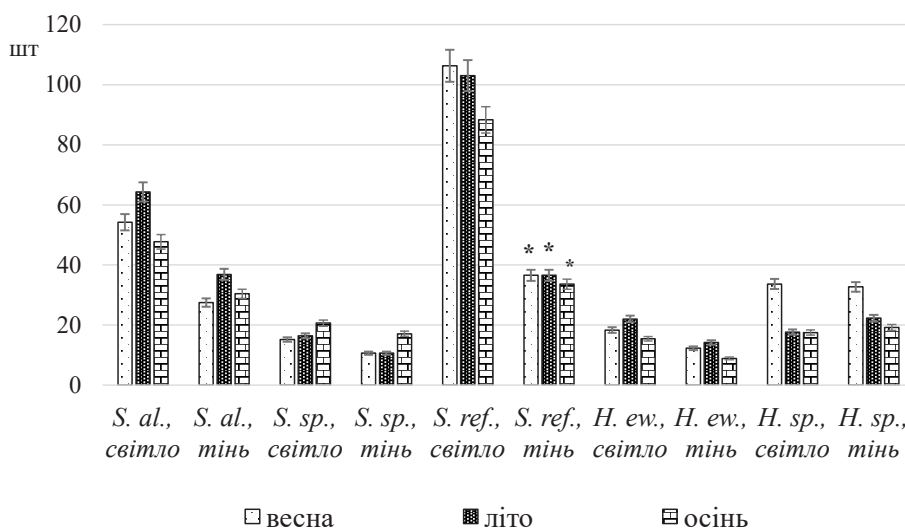


Рис. 3. Кількість листків на однорічному пагоні рослин видів *Hylotelephium H. Ohba* і *Sedum L.* за різного рівня освітленості протягом сезонного розвитку в умовах Криворізького ботанічного саду Національної академії наук України: *S. al.* – *Sedum album* L., *S. sp.* – *Sedum spurium* M. Bieb., *S. ref.* – *Sedum reflexum* L., *H. ew.* – *Hylotelephium ewersii* (Ledeb.) H. Ohba, *H. sp.* – *Hylotelephium spectabile* (Boreau) H. Ohba (контроль – світло); * – розбіжності достовірні відносно контролю за критерієм Стьюдента при $p < 0,05$.

Така особливість розвитку асиміляційних органів у згаданих видів, пов'язана з поступовим відмиранням нижніх листків, через недостатнє освітлення нижньої частини пагонів [20]. Тоді як у *S. spurium* навпаки, кількість листків до осені зростала в 1,4 раза, що, вочевидь, залежало від збільшення кількості вузлів упродовж сезонного розвитку.

В умовах тіні (з травня по вересень), порівняно з достатньо освітленим місцезростанням, відбувалося скорочення кількості листків у 1,3–3 рази (рис. 3), що призводило до зменшення улисненості пагонів. Найменше органів асиміляції формувалося на пагонах *S. reflexum*, оскільки чергове листкорозміщення відбувалося не по 4–5-ти повздовжнім осям, як на світлі, а переважно по трьом осям. Тоді як у *H. spectabile* в тіні формувалося мутовчате листкорозміщення, на відміну від освітлених умов з переважним черговим або супротивним розміщенням листків на пагоні, завдяки чому кількість листків у виду до кінця вегетаційного сезону була практично однаковою порівняно з освітленою ділянкою.

Дослідження кількісних показників розвитку листків очитків показало, що вирощування видів роду *Hylotelephium* у тіньових умовах призводить до формування видовжених листків та достовірного зменшення площі листової поверхні (табл. 2). Причому, протягом сезонного розвитку розміри органів асиміляції *H. spectabile* на 35% були дрібнішими відносно показників з сонячних ділянок, тоді як у *H. ewersii* до вересня площа листової поверхні скорчувалася майже вдвічі. При повному затіненні місцезростання у *S. reflexum* та *S. album* коефіцієнт видовженості листків збільшувався як у травні (в 1,2–1,6 раза), так і у вересні (в 2,4–2,6 раза). Науковцями показано, що *S. album* адаптуючись до змін в середовищі зростання формує вужчі і довші за розміром листки, при цьому не втрачаючи їх нормальної функціональності [23, 28]. У *S. spurium* в тіньових умовах достовірних змін площі листка не виявлено, адже з травня по вересень незначне зменшення довжини листка компенсується таким же незначним збільшенням його ширини. Ця особливість виду, дає змогу озеленювачам успішно використовувати його в тіньових садах [20, 29].

Окрім показаних вище морфологічних особливостей формування листків видів *Sedum* і *Hylotelephium* в тіньових умовах, зазначимо, що під кінець вегетаційного сезону змінювалися не лише розміри, а і форма листових пластинок. Так, у *S. album*, *S. reflexum* листки з валькуватих ставали більш плоскими і на 50° змінювали кут розташування відносно площини пагону. Хвилястий край листової пластинки у *H. spectabile* згладжується, а у *S. spurium* замість городчастого краю листка формується хвилястий і дуже звужується основа. Крім того, у цих видів листки втрачали видоспецифічне декоративне забарвлення, на них з'являлася велика кількість хлоротичних і некротичних плям, що зумовлювало їх передчасне старіння. Загалом, всі зазначені зміни призводили до зниження декоративності рослин, але різною мірою і з видоспецифічними особливостями.

Таблиця 2
Кількісні показники росту листків видів родів *Hylotelephium* Н. Ohba і *Sedum* L. за різного рівня освітленості протягом сезонного розвитку в умовах Криворізького ботанічного саду Національної академії наук України

Термін дослідження	Рівень освітленості							
	Світло в ясну погоду 39 000–56 500 люкс в похмурий день 14 500–23 500 люкс			Тінь в ясну погоду 2 500–3 500 люкс, в похмурий день 1 200–2 000 люкс.				
	Довжина листка, см	Ширина листка, см	К _в	Площа листка, см ²	Довжина листка, см	Ширина листка, см	К _в	Площа листка, см ²
<i>Sedum album</i> L.								
травень	0,70±0,37	0,32±0,19	2,3	—	0,98±0,40*	0,18±0,07*	5,6	—
липень	1,03±0,31	0,34±0,17	3,1	—	1,03±0,18	0,26±0,14*	4,3	—
вересень	1,02±0,26	0,28±0,09	3,7	—	1,20±0,37*	0,20±0,05*	6,0	—
<i>Sedum reflexum</i> L.								
травень	1,18±0,17	0,28±0,08	4,3	—	1,05±0,45*	0,15±0,07*	6,9	—
липень	1,25±0,19	0,22±0,08	5,9	—	1,30±0,01*	0,19±0,07*	7,3	—
вересень	1,29±0,34	0,24±0,06	5,5	—	1,13±0,38*	0,17±0,05*	6,5	—
<i>Sedum spurium</i> M. Bieb.								
травень	2,14±0,50	1,43±0,43	1,5	2,03±0,06	1,84±0,81*	1,55±0,87	1,2	1,98±0,17
липень	1,81±0,78	1,34±0,70	1,5	1,18±0,03	2,05±0,42*	1,64±0,26*	1,3	1,93±0,07*
вересень	1,96±1,10	1,46±0,89	1,4	1,78±0,11	1,88±0,37*	1,43±0,45	1,3	1,71±0,07*
<i>Hylotelephium ewersii</i> (Ledeb.) Н. Ohba								
травень	1,66±0,98	1,54±0,93	1,1	2,12±0,26	1,38±0,70*	1,22±0,25*	1,2	1,64±0,22*
липень	1,94±0,42	1,56±0,42	1,3	2,55±0,12	1,87±0,48	1,29±0,86*	1,4	1,86±0,21*
вересень	2,54±0,57	1,63±0,71	1,6	3,01±0,18	1,73±0,57*	1,22±0,40*	1,4	1,61±0,10*
<i>Hylotelephium spictabile</i> (Boreau) Н. Ohba								
травень	7,09±0,57	3,56±0,90	2,0	15,84±0,61	6,19±1,36*	3,34±0,71*	1,9	13,82±0,50*
липень	7,90±0,96	4,07±1,90	2,0	21,17±1,64	6,76±1,41*	3,64±1,05	1,9	16,15±0,64
вересень	7,05±1,43	3,55±0,62	2,0	16,03±0,74	6,52±0,97*	3,30±0,45*	2,0	15,18±1,08

Примітка: К_в – коефіцієнт видовженості листка (співвідношення довжини до ширини листка – ред.); контрольні дані (світло), * – розбіжності достовірні відносно контролю за критерієм Стьюдента при $\rho < 0,05$; “—” – показник не вимірювався.

Висновки

Підсумовуючи викладений вище матеріал можна виділити загальні та видоспецифічні особливості формування вегетативної сфери видів родів *Hylotelephium* Н. Ohba і *Sedum* L. за різного рівня освітленості в умовах Криворізького ботанічного саду, який знаходиться в степовій зоні України.

1. Однорічні вегетативні пагони на рослинах при достатній освітленості галузилися до II і III порядку у *S. album* і *S. reflexum* та до II порядку у *S. spurium* і *H. ewersii*. Натомість в тіньових умовах галуження пагонів відбувалося тільки до II порядку у *S. reflexum*, *S. spurium* і *S. album*, а у *H. ewersii* галуження не зафіксовано.

2. Довжина однорічних пагонів з травня по вересень збільшувалася як на світлі, так і в тіні, але в тіньових умовах вона була меншою на 9% (*S. album*) – 31% (*H. ewersii*). Кількість вузлів на однорічних пагонах в тіні протягом сезону зменшувалася на 10–20% у всіх видів, окрім *S. reflexum*. При цьому довжина міжвузлів достовірно не змінювалася (*S. album* і *H. ewersi*) чи ставала більшою у 1,3–1,7 раза (*S. reflexum* і *S. spurium*).

3. Зменшення кількості листків в тіньових умовах розвитку у 2,0–2,5 раза було характерним для *S. album* і *S. reflexum*, а зменшення площі листової поверхні відносно показників з сонячних ділянок – для *H. spectabile* та *H. ewersii* на 35% та 50% відповідно.

4. Найбільш декоративними в умовах затінення виглядали рослини *S. album*, у яких зберігалася властиве виду забарвлення листків, пагони галузилися і не витягувалися, тобто формувалися достатньо щільні декоративні куртинки. Рівень декоративності *S. spurium* і *S. reflexum* знижувався внаслідок «витягування» пагонів (через збільшення розмірів міжвузлів) та зменшення їх улисненості, куртинки виглядали зрідженими і розлогими. Найбільш негативно затінення вплинуло на рослини *H. ewersii*, адже ріст пагонів та листків пригнічувався майже вдвічі і зовсім не відбувалося додаткового галуження пагонів. Для використання в умовах тіні можна рекомендувати *S. album* та *H. spectabile*, адже рослини хоч і зменшували розміри особин, проте виглядали досить декоративно. Тоді як *S. spurium* і *S. reflexum* можна вирощувати в напівтіньових умовах.

Отримані дані є складовою комплексного вивчення ступеня життєздатності рослин декоративних очитків в умовах степової зони України в рамках НДТ «Життєздатність, декоративність малопоширених багаторічників та їх використання для оптимізації урболандшафтів степової зони України (на прикладі Криворіжжя)».

Стаття надійшла до редакції 03.07.2024

Список використаної літератури

1. Березкіна В. І. Біологічні особливості інтродукованих видів роду *Sedum* L. (Crassulaceae DC.) та перспективи їх використання в Україні: автореф. дис... канд. біол. наук: 03.00.05 «Ботаніка». Київ, 2003. 26 с.
2. Ганжа Д. Морфологічна реакція листків тополі в різних умовах урботехногенного навантаження. *Вісник Львівського у-ту. Серія біологічна*. 2012. Вип. 60. С. 163–170. <http://publications.lnu.edu.ua/bulletins/index.php/biology/article/view/8393/8335>.
3. Сторшин О. О., Лісовий М. В. Математичне планування польових дослідів та статистична обробка експериментальних даних. Харків: Вид-во Ін-ту ґрунтознавства та агрохімії ім. О. Н. Соколовського, 2005. 193 с.
4. Зубровська О. М. Особливості інтродукції видів роду *Sedum* L. в умовах степової зони України. *Екологічні науки*. 2022. № 5(44). С. 191–196. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44.28>.
5. Глострований довідник з морфології квіткових рослин. Навчально-методичний посібник / С. М. Зиман, С. Л. Мосякін, О. В. Булах, О. М. Царенко, Л. М. Фельбаба-Клушина. Ужгород: Медіум, 2004. 156 с.
6. Кириленко Н. А. Особливості анатомо-морфологічної будови Crassulaceae, їх таксономічне та еволюційне значення. *Вісник Одеського національного університету. Біологія*. 2016. Т. 20. № 1(36). С. 37–46. DOI: [https://doi.org/10.18524/2077-1746.2015.1\(36\).56663](https://doi.org/10.18524/2077-1746.2015.1(36).56663).
7. Левон Ф. М. Зелені насадження в антропогенно трансформованому середовищі: Монографія. Київ: ННЦ ІАЕ, 2008. 364 с.
8. Малюченко І. О., Непейна Г. В. Методичні вказівки для проведення лабораторних робіт із біології з основами біоекології для студентів спеціальності «101» Екологія» галузь знань 10 «Природничі науки» спеціальності 101 «Екологія» освітньої програми «Екологія»: методичні вказівки. Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. 112 с.
9. Недуха О. М. Клітинна оболонка і фактори середовища. Київ: Алттерпрес, 2015. 291 с.
10. Прилуцький Ю. І., Ільченко О. В., Цимбалюк О. В., Костерін С. О. Статистичні методи в біології. Київ: Наукова думка, 2017. 216 с.
11. Пушка І. М., Величко Ю. А., Осіпов М. Ю., Козаченко І. В. Еколого-біологічні особливості інтродукованих видів роду *Sedum* L. в умовах Правобережного Лісостепу України. *Таврійський науковий вісник*. 2019. № 109. Ч. 1. С. 212–218. DOI: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2019.109-1.31>.
12. Словник українських наукових і народних назв судинних рослин / Ю. Кобів. Київ: Наукова думка, 2004. 800 с.
13. Слюсар С. І. Формування генетико-екосистемної концепції в інтродукційних дослідженнях. *Інтродукція рослин*. 2017. № 3 С. 3–16. <http://www.nbg.kiev.ua/upload/introd/Intr-N3-17.pdf>.
14. Структура та розвиток культурфітоценозів Криворіжжя: монографія / за ред. Е. О. Євтушенка, В. М. Савоська. Кривий Ріг: Діонат, 2017. 168 с.
15. Терлига Н. С., Данильчук О. В., Юхименко Ю. С., Федоровський В. Д., Данильчук Н. М. Культивована дендрофлора парків і скверів Кривого Рогу: історичні аспекти формування та сучасний стан. *Вісник ХНАУ ім. Докучаєва. Серія біологія*. 2015. Вип. 2. С. 93–101. https://vbio.knau.kharkov.ua/uploads/visn_biology/2015/2_35/2015.02.093-101.Terlyga_et_al.pdf.
16. Фізична географія Криворіжжя: монографічна навчальна книга / І. С. Паранько, В. Л. Казаков, О. О. Калініченко, В. В. Кошоруба, І. О. Остапчук, В. М. Савосько, В. О. Шипунова, С. В. Ярков. Кривий Ріг: Вид. Р. А. Козлов, 2015. 272 с.
17. Чипиляк Т. Ф., Зубровська О. М., Шоль Г. Н. Рослини в урботехногенному середовищі степової зони України. Київ: Талком, 2022. 390 с. https://www.researchgate.net/publication/376488819_ROSLINI_V_URBOTENNOGENNOMU_SEREDOVISI_STEPOVOI_ZONI_UKRAINI.
18. Яковлева-Носарь С. О., Тотька Т. В. Оцінка успішності інтродукції видів роду *Sedum* L. за умов м. Енергодар. *Актуальні питання біології, екології та хімії. Електронне наукове видання*. 2018. № 2. https://sites.znu.edu.ua/bio-eco-chem-sci/issues/index.php?action=url/view&url_id=6786.
19. Balfagón D., Zandalinas S. I., Mittler R., Gómez-Cadenas A. High temperatures modify plant responses to abiotic stress conditions *Physiol Plant*. 2020. Vol. 170(3). P. 335–344. DOI: <https://doi.org/10.1111/ppl.13151>.
20. Cotoz A. – P., Dan V. – S., Gocan T. – M., Andreica I., Rózsa S., Cantor M. *Sedum* Growth Patterns under Different Pedoclimatic Conditions. *Plants*. 2023. Vol. 12. 2739. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12142739>.
21. Genera of *Crassulaceae* subfam. *Sedoideae*. United States Department of Agriculture. Germplasm Resources Information Network (GRIN). 2024. [updated 2024 May 17]. Available from: <https://www.ars-grin.gov/cgi-bin/npgs/html/gnlist.pl?1764>.
22. Koźmińska A., Al Hassan M., Wiszniewska A., Hanus-Fajerska E., Boscaiu M., Vicente O. Responses of succulents to drought: Comparative analysis of four *Sedum* (Crassulaceae) species. *Scientia Horticulturae*. 2019. Vol. 243. P. 235–242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.08.028>.

23. Mifsud S., Stephenson R., Thiede J. *Sedum album* subsp. *rupi-melitense* (Crassulaceae), a new vegetative reproducing subspecies from Malta (Maltese Islands, Central Mediterranean). *Phytotaxa*. 2015. Vol. 227(2). P. 135–146. DOI: <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.227.2.3>.
24. Rai G. K., Kumar R. R., Bagati S. *Abiotic Stress Tolerance Mechanisms in Plants*. London: CRC Press, 2021. 370 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003163831>.
25. Raunkiaer C. *The life forms of plants and statistical plant geography*. Oxford: Clarendon Press, 1934. 632 p.
26. Raza A., Ashraf F., Xiling Zou, Zhang X., Tosif H. *Plant Adaptation and Tolerance to Environmental Stresses: Mechanisms and Perspectives*. In book: *Plant Ecophysiology and Adaptation under Climate Change: Mechanisms and Perspectives* I. Hasanuzzaman M. (ed.) Springer Nature, Singapore Pte Ltd. 2020. P. 117–145. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-2156-0_5.
27. Rezaei S., Etemadi N., Nikbakht A., Yousefi M., Majidi M. M. Effect of Light Intensity on Leaf Morphology, Photosynthetic Capacity, and Chlorophyll Content in Sage (*Salvia officinalis* L.). *Korean Journal of Horticultural Science & Technology*. 2018. Vol. 36(1). P. 46–57. DOI: <https://doi.org/10.12972/kjst.20180006>.
28. Takanori Kuronuma, Hitoshi Watanabe. Physiological and Morphological Traits and Competence for Carbon Sequestration of Several Green Roof Plants under a Controlled Environmental System. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 2016. Vol. 141(6). P. 583–590. DOI: <https://doi.org/10.21273/JASHS03909-16>.
29. Van der Kolk H. – J., Van den Berg P., Korthals G. & Bezemer T. M. Shading enhances plant species richness and diversity on an extensive green roof. *Urban Ecosystems*. 2020. Vol. 23. P. 935–943. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11252-020-00980-w>.
30. Yang C., Wang X., Qin Y., Sun X., Wang Q., Lin H., Xi D. Morphological and Physiological Changes in *Sedum spectabile* during Flower Formation Induced by Photoperiod. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 2015. Vol. 43(2). P. 426–431. DOI: <https://doi.org/10.15835/nbha4329824>.

О. М. Зубровська, Т. Ф. Чипиляк

Криворізький ботанічний сад Національної академії наук України,
вул. Ботанічна, 50, м. Кривий Ріг, 50089, Україна, e-mail: zubrovska@ukr.net

ФОРМУВАННЯ ВЕГЕТАТИВНОЇ СФЕРИ ВИДІВ РОДІВ *HYLOTELEPHIUM* Н. ОНБА І *SEDUM* L. ЗА РІЗНОГО РІВНЯ ОСВІТЛЕНOSTІ

Резюме

Вступ. Для оптимізації та забезпечення стійкості насаджень на паркових територіях, які представляють значну частину рекреаційних насаджень м. Кривий Ріг, необхідно залучення трав'янистих декоративних рослин, що здатні функціонувати в умовах часткового і повного затінення. Для визначення витривалих видів необхідним є дослідження особливостей формування вегетативної сфери багаторічних рослин.

Мета роботи полягала у вивченні особливостей формування вегетативної сфери малопоширених у культурі видів родів *Hylotelephium* Н. Ohba і *Sedum* L. за різного рівня освітленості протягом сезонного розвитку в умовах Криворізького ботанічного саду Національної академії наук України.

Методика. Об'єктами дослідження були рослини *Hylotelephium ewersii* (Ledeb.) Н. Ohba, *Hylotelephium spectabile* (Boreau) Н. Ohba, *Sedum album* L., *Sedum reflexum* L. та *Sedum spurium* M. Vieb.. Були закладені ділянки у відкритому ґрунті з різним рівнем освітлення: добре освітлене місце (контрольна ділянка) – рівень освітленості в обідній час сягав 39 000–56 500 люкс; тіньова ділянка – рівень освітленості в обідній час складав 2 500–3 500 люкс. Вивчення проводили у три етапи: III декада травня, липня і вересня. Визначали коефіцієнт видовженості листка як співвідношення довжини до ширини, площу листка за методом відбитків та морфологію однорічних пагонів.

Основні результати. Визначено, що при достатньому освітленні відбувалося активне пагоноутворення – в кінці вересня у рослин *S. album* утворювалося 16 шт. пагонів II порядку, на яких по 2–4 шт. пагонів III порядку, а у *S. reflexum* – 12 шт. та 1–2 шт. відповідно. У *S. spurium* і *H. ewersii* відбувалося галуження пагонів тільки до II порядку – у вересні їх було 2–6 шт. За умов вирощування в тіні у *S. reflexum* і *S. spurium* зрідка формувалися 1–2 пагони II порядку в базальній частині генеративних пагонів, а у *S. album* – 3–7 шт. Рослини *H. ewersii* в умовах тіні не формували однорічних пагонів. Довжина пагонів за умов вирощування очитків при достатньому освітленні до вересня збільшувалася в 1,5 (*S. spurium*, *H. ewersii*) – 2,2 раза (*S. album*, *H. spectabile*). Натомість у тіні довжина однорічних вегетативних пагонів перевищувала контрольні показники у 1,6–2 раза тільки у видів роду *Sedum* (у *S. reflexum* досягала 17,8 см). В даних умовах найменші ростові показники були характерні для *H. ewersii* – у вересні 8,9 см.

Дослідження морфометричних показників розвитку листків доводить, що як на світлі, так і в умовах тіні у *S. reflexum*, *H. ewersii* *H. spectabile* на однорічному пагоні утворювалася менша кількість листків як у травні – в 1,2–1,4 раза, так і у вересні – в 1,3–3 рази. Тоді як у *S. spurium* їх було більше в 1,4 раза. Вирощування рослин у тінювих умовах призводить до достовірного зменшення площі листової поверхні, відносно показників з сонячних ділянок, у *H. spectabile* вже в травні на 35%, тоді як у *H. ewersii* майже вдвічі. У *S. reflexum* та *S. album* збільшувався коефіцієнт видовженості листків у травні в 1,2–1,6 раза, у вересні – в 2,4–2,6 раза.

Висновки. Таким чином, отримані дані свідчать, що відбуваються зміни показників росту та розвитку вегетативної сфери досліджуваних видів протягом сезонного розвитку рослин в умовах Криворізького ботанічного саду Національної академії наук України. В умовах недостатньої освітленості найменші кількісні зміни розвитку вегетативної сфери були характерні для рослин *S. album*, у яких, відносно показників з добре освітлених ділянок, довжина однорічних пагонів зменшувалася лише на 9%, а довжина міжвузль достовірно не змінювалася. На відміну від цього, у *S. spurium* довжина вегетативних пагонів у тіні була більша на 11%, ніж на світлі, але це відбувалося за рахунок подовження міжвузль на 33%, що призвело до «витягування» пагонів. При повному затіненні знижувалася декоративність рослин *S. reflexum*, у яких не тільки збільшувалася у 1,7 рази довжина міжвузль, а також зменшувалася на 40% кількість листків на одному пагоні. В умовах повного затінення найгірше «почували» себе рослини *H. ewersii*, адже ростові процеси асиміляційних органів пригнічувалися майже вдвічі і не відбувалося додаткового галуження пагонів.

Результати досліджень дозволять не лише розширити асортимент квітниково-декоративних рослин міських ландшафтів, але і визначити практичні засади їх раціонального використання. Будуть охарактеризовані перспективи їх застосування в озелененні для оптимізації витрат при виконанні робіт з реконструкції квітниково-декоративних насаджень в урболандшафтах степової зони України.

Ключові слова: декоративні очитки, рівень освітленості, система пагонів, листки, сезонний розвиток, степова зона.

O. M. Zubrovska, T. F. Chypyliak

Kryvyi Rih Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Ukraine,
50 Botanichna St, Kryvyi Rih, 50089, Ukraine, e-mail: zubrovska@ukr.net

FORMATION OF THE VEGETATIVE SPHERE OF SPECIES OF THE GENERA *HYLOTELEPHIUM* H. OHBA AND *SEDUM* L. AT DIFFERENT LEVELS OF ILLUMINATION

Summary

Introduction. To optimize and ensure the stability of plantations in park territories, which represent a significant part of recreational plantations in city Kryvyi Rih, it is necessary to implement herbaceous ornamental plants that are able to function in conditions of partial and complete shading. To determine hardy species, it is necessary to study the features of the formation of the vegetative sphere of perennial plants.

Aim. The aim of the work was to study the peculiarities of the formation of the vegetative sphere of species of the genera *Hylotelephium* H. Ohba and *Sedum* L. which are not common in culture at different levels of illumination during seasonal development in conditions of the Kryvyi Rih Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Ukraine.

Methods. The objects of the study were plants *Hylotelephium ewersii* (Ledeb.) H. Ohba, *Hylotelephium spectabile* (Boreau) H. Ohba, *Sedum album* L., *Sedum reflexum* L. and *Sedum spurium* M. Bieb.. Plots with different levels of illumination were organized outdoors: a well-lit area (control plot) – the level of illumination at lunchtime reached 39 000–56 500 lux; a shady area – the level of illumination at lunchtime was 2 500–3 500 lux. The study was conducted in three stages: the third decade of May, July and September. The elongation coefficient of the leaf was determined as the ratio of the length to the width, the area of the leaf using the method of impressions and morphology monocarpic shoots.

The main results. It was determined that with sufficient lighting, active shoot formation took place – at the end of September in *S. album* plants were formed 16 shoots of the II order and 2–4 pcs. III order shoots were formed; in *S. reflexum* – 12 pcs. and 1–2 pcs. In *S. spurium* and *H. ewersii*, the shoots branched only up to the II order – in September there were 2–6 pcs. Under the conditions of growing in the shade, *S. reflexum* and *S. spurium* occasionally formed 1–2 shoots of the II order in the basal part of generative shoots and *S. album* – 3–7 pcs. Plants of *H. ewersii* under shade conditions did not form monocarpic shoots. The length of the shoots under the conditions of growing stonecrops with sufficient lighting until September increased by 1.5 (*S. spurium*, *H. ewersii*) – 2.2 times (*S. album*, *H. spectabile*). On the other hand, in the shade, the length of monocarpic vegetative shoots exceeded the control indicators by 1.6–2 times only in species of the genus *Sedum* (in *S. reflexum* it reached 17.8 cm). Under these conditions, the smallest growth rates were characteristic of *H. ewersii* – 8.9 cm in September.

The study of morphometric parameters of leaf development proves that both in light and in shade conditions, *S. reflexum*, *H. ewersii* and *H. spectabile* formed fewer leaves on an annual shoot, both in May – 1.2–1.4 times and in September – 1.3–3 times. In contrast, *S. spurium* had 1.4 times more leaves. Growing plants in shade conditions leads to a significant decrease in leaf surface area, compared to the sunny areas in *H. spectabile* by 35% in May, while in *H. ewersii* it almost halved. In *S.*

reflexum and *S. album*, the coefficient of leaf elongation increased by 1.2–1.6 times in May and by 2.4–2.6 times in September.

Conclusions. Thus, the data obtained indicate that there are changes in the growth and development of the vegetative sphere of the studied species during the seasonal development of plants in the conditions of the Kryvyi Rih Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Ukraine. Under conditions of insufficient illumination, the smallest quantitative changes in the development of the vegetative sphere were characteristic of *S. album* plants, in which, relative to the indicators from well-lit areas, the length of monocarpic shoots decreased by only 9%, and the length of internodes did not change significantly. In contrast, in *S. spurium*, the length of vegetative shoots in the shade was 11% longer than in the light, but this was due to the lengthening of internodes by 33%, which led to “stretching” of shoots. With full shading, the decorativeness of *S. reflexum* plants decreased, in which not only the length of the internodes increased by 1.7 times, but also the number of leaves per shoot decreased by 40%. In conditions of complete shading, *H. ewersii* plants “felt” the worst, because the growth processes of assimilation organs were inhibited almost twice and there was no additional branching of shoots.

The results of the research will allow not only to expand the range of ornamental plants in urban landscapes, but also to determine the practical principles of their rational use. The prospects of their application in landscaping will be determined to optimize costs when performing work on the reconstruction of flower and ornamental plantations in the urban landscapes of the steppe zone of Ukraine.

Keywords: ornamental sedums, illumination level, shoot system, leaves, seasonal development, steppe zone.

References

1. Berezkina, V. I. (2003). Biologichni osoblyvosti introdukovanykh vydiv rodu *Sedum* L. (Crassulaceae DC.) ta perspektyvy yikh vykorystannya v Ukraini [Biological features of introduced species of the genus *Sedum* L. (Crassulaceae DC.) and prospects for their use in Ukraine] (Avtoref dis... kand. biol. nauk [Candidate's thesis in biological sciences], 26 p.), Kyiv [in Ukrainian].
2. Hanzha, D. (2012). Morfolohichna reaktsiya lystkiv topoli v riznykh umovakh urbotekhnogenoho navantazhennya [Morphological reaction of poplar leaves under different conditions of urban-technogenic loading]. *Visnyk L'vivs'koho u-tu. Seriya biologichna*, 60, 163–170 [in Ukrainian]. <http://publications.lnu.edu.ua/bulletins/index.php/biology/article/view/8393/8335>.
3. Yehorshyn, O. O. & Lisoviy, M. V. (2005). Matematychno planuvannya pol'ovykh doslidiv ta statystychna obrobka eksperymental'nykh danykh [Mathematical prediction of field experiments and statistical processing of experimental data]. Research and Educational Center, Institute of Soil Sciences and Agrochemistry [in Ukrainian].
4. Zubrovska, O. M. (2022). Osoblyvosti introduktsiyi vydiv rodu *Sedum* L. v umovakh stepovoyi zony Ukrainy. [Features of the introduction of species of the genus *Sedum* L. in the conditions of the Steppe of Ukraine]. *Ekologichni nauky*, 5(44), 191–196 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44.28>.
5. Zyman, S. M., Mosyakin, S. L., Bulakh, O. V., Tsarenko, O. M. & Fel'baba-Klushyna, L. M. (2004). Illustrated Handbook on the Morphology of Flowering Plants. Educational and Methodological Manual [Ilyustrovanyy dovidnyk z morfolohiyi kvitkovykh roslyn. Navchal'no-metodychnyy posibnyk]. Medium [in Ukrainian].
6. Kyrylenko, N. A. (2016). Osoblyvosti anatomo-morfolohichnoyi budovy Crassulaceae, yikh taksonomichne ta evolyutsiynе znachennya [Characteristics of anatomic-morphological structure of Crassulaceae, their taxonomic and evolutionary significance]. *Visnyk Odes'koho natsional'noho universytetu. Biologiya*, 20, 1(36), 37–46 [in Ukrainian]. DOI: [https://doi.org/10.18524/2077-1746.2015.1\(36\).56663](https://doi.org/10.18524/2077-1746.2015.1(36).56663).

7. Levon, F. M. (2008). Zeleni nasadzheniya v antropohenno transformovanomu seredovysshchi: Monohrafiya [Green areas in anthropogenically transformed medium: Monograph]. NNTS IAE [in Ukrainian].
8. Malyuchenko, I. O. & Nyepyeina, H. V. (2021). Metodichni vkazivky dlya provedennya laboratornykh robot iz biolohiyi z osnovamy bioekolohiyi dlya studentiv spetsial'nosti «101» Ekolohiya» haluz' znan' 10 «Pryrodnychi nauky» spetsial'nosti 101 «Ekolohiya» osvitynoi prohramy «Ekolohiya»: metodichni vkazivky [Methodological instructions for conducting laboratory work in biology with the basics of bioecology for students of the specialty «101» Ecology», branch of knowledge 10 «Natural Sciences», specialty 101 «Ecology» of the educational program «Ecology»: methodological instructions]. Vyd-vo CHNU im. Petra Mohyly [in Ukrainian].
9. Nedukha, O. M. (2015). Klitynna obolonka i faktory seredovysshcha [Plant cell wall and environment]. Al'terpres [in Ukrainian].
10. Pryluts'kyi, Yu. I., Il'chenko, O. V., Tsybalyuk, O. V. & Kosterin, S. O. (2017). Statystychni metody v biolohiyi [Statistical Methods in Biology]. Naukova dumka [in Ukrainian].
11. Pushka, I. M., Velychko, Yu. A., Osipov, M. Yu. & Kozachenko, I. V. (2019). Ekoloho-biolohichni osoblyvosti introdukovanykh vydiv rodu *Sedum* L. v umovakh Pravoberezhnoho Lisostepu Ukrayiny [Ecological and biological features of introduced species of the genus *Sedum* L. in the conditions of the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine]. Tavriys'kyi naukovy visnyk, 109, 1, 212–218 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2019.109-1.31>.
12. Kobiv, Yu. (2004). Slovyk ukrayins'kykh naukovykh i narodnykh nazv sudynnykh roslyn [Dictionary of Ukrainian scientific and folk names of vascular plants]. Naukova dumka [in Ukrainian].
13. Slyusar, S. I. (2017). Formuvannya henetyko-ekosystemnoyi kontseptsiyi v introduktsiynykh doslidzhennykh [Formation of genetic and ecosystemic conception in introduction researches]. Introduktsiya roslyn, 3, 3–16 [in Ukrainian]. <http://www.nbg.kiev.ua/upload/introd/Intr-N3-17.pdf>.
14. Yevtushenko, E.O. & Savos'ko, V. M. (2017). Struktura ta rozvytok kul'turfitotsenoziv Kryvorizhzhya: monohrafiya [Structure and development of cultural phytocenoses of Kryvyi Rih: monograph]. Dionat [in Ukrainian].
15. Terlyha, N. S., Danyl'chuk, O. V., Yukhymenko, Yu. S., Fedorovs'kyi, V. D. & Danyl'chuk, N. M. (2015). Kul'tyrovana dendroflora parkiv i skveriv Kryvoho Rohu: istorychni aspekty formuvannya ta suchasnyy stan [Kryvyi Rih parks and squares cultivated dendroflora: historical aspects of formation and current state]. Visnyk KHNAU im. Dokuchayeva. Seriya biolohiya, 2, 93–101 [in Ukrainian]. https://vbio.knau.kharkov.ua/uploads/visn_biology/2015/2_35/2015.02.093-101.Terlyga_et_al.pdf.
16. Paran'ko, I. S., Kazakov, V. L., Kalinichenko, O. O., Kotsyuruba, V. V., Ostapchuk, I. O., Savos'ko, V. M., Shypunova, V. O. & Yarkov, S. V. (2015). Fizychna heohrafiya Kryvorizhzhya: monohrafichna navchal'na knyha [Physical geography of Kryvyi Rih: monographic textbook]. Vyd. R.A. Kozlov [in Ukrainian].
17. Chypylyak, T. F., Zubrovska, O. M., Shol, H. N. (2022). Roslyny v urbotekhnogenomu seredovysshchi stepovoyi zony Ukrayiny [Plants in the urbotecnogenic environment of the steppe zone of Ukraine]. Talkom [in Ukrainian]. https://www.researchgate.net/publication/376488819_ROSLINI_V_URBOTEHNOGENOMU_SEREDOVISI_STEPOVOI_ZONI_UKRAINI.
18. Yakovlyeva-Nosar, S. O., Totska, T. V. (2018). Otsinka uspishnosti introduktsiyi vydiv rodu *Sedum* L. za umov m. Enerhodar [Assessment of the success of the introduction of species of the genus *Sedum* L. under the conditions of the city of Energodar]. Aktual'ni pytannya biolohiyi, ekolohiyi ta khimiyi. Elektronne naukove vydannya. 2 [in Ukrainian] https://sites.znu.edu.ua/bio-eco-chem-sci/issues/index.php?action=url/view&url_id=6786.
19. Balfagón, D., Zandalinas, S. I., Mittler, R. & Gómez-Cadenas, A. (2020). High temperatures modify plant responses to abiotic stress conditions. *Physiol. Plant*, 170(3), 335–344. DOI: <https://doi.org/10.1111/ppl.13151>.
20. Cotoz, A. –P., Dan, V. –S., Gocan, T. –M., Andreica, I., Rózsa, S. & Cantor, M. (2023). *Sedum* Growth Patterns under Different Pedoclimatic Conditions. *Plants*, 12, 2739. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12142739>.
21. Genera of *Crassulaceae* subfam. *Sedoideae*. United States Department of Agriculture. Germplasm Resources Information Network (GRIN). (2024). [updated 2024 May 17]. Available from: <https://www.ars-grin.gov/cgi-bin/npgs/html/gnlist.pl?1764>.
22. Koźmińska, A., Al Hassan, M., Wiszniewska, A., Hanus-Fajerska, E., Boscaiu, M. & Vicente, O. (2019). Responses of succulents to drought: Comparative analysis of four *Sedum* (Crassulaceae) species. *Scientia Horticulturae*, 243, 235–242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.08.028>.

23. Mifsud, S., Stephenson, R. & Thiede J. (2015). *Sedum album* subsp. *rupi-melitense* (Crassulaceae), a new vegetative reproducing subspecies from Malta (Maltese Islands, Central Mediterranean). *Phytotaxa*, 227(2), 135–146. DOI: <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.227.2.3>.
24. Rai, G. K., Kumar, R. R. & Bagati, S. (2021). *Abiotic Stress Tolerance Mechanisms in Plants*. CRC Press. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003163831> 25.
25. Raunkiaer, C. (1934). *The life forms of plants and statistical plant geography*. Clarendon Press.
26. Raza, A., Ashraf, F., Xiling, Zou, Zhang, X. & Tosif, H. (2020). *Plant Adaptation and Tolerance to Environmental Stresses: Mechanisms and Perspectives*. In book: *Plant Ecophysiology and Adaptation under Climate Change: Mechanisms and Perspectives I*. Hasanuzzaman M. (ed.) Springer Nature, Singapore Pte Ltd. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-2156-0_5.
27. Rezai, S., Etemadi, N., Nikbakht, A., Yousefi, M. & Majidi M.M. (2018). Effect of Light Intensity on Leaf Morphology, Photosynthetic Capacity, and Chlorophyll Content in Sage (*Salvia officinalis* L.). *Korean Journal of Horticultural Science & Technology*, 36(1), 46–57. DOI: <https://doi.org/10.12972/kjst.20180006>.
28. Takanori Kuronuma, Hitoshi Watanabe. (2016). *Physiological and Morphological Traits and Competence for Carbon Sequestration of Several Green Roof Plants under a Controlled Environmental System*. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 141(6), 583–590. DOI: <https://doi.org/10.21273/JASHS03909-16>.
29. Van der Kolk, H. – J., Van den Berg, P., Korthals, G. & Bezemer, T. M. (2020). Shading enhances plant species richness and diversity on an extensive green roof. *Urban Ecosystems*, 23, 935–943. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11252-020-00980-w>.
30. Yang, C., Wang, X., Qin, Y., Sun, X., Wang, Q., Lin, H. & Xi, D. (2015). Morphological and Physiological Changes in *Sedum spectabile* during Flower Formation Induced by Photoperiod. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 43(2), 426–431. DOI: <https://doi.org/10.15835/nbha4329824>.

УДК 634.71:58.056: 581.52 (477.63)

[https://doi.org/10.18524/2077-1746.2024.2\(55\).320487](https://doi.org/10.18524/2077-1746.2024.2(55).320487)

Ю. С. Юхименко, н.с., к.б.н.; <https://orcid.org/0000-0001-9510-9153>

О. В. Данильчук, м.н.с., к.б.н.; <https://orcid.org/0009-0005-4909-1729>

Л. І. Бойко, с.н.с., к.б.н.; <https://orcid.org/0000-0002-1812-5114>

Криворізький ботанічний сад НАН України

Відділ інтродукції та акліматизації рослин, вул. Ботанічна, 50, м. Кривий Ріг, 50089, Україна, e-mail: yukhimenkoj@gmail.com

ВПЛИВ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН НА ПОЧАТОК ЦВІТІННЯ ДЕРЕВНИХ РОСЛИН У СТЕПОВІЙ ЗОНІ УКРАЇНИ

З'ясовано, що впродовж 1997–2023 рр. середньорічна температура повітря в умовах Криворіжжя підвищилась на 1,0 °С, річна кількість опадів зменшилась на 32,6 мм (27%). Виявлено, що кліматичні зміни призвели до переміщення фази початку цвітіння на більш ранні строки у п'яти видів листопадних дерев та кущів, які зростають у колекційних насадженнях Криворізького ботанічного саду НАН України. Найбільше зміщення у фенодатах виявлено у *Tilia cordata* Mill. (в середньому на 5 діб).

Ключові слова: кліматичні зміни, цвітіння, деревні рослини, Степова зона, Кривий Ріг.

Сучасні зміни клімату формують новий ракурс фенологічних досліджень, тому як сезонні ритми рослин в багаторічному аспекті є важливою характеристикою стану та функціонування екосистем [6, 41, 42]. Сезонні ритми розвитку беруть участь у пристосованості рослин до умов довкілля і є адаптивною ознакою, схильною до швидкого розвитку в умовах нестабільного клімату, та ключовою рисою у формуванні розподілу видів [19]. Кліматичні зміни впливають на сезонні процеси рослин і викликають переміщення фенодат, що підтверджується багатьма дослідниками [25, 29, 32, 35, 38, 41]. Подальше потепління клімату може вплинути на біорізноманіття певного місцезростання, та цілком ймовірно, що деякі види, як аборигенні, так і інтродуковані, можуть за таких умов отримати переваги для свого розселення, або, навпаки, привести до зникнення [19, 41]. Існують свідчення того, що кліматичні зміни останніх десятиліть виявилися сприятливими для деяких видів і дозволили їм розповсюджуватися в регіони, де раніше вони не мали шансів на виживання й відтворення. У європейських розплідниках зростають численні види та культивари, які в останні десятиріччя виживають в регіонах на 1000 км північніше, ніж вони раніше могли бути висаджені, наслідком чого може бути значна зміна складу та структури дендронасаджень в урбанізованому середовищі [42].

За даними відомих учених-кліматологів у ХХ ст. відбулося підвищення температури повітря Землі на 0,3–0,6°С, і цей період потепління є досить довгостроковим [21, 22, 27]. Температурні зміни повітря в Степовій зоні України

відбуваються приблизно так, як і в цілому на планеті [4, 16]. У другій половині 1940-х років середньорічна температура повітря становила 7,8°C, у 1990-х роках – 8,4°C, 2000–2010 рр. – 9,1°C, у 2010–2020 рр. – 10,5°C [12].

Моделювання характеру клімату для території України свідчить про те, що зростання температури повітря загалом й надалі триватиме. Подальша зміна кількості опадів протягом року призводитиме до зміщення кліматичних сезонів, зміни тривалості вегетаційного періоду рослин, зменшення тривалості залягання стійкого снігового покриву, зміни водних ресурсів місцевого стоку тощо. Збереження різноманіття видів деревно-кущових рослин за наявності кліматичних змін передбачає їх адаптацію на основі генетичної та фенотипічної варіативності, тому актуальним є вивчення особливостей пристосування рослин до кліматичних факторів певних місцезростань. Небажані наслідки впливу глобального потепління у сполученні з дією аерополітантів в умовах промислового міста можна виявити методом фенології, яка пов'язана з екологічними, фізіологічними, біохімічними процесами тощо [7]. Водний дефіцит, викликаний частими посухами і високою температурою повітря впродовж майже всього вегетаційного періоду, призводить до дисбалансу у функціонуванні рослинного організму. Тому важливо визначити відповідну реакцію деревних рослин на глобальні кліматичні зміни і аналітично оцінити їх стан в сучасних екологічних умовах. Цільове використання дендрологічних ресурсів з урахуванням кліматичних змін, наслідків техногенезу і соціально-економічного розвитку промислових регіонів Степової зони України представляється одним з напрямків вирішення проблеми призупинення прогресуючої деградації ландшафтів та оптимізації довкілля. Такі дослідження дозволять поглибити теоретичні основи адаптації деревних рослин та розробити критерії добору рослин з підвищеною толерантністю до мінливих умов середовища місцезростання видів [8].

Виходячи з цього, актуальним залишається визначення впливу кліматичних змін в умовах степової зони України на феноритміку деревних рослин.

Мета роботи – вивчення впливу кліматичних змін на початок цвітіння деревних рослин в умовах промислового регіону Степової зони України.

Матеріали і методи

Матеріалом для дослідження початку цвітіння рослин, яке проводилося з 1997 по 2023 роки, слугували п'ять видів листопадних деревних рослин, які зростають в колекції Криворізького ботанічного саду НАН України: *Acer platanoides* L., *Tilia cordata* Mill., *Forsythia europaea* Degen & Bald., *Spiraea × vanhouttei* (Briot) Zabel, *Crataegus submollis* Sarg. Було обрано по 25 екз. кожного виду віком 30–35 років.

Визначення початку фази цвітіння Ц4 визначали за такою ознакою – віночок квітки повністю розкрився, дата фіксується при розкриванні перших квіток. Фенодати фаз цвітіння обраних видів аналізували методом переводу дат у

безперервний ряд чисел починаючи з першого березня. Динаміка температур упродовж 1997–2023 рр. досліджувалась за даними інтернет-ресурсу [12], де були взяті середньодобові, середньомісячні, середньорічні температури повітря (°C) і суми опадів (мм). Дані з накопичення позитивних (понад 0 °C), ефективних (понад 5 °C) та активних температур (понад 10 °C) характеризували методом їх додавання після стійкого переходу середньодобових температур через 0, 5, 10°C.

Кривий Ріг належить до регіонів з дуже сильним техногенним навантаженням, де головною містоутворюючою галуззю є чорна металургія. Висока концентрація виробництва на обмеженому просторі зумовлює складну екологічну ситуацію, яка поглиблюється посушливістю кліматичних умов. Територія Криворіжжя розташована в Степовій зоні, Північностеповій підзоні [9]. Клімат Криворізького регіону недостатньо зволожений з амплітудою абсолютних температур більше 70 °C.

Сума опадів за вегетаційний період складає близько 250 мм, а за рік – 400–460 мм. Середній показник випаровування для Кривого Рогу становить 740 мм, а середній коефіцієнт зволоження – 0,54. Вищенаведені дані характеризують цей регіон як територію з недостатнім і нестійким зволоженням. Сумарний річний дефіцит зволоження складає в середньому 481 мм [5]. Вегетаційний період в Північностеповій підзоні України (з температурою вище +5 °C) за даними гідрометеослужби триває 215–220 днів.

Коефіцієнт варіації розраховували за формулою:

$$CV = \sigma/M,$$

де σ – середнє квадратичне відхилення, M – середнє значення. Середнє квадратичне відхилення (σ) розраховували як квадратний корінь з дисперсії.

Рівняння лінії тренду та достовірність їх апроксимації (R^2), а також значення непараметричного коефіцієнту кореляції Спірмена розраховували за допомогою програми Exell 2016.

Результати дослідження та їх обговорення.

Аналіз отриманих даних стосовно сезонного ритму розвитку в умовах Криворіжжя дозволив встановити, що *Forsythia europaea* зацвітає наприкінці березня – на початку квітня (табл. 1). Дещо пізніше ця фаза спостерігається у *Acer platanoides*, в основному, у другій половині квітня. Початок цвітіння у *Crataegus submollis* найчастіше відбувається у третій декаді квітня, *Spiraea × vanhouttei* – у першій декаді травня, *Tilia cordata* – третій декаді травня – першій декаді червня.

Варіабельність середніх багаторічних величин проаналізованої фенодати у різних видів в умовах Степу України незначна і, як правило, не перевищує 6–10 днів (середнє квадратичне відхилення коливається від 4,3 до 10,0 залежно від виду). Ступінь розсіювання дат початку цвітіння видів можна класи-

фікувати як середній, однак у видів *Tilia cordata*, *Crataegus submollis*, *Spiraea* × *vanhouttei* коефіцієнт варіації наближується до незначного (5,3–7,4%) в порівнянні з *Forsythia europaea* (30%), що говорить про більшу залежність ранньоквітучих рослин від метеопоказників березня. Чим більше значення σ , тим більше варіабельність фази, ширше амплітуда її мінливості. Менші значення σ характеризують стабільність настання строків початку фази і говорять про значний консерватизм рослин. В першому випадку (високі значення σ) рослинам притаманна достатня пластичність, що дозволяє їм пристосуватися до нових умов [2].

Таблиця 1

**Середньорічні дати початку цвітіння деяких видів дерев та кущів
в умовах Криворіжжя (27 років спостережень)**

Вид	n	Початок цвітіння			
		Середня дата (1997–2023 рр.)	Межі	σ	CV,%
<i>Acer platanoides</i>	25	15.04±1,00	10.04 – 1.05	5,1	11,0
<i>Crataegus submollis</i>	25	28.04±0,84	20.04–8.05	4,3	7,4
<i>Forsythia europaea</i>	25	5.04±2,05	20.03 – 20.04	10,0	30,0
<i>Spiraea</i> × <i>vanhouttei</i>	25	7.05±0,69	1.05 – 13.05	3,6	5,3
<i>Tilia cordata</i>	25	30.05±1,06	21.05–10.06	5,5	6,0

Найбільша різниця між найраннішими та найпізнішими датами початку цвітіння визначена у *Forsythia europaea* – 30 днів, тоді як у *Acer platanoides* – 21 день, *Crataegus submollis* та *Tilia cordata* – 18 днів, *Spiraea* × *vanhouttei* – 12 днів.

Оцінка погодних флуктуацій за 27 років спостережень (1997–2023 рр.) показала підвищення середньомісячної температури повітря майже у всіх місяцях (табл. 2). Різниця між показниками становить від 0,6 °C до 1,5°C. Найвідчутніший вплив на початок вегетації та цвітіння чинять метеоумови лютого та березня, які значно потеплішали, а найбільше серед весняних місяців потеплішав травень, у якому в окремі роки вже починаються посухи. Без суттєвих змін температурного режиму залишились січень та жовтень.

Середня річна температура повітря за 2010–2023 рр. збільшилась на 1,0 °C порівняно з періодом 1997–2009 рр.

Середні значення суми опадів впродовж останніх 27 років знизилась у червні на 21,4 мм, у березні, липні, серпні, жовтні – на 4,3 – 9,7 мм (табл. 1). Збільшення кількості опадів відмічено у квітні на 24 мм, у січні, лютому, травні, грудні – на 0,4 – 5,2 мм. Такий перерозподіл опадів призвів до більшого зволо-

Таблиця 2

**Зміни кліматичних показників для Криворіжжя
упродовж 1997–2023 рр.**

Місяць	Середня температура повітря, °С			Сума опадів, мм ²		
	1997–2009	2010–2023	Різниця	1997–2009	2010–2023	Різниця
I	-2,9	-3,5	-0,6	29,7	30,1	+0,4
II	-2,1	-1,1	+1,0	26,9	27,9	+1,0
III	2,8	3,7	+0,9	35,8	26,1	-9,7
IV	10,1	10,7	+0,6	22,0	46,0	+24,0
V	15,8	17,1	+1,3	49,0	54,2	+5,2
VI	19,8	21,6	1,8	69,7	48,3	-21,4
VII	22,5	23,1	+0,6	59,1	49,8	-9,3
VIII	21,7	23,3	+1,6	35,9	31,6	-4,3
IX	15,4	17,2	+1,8	42,7	33,3	-9,4
X	9,5	9,8	+0,3	35,4	29,7	-5,4
XI	2,9	4,2	+1,3	39,8	32,0	-7,8
XII	-1,7	0,3	+2,0	32,3	36,7	+4,4
За рік	9,5	10,5	1,0	478,3	445,7	32,6

ження у зимовий та весняний період, а в літньо-осінній період – до поглиблення посушливості погодних умов та аномальних температурних проявів.

Для отримання більш узагальненої інформації з флуктуацій метеорологічних даних за період з 1997 по 2023 рр. були побудовані графіки температурного та вологого режимів (рис. 1, 2).

Рисунок 1 демонструє поступове збільшення середньорічних та середньомісячних температур березня з 1997 року, що відбувається здебільшого за рахунок потепління серпня, вересня та грудня. Лінія тренду для середньорічної температури повітря описується рівнянням $Y = 0,0944x + 8,8046$, достовірність апроксимації $R^2 = 0,6546$. Значний вплив на початок вегетаційного періоду та зв'язаної з ним фази цвітіння деревних рослин чинять метеорологічні умови березня. Лінія тренду для температури у цьому місяці описується рівнянням $Y = 0,1232x + 1,6826$, достовірність апроксимації $R^2 = 0,139$. Збільшення се-

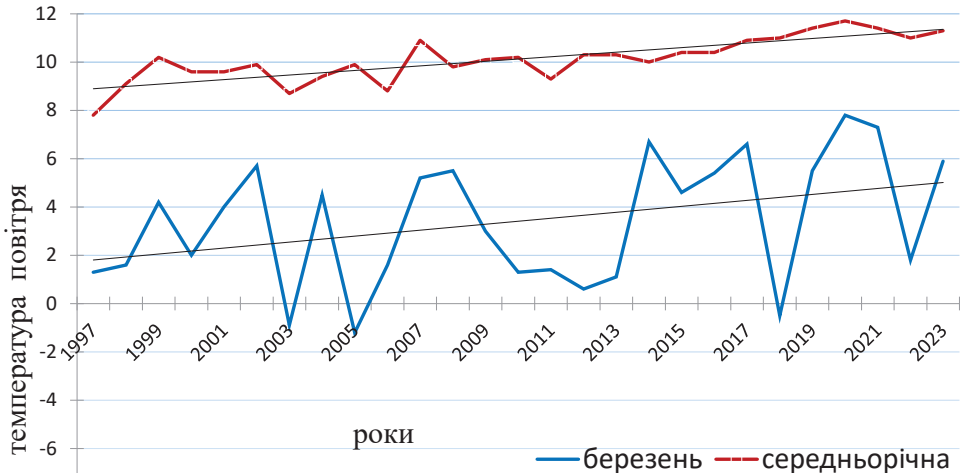


Рис. 1. Зміни середньої температури повітря (°C) за рік та березень у 1997–2023 рр. (м. Кривий Ріг, Дніпропетровська обл.)

редньомісячної температури повітря у березні за цей період становить 0,9 °C (24%), за одиничним винятком (-0,5 °C у 2018 році) вона стає плюсовою.

На тлі збільшення температури повітря відбувається зменшення кількості опадів (рис. 2). Лінія тренду для річної кількості опадів описується рівнянням $Y = -6,9073x + 519,68$, достовірність апроксимації $R^2 = 0,1796$. У 1997–2010 рр.

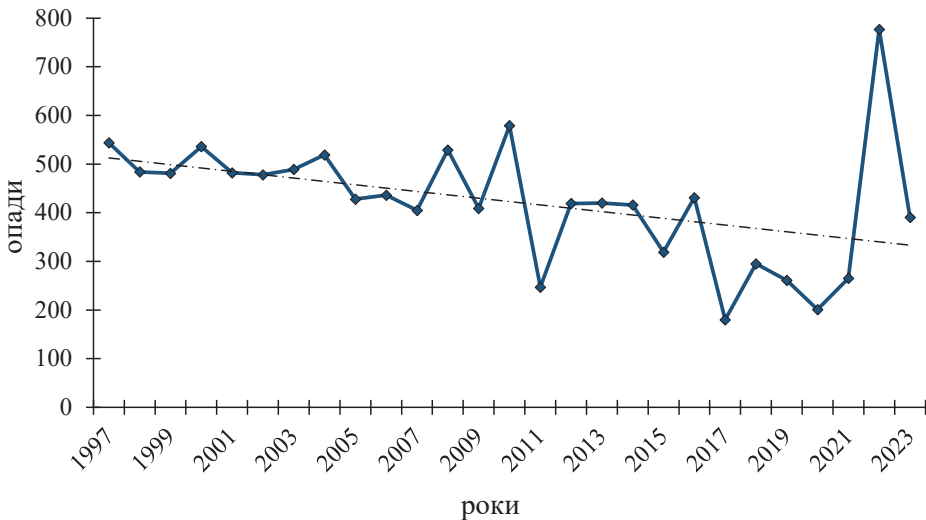


Рис. 2. Зміни суми опадів (мм) за рік, 1997–2023 рр. (м. Кривий Ріг, Дніпропетровська обл.)

кількість опадів зменшилася на 27 % порівняно з 2011–2023 рр (табл. 1). Водночас, у 2022 р зафіксовано максимальну кількість опадів (777,4 мм), яка контрастує з мінімальною у 2017 році (180,0 мм). Найпосушливішими виявилися 2017–2021 рр., коли річні суми опадів коливалися у межах 180,0–295,0 мм. Отже, амплітуда річної кількості опадів зростає, починаючи з 2009 року, але тенденція до поглиблення посушливості кліматичних умов зберігається. Особливо критичним для рослин є недостатня кількість опадів у липні-вересні за умов максимально високих температур повітря. Так, у 2018 році у серпні не було жодного дощу за максимальної температури місяця 37,2 °С, а у вересні-жовтні кількість опадів склала лише 18,2 мм.

Відомості про зміни показників середньомісячної температури та кількості опадів за роками та місяцями свідчать про досить різкі відмінності та відхилення від середніх багаторічних величин. У липні-серпні кількість днів з температурними максимумами вище 35°C буває більше 10, що посилює випаровування. В окремі роки температура повітря може підніматися до 37–40 °С, а середньомісячна температура повітря при цьому перевищує норму на 4–5 °С. Відносна мінімальна вологість повітря може знижуватися до 35–40%, що менше від норми на 20–35%.

Підвищення температури повітря упродовж 1997–2023 рр. вплинуло на дати настання цвітіння досліджуваних видів. Рівняння лінії тренду початку цвітіння для *Forsythia europaea* $Y = -0,3761x + 39,821$, *Acer platanoides* $Y = -0,1838x + 48,313$, *Crataegus submollis* $Y = -0,0958x + 60,305$, *Tilia cordata* $Y = -0,4731x + 97,587$, *Spiraea × vanhouttei* $Y = -0,1172x + 69,53$ (рис. 3). Достовірність апроксимації (R^2) ліній тренду графіків, побудованих для *Tilia cordata* найвища і становить 0,4659. Для *Forsythia europaea*, *Acer platanoides*, *Crataegus submollis*, *Spiraea × vanhouttei* показник менший і становить 0,0769; 0,0759; 0,0293 і 0,0668 відповідно, однак основна тенденція переміщення дат початку цвітіння на більш ранні строки зберігається. При порівнянні середніх багаторічних дат настання цвітіння у 2010–2023 рр. відбувалось раніше за період 1997–2009 рр. у *Forsythia europaea* у середньому на 1,15 доби, *Acer platanoides* – на 1,4 доби, *Spiraea × vanhouttei* – 0,95 доби, *Crataegus submollis* – 0,8 доби, *Tilia cordata* – 5 діб. Отже, у *Tilia cordata* виявлено найбільше переміщення фенодати початку цвітіння, що підтверджується найвищим значенням апроксимації лінії тренду з мінімальною амплітудою її коливань (рис. 3). Найменші переміщення виявлені у *Spiraea × vanhouttei* та *Crataegus submollis*, в яких значення апроксимації мінімальні.

Настання фенологічних фаз у рослин має зв'язок із накопиченням позитивних (вище 0°C), ефективних (вище 5°C) та активних температур (вище 10°C), на що вказують і інші дослідники [3, 11]. Найменшої суми вказаних температур для початку цвітіння потребує *Forsythia europaea*, найбільшої – *Tilia cordata* (табл. 3). Без накопичення ефективних температур вище 5°C може вступати до фази цвітіння *Forsythia europaea*, вище 10°C – *Acer platanoides*, *Crataegus submollis*.

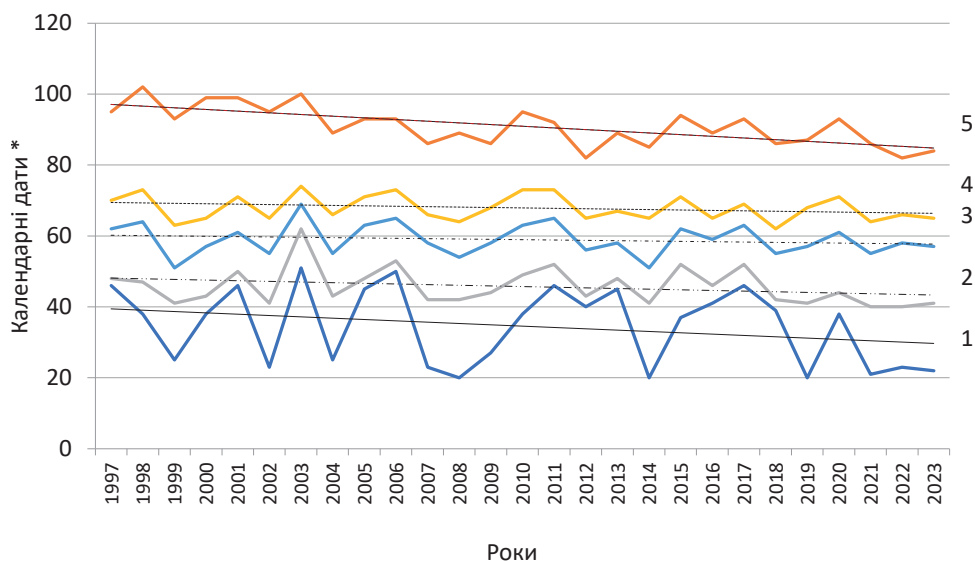


Рис. 3. Початок цвітіння деяких дерев та кущів з лініями трендів в умовах Криворіжжя: 1 – *Forsythia europaea*, 2 – *Acer platanoides*, 3 – *Crataegus submollis*, 4 – *Spiraea × vanhouttei*, 5 – *Tilia*, * фенодати переведені у безперервний ряд чисел починаючи з першого березня

Таблиця 3

Суми температур вище 0°C, 5°C, 10°C на початок цвітіння
(27 років спостережень)

Вид	Сума середньодобових температур на початок цвітіння			
	Середня дата (1997–2023 рр.)	>0 °C	>5 °C	>10 °C
<i>Forsythia europaea</i>	5.04	$\frac{69,4-385,5^*}{199,09^{**}}$	$\frac{0-284,1}{113,78}$	$\frac{0-165,8}{33,4}$
<i>Acer platanoides</i>	15.04	$\frac{132,6-421,8}{258,21}$	$\frac{40,8-257,0}{168,37}$	$\frac{0-175,3}{41,77}$
<i>Crataegus submollis</i>	28.04	$\frac{295,7-607,7}{392,57}$	$\frac{139,1-487,6}{306,34}$	$\frac{0-308,9}{145,79}$
<i>Spiraea × vanhouttei</i>	7.05	$\frac{443,7-789,5}{559,18}$	$\frac{338,8-732,6}{465,74}$	$\frac{85,7-414,6}{291,94}$
<i>Tilia cordata</i>	30.05	$\frac{687,4-1059,0}{866,49}$	$\frac{630,5-991,3}{780,07}$	$\frac{372,9-878,9}{609,26}$

Примітка *: межі значень суми температур, ** середнє значення сум температур

Кліматичні зміни впродовж 1997–2023 рр. призвели до більш ранніх строків початку накопичення ефективних (вище 5 °C) та активних (вище 10 °C) температур повітря. У 2010–2023 рр. порівняно з 1997–2009 рр. відмічено зменшен-

ня суми ефективних (на 1,3–8,2 %) та активних (на 3,4–15,2 %) температур на початок цвітіння у всіх досліджених видів. Це говорить про накопичення тепла ще до стійкого переходу через 5 °C та 10 °C, тобто про потепління зимового та рановесняного періодів. Дуже теплі зимові місяці можуть привести до переміщення фенологічних дат на більш ранній термін не зважаючи на температурний режим навесні [24, 31, 33].

За допомогою коефіцієнта кореляції Спірмена була визначена залежність між настанням фенофази початку цвітіння та сумою температур вище 0 °C, 5 °C, 10 °C (табл. 4). У всіх видів встановлений прямий кореляційний зв'язок, крім *Spiraea × vanhouttei*, в якій він є зворотнім у випадку з накопиченням температур вище 0 °C та 10 °C. Достовірним є прямий зв'язок з сумою температур вище 5 °C у *Acer platanoides*, *Crataegus submollis* *Tilia cordata*, а також вище 0 °C – у *Tilia cordata*.

Таблиця 4

**Залежність початку цвітіння від кліматичних факторів
за період 1997–2023 рр.**

Вид	n	Перехід середньодобової температури			Сума температур на день початку цвітіння		
		>0 °C	>5 °C	>10 °C	>0 °C	>5 °C	>10 °C
<i>Acer platanoides</i>	25	0,290	0,163	0,051	0,275	0,482*	0,120
<i>Crataegus submollis</i>	25	0,260	0,056	0,274	0,314	0,643**	0,118
<i>Forsythia europaea</i>	25	0,546**	0,349	-0,028	0,09	0,257	0,029
<i>Spiraea × vanhouttei</i>	25	0,083	0,016	0,375	-0,039	0,074	-0,413
<i>Tilia cordata</i>	25	0,278	-0,019	0,090	0,554**	0,588**	0,325

Примітка: * p < 0,05; ** p < 0,01.

Також виявлено кореляційну залежність між датами початку цвітіння та датами переходу середньодобової температури через 0 °C, 5 °C, 10 °C (табл. 4), де достовірним значення є лише у *Forsythia europaea* у випадку з переходом через 0 °C. Зворотній зв'язок з переходом через 10 °C виявлено у *Forsythia europaea* та через 5 °C – у *Tilia cordata*.

Отже, погодні умови Криворіжжя стають дедалі теплішими та сухішими. Підвищення посушливості кліматичних умов все більше буде поглиблювати процеси ксерофітизації деревної рослинності, призводити до зміни життєвої форми та біометричних параметрів, патологічних змін росту крон та стовбурів [13, 14]. Поряд з цим на тлі зниження життєвого стану рослин будуть зростати їх ураження фітопатогенами та ентомошкідниками, що буде викликати патології різного характеру [1]. Такі процеси передбачають перегляд існуючого

списку видів та культиварів, перспективних для інтродукції в степовий регіон, розширення та зміну діапазону критеріїв відбору.

Про вплив кліматичних змін на сезонні ритми розвитку вказується у низці робіт українських дослідників [10, 11, 20, 39]. У трав'янистих рослин здебільшого подовжується термін квітання та тривалість вегетаційного періоду, а також змінюються морфологічні параметри [20, 39]. У деревних рослин простежується переміщення весняних фенодат на більш ранні терміни, зокрема початок вегетації, початок цвітіння [10, 11]. Весняні фенологічні процеси більш чутливі до змін температурного режиму, тому відчують найсильнішу трансформацію порівняно з іншими сезонами [26, 29, 34]. Найінформативнішою фенофазою щодо впливу кліматичних змін на рослини є фаза початку цвітіння [10, 18]. Дослідження початку цієї фази у дев'яти видів гарноквітучих деревних кущів в умовах Лісо-Степової зони України (Київ) показали значні переміщення на більш ранні терміни упродовж останніх 60 років [11]. Подібна тенденція щодо початку цвітіння була встановлена для чотирьох видів деревних рослин в Степовій зоні України (Артемівськ), де термін дослідження становив 17 років [10].

Висновки

Згідно з метеорологічними даними в умовах Криворіжжя за період 1997–2023 рр. відбулося поступове збільшення середньорічної температури на 1,0 °С. Потепління клімату як в Україні, так і в інших регіонах планети, підтверджується численними визначеннями вчених-кліматологів.

Виявлені залежності фенодат від кліматичних змін показали, що фаза цвітіння у деревних рослин у колекції Криворізького ботанічного саду НАН України перемістилась на більш ранні терміни.

Сума позитивних температур для кожного окремого виду залишилась незмінною, а суми ефективних та активних температур стали навіть меншими, що говорить про їх накопичення ще до стійкого переходу середньодобової температури через 0°C, 5°C, 10°C, тобто спостерігається потепління зимового та рановесняного періодів.

Кореляційний аналіз між початком цвітіння і сумою температур виявив статистично значущу залежність від температур вище 5 °C у *Acer platanoides*, *Crataegus submollis*, *Tilia cordata*.

Стаття надійшла до редакції 24.07.2024

Список використаної літератури

1. Бойко Т.О. Фітосанітарний стан зелених насаджень м. Херсон. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2020. 30 (4). С. 67–72. DOI: <https://doi.org/10.36930/40300412>.
2. Булах П. Е. Фенологические критерии устойчивости в интродукции растений. *Интродукция растений*. 2005. № 4. С. 9–19. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/IR_2005_4_3.
3. Васюк С.А., Мороз П.А. Интродукция маслинки багатоквіткової (*Elaeagnus multiflora* Thunb.) в Лісостепу України. Повідомлення 1. Морфологічні особливості та сезонний розвиток. *Интродукция растений*. 2005. №2. С. 17–20. URL: <http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0001036888>

4. Дідух Я.П. Екологічні аспекти глобальних змін клімату: Причини, наслідки, дії. *Вісник НАН України*. 2009. № 2. С. 34–44. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vnanu_2009_2_12.
5. Досвід комплексної оцінки та картографування факторів техногенного впливу на природне середовище міст Кривого Рогу та Дніпродзержинська / І.Д. Багрій, А.М. Білоус, Ю.Г. Вилкул та ін.; відпов. ред. В.М. Палій. Інститут геологічних наук НАН України. К.: Фенікс, 2000. 110 с.
6. Єремєєв В. М. Регіональні аспекти глобальної зміни клімату. *Вісник НАН України*. 2003. № 2. С. 24–28. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vnanu_2003_2_3.
7. Зайцева І.О., Долгова Л.Г. Фізіолого-біохімічні основи інтродукції деревних рослин в Степовому Придніпров'ї: монографія. Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту, 2010. 388 с.
8. Закономірності адаптації аборигенних та інтродукованих видів деревних рослин до мінливих умов Степового Придніпров'я / Ю. В. Лихолат, Н.О. Хромих, Л.В. Шупранова, І.М. Коваленко, В.С. Феденко, А.А. Алексєєва. Суми: ФОП Цьома, 2018. 186 с.
9. Маринич О.М., Пархоменко Г.О., Петренко О.М., Шищенко П.Г. Удосконалена схема фізико-географічного районування України. *Український географічний журнал*. 2003. № 1. С. 16–20.
10. Меженський В.М. Кліматичні зміни та їх вплив на деревні рослини на південному сході України. *Промышленная ботаника*. 2009. № 9. С. 56–59. URL: <https://harvester.nas.gov.ua/Record/irk-123456789-9179>.
11. Олексійченко Н.О., Бреус Н.Ю. Залежність початку цвітіння гарнокрітучих кущів від кліматичних змін у районі міста Києва. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*. 2013. Вип. 11. С. 126–129. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nplanu_2013_11_21.
12. Сайт погоди. Електронний ресурс. <http://rp5.ua>.
13. Суслєва О.П., Бойко Л.І. Життєвий стан видів роду *Acer* L. в урбосистемах Степової зони України. *Екологічні науки*. 2023. №6 (51). С. 196–201. DOI 10.32846/2306-9716/2023.eco.6-51.3.
14. Юхименко Ю.С. Таксономічний склад і загальний стан роду (*Malus* L.) в колекції Криворізького ботанічного саду НАН України. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2023. Т. 33. №6. С. 7–12. DOI: 10.36930/40330601.
15. Bahuguna R.N. Jagadish K.S.V. Temperature regulation of plan phenological development. *Environmental and Experimental Botany*. 2015. № 111. P.83–90. DOI:10.1016/j.envexpbot.2014.10.007.
16. Boychenko S., Voloshchuk V., Movchan Y., Serdjuchenko N., Tkachenko V., Tyshchenko O., Savchenko S. Features of climate change on Ukraine: scenarios, consequences for nature and agroecosystems. *Proceedings of the National Aviation University*. 2016. №4 (69). P. 96–113. DOI: 10.18372/2306-1472.69.11061.
17. Bramwell D. Plant adaptation and climate change. In: 2nd World Scientific Congress Challenges in Botanical Research and Climate Change (29 Juni - 4 July 2008). Programme Book of abstract. The Netherlands, Delft. 2008. 3 pp.
18. Buonaiuto, D. M. & E. M. Wolkovich. Differences between flower and leaf phenological responses to environmental variation drive shifts in spring phenological sequences of temperate woody plants. *Journal of Ecology*. 2021. №109. С. 2922–2933. DOI:10.1111/1365-2745.13708.
19. Chuine I. Why does phenology drive species distribution? *Philosophical transactions of the Royal Society B*. 2010. №365. P. 3149–3160. DOI: 10.1098/rstb.2010.0142.
20. Chypyliak T., Zubrovska O. Features of development of species of the genus *Veronica* L. in the conditions of steppe zone of Ukraine. *The Journal of Slovenian Academy of Sciences and Arts, Scientific Research Centre, Institute of Biology. Hacquetia*. 2022. №21 (1). P. 223–233. DOI: 10.2478/hacq-2021-0025.
21. Climate Change. The Physical Science Basis. – Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Changes UNEP/WMO, 2013. 1552 p. URL: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.
22. Climate Change. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. 2014. 151 p. URL: <http://www.weadapt.org>.
23. Cook, B.I., Wolkovich, E.M. & C. Parmesan. Divergent responses to spring and winter warming drive community level flowering trends. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2012. 109 (3). P. 9000–9005. DOI: 10.1073/pnas.111836410.
24. Dentec C.F., Vitasse Y., Bonhomme M., Louvet J. M., Kremer A., Delson S. Chilling and heat requirements for leaf unfolding in European beech and sessile oak populations at the southern limit of their distribution range. *J. Biometeorol.* 2013. №58 (9). P. 1853–1864. DOI 10.1007/s00484-014-0787-z.
25. Dikin E., Proctor H., Jebb M., Sparks T., Donnelly A. The phenology of *Rubus fruticosus* in Ireland: herbarium specimens provide evidence for the response of phenophases to temperature, with implications for climate warming. *International Journal of Biometeorology*. 2012. № 56. P. 1103. DOI:10.1007/s00484-012-0524-z.

26. Ellwood E.R., Temple S.A., Primack R.B., Bradley N.L., Davis C. C. Record-breaking early flowering in the Eastern United States. *PLoS ONE*. 2013. DOI: 10.1371/journal.pone.0053788.
27. Fischlin A. Concern on climate Change // *2nd World scientific Congress/ Challenges in Botanical Research and Climate Change*. Programme Book of abstract. 29 Juni – 4 July 2008. Delft, The Netherlands. 2.
28. Fyfe J.C., Gillett N.P. and Zwiers F.W. (2013) Overestimated Global Warming over the Past 20 Years. *Nature Climate Change*. №3. P. 767-769. DOI: 10.1038/nclimate1972
29. Gordo O., Jose J. Impact of climate change on plant phenology in Mediterranean ecosystems. *Global Change Biology*. 2010. Vol. 16. P. 1082– 1106. DOI:10.1111/j.1365-2486.2009.02084.x.
30. Harfouche A., Meilan R., Alman A. Molecular and physiological responses to abiotic stresses in forest trees and their relevance to tree improvement. *Tree Physiology*. 2014. № 34 (11). P. 1181–1198. DOI: 10.1093/treephys/tpu012.
31. Heide O.M. High autumn temperature delays spring bud burst in boreal trees counterbalancing the effect of climatic warming. *Tree Physiol*. 2003. Vol. 29. P. 931– 936. DOI: 10.1093/treephys/23.13.931.
32. Ikovich E. M., Cook B. I., Allen J. M., Crimmins T. M., Betancourt J. L., Travers S. E., Pau S., Regetz J., Davies T. J., Kraft N. J., Ault T. R., Bolmgren K., Mazer S. J., McCabe G. J., McGill B. J., Parmesan C., Salamin N., Schwartz M. D., Cleland E. E. Warming experiments underpredict plant phenological responses to climate change. *Nature*. 2012. № 485 (7399). P. 494–497. DOI: 10.1038/nature11014.
33. Luedeling E., Guo L., Dai J., Leslie C., Blanke M.M. Differential responses of trees to temperature variation during the chilling and forcing phases. *Agric. For. Meteorol.* 2013. Vol. 181. P. 33–42. DOI: 10.1016/j.agrformet.2013.06.018.
34. Menzel A. & Fabian P. Growing season extended in Europe. *Nature*. 1999. Vol. 397. P. 659. DOI: 10.1038/17709.
35. Menzel A. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*. 2006. №12. P. 1969–1976. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2006.01193.x.
36. Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends Sci*. 2002. № 7. P. 405–409. DOI: 10.1016/s1360-1385(02)02312-9.
37. Mund M., Kutsch W.L., Wirth C., Kahl T., Knohl A., Skomarkova M.V., Schulze E.D. The influence of climate and fructification on the interannual variability of stream growth and net primary productivity in an old-growth, mixed beech forest. *Tree Physiology*. 2010. №30 (6). P. 684–704. DOI: 10.1093/treephys/tpq027.
38. Oerbauer S. F., Elmendorf S. C., Troxler T. G., Hollister R. D., Rocha A. V., Bret-Harte M. S., Dawes, M. A., Fosaa A. M., Henry G. H. R., Høye T. T., Jarrad F. C., Jónsdóttir I. S., Klanderud K., Klein, J. A., Molau U., Rixen, C., Schmidt, N. M., Shaver, G. R., Slider, R. T., Totland, Ø., Wahren, C.-H., Welker J. M. Phenological response of tundra plants to background climate variation tested using the International Tundra Experiment. *Philosophical transactions of the Royal Society B*. 2015. № 368 (1624). P. 1–13. DOI:10.1098/rstb.2012.0481
39. Prokhorova S. & Netsvetov M. Morphological and phenological shifts in the *Plantago lanceolata* L. species as linked to climate change over the past 100 years. *The Journal of Slovenian Academy of Sciences and Arts, Scientific Research Centre, Institute of Biology. Hacquetia*. 2020. №19 (2). P. 293–305. DOI:10.2478/hacq-2020-0006.
40. Sperlich D., Chang C.T., Penuelas J., Gracia C., Sabate S. Seasonal variability of foliar photosynthetic and morphological traits and drought impacts in a Mediterranean mixed forest. *Tree Physiology*. 2015. № 35 (5). P. 501–520. DOI: 10.1093/treephys/tpv017.
41. Sykes M. Climate change impacts: Vegetation. *Encyclopedia of Life Sciences*. 2009. P. 1–11. DOI: 10.1002/9780470015902.a0021227.
42. Van der Veken S., Hermy M., Vellend M., Knepen A., Verheyen K. Garden plants get a head start on climate change. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2008. № 6 (4). P. 212–216. DOI: 10.1890/070063.
43. Walther G.R., Roques A., Hulme P.E., Sykes M.t., Pysek P., Kuhn I., Zobel M. Alien species in a warmer world: Risks and opportunities. *Trends in Ecology and Evolution*. 2009. № 24 (12). P. 686–693. DOI: 10.1016/j.tree.2009.06.008.
44. Wilczek A. M., Burghadt L.T., Cobb A.R., Cooper M.D., Welch S.V., Schmitt J. Genetic and physiological bases for phenological responses to current and predicted climates. *Phil. Trans. R. Soc. B*. 2010. № (365). P. 3129–3147. DOI: 10.1098/rstb.2010.0128.

Ю. С. Юхименко, О. В. Данильчук, Л. І. Бойко

Криворізький ботанічний сад НАН України

Відділ інтродукції та акліматизації рослин, вул. Ботанічна, 50, м. Кривий Ріг, 50089, Україна, e-mail: yukhimenkoj@gmail.com

ВПЛИВ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН НА ПОЧАТОК ЦВІТІННЯ ДЕРЕВНИХ РОСЛИН У СТЕПОВІЙ ЗОНІ УКРАЇНИ

Резюме

Вступ. За даними відомих учених-кліматологів у ХХ ст. відбулось підвищення температури повітря Землі на 0,3–0,6 °С, і цей період потепління є досить довгостроковим. Температурні зміни повітря в Степовій зоні України відбуваються приблизно так, як і в цілому на планеті. Підвищення температури повітря викликає зсуви сезонного ритму розвитку у рослин різних природних ареалів, що може розглядатись як один з біоіндикаторів змін клімату. Весняні фенологічні процеси більш чутливі до змін температурного режиму, тому відчувають найсильнішу трансформацію порівняно з іншими сезонами. Найінформативнішою фенофазою щодо впливу кліматичних змін на рослини є фаза початку цвітіння. Деревні рослини є важливим компонентом оптимізації урбаноландшафтів і збереження їх різноманіття за наявності кліматичних змін передбачає адаптацію на основі їх генетичної та фенотипічної варіативності. Виходячи з цього, актуальним є вивчення особливостей пристосування їх феноритміки до сучасних кліматичних факторів Степової зони України, які поглиблюються дією аерополітантів підприємств Криворізького регіону.

Мета. Вивчення впливу глобальних кліматичних змін на початок цвітіння деревних рослин в умовах промислового міста Степової зони України.

Методика. Фіксування дати початку цвітіння проводили за методикою фенологічних спостережень у ботанічних садах. Дослідження кліматичних змін упродовж 1997–2023 рр. проводили за даними інтернет-ресурсу (Сайт погоди. – <http://tr5.ua>). Рівняння лінії тренду та достовірність їх апроксимації (R^2), а також значення непараметричного коефіцієнту кореляції Спірмена розраховували за допомогою програми Exell 2016.

Основні результати. Результати аналізу метеорологічних даних в умовах Криворіжжя за період 1997–2023 рр. зафіксували поступове збільшення середньорічної температури на 1,2 °С, що призвело до більш ранніх строків накопичення позитивних, ефективних та активних для рослин температур повітря (вище 0, 5, 10 °С відповідно) у весняний період. Доведено, що у зв'язку з цим фаза цвітіння у деревних рослин перемістилась на більш ранні терміни. Лінія тренду для початку цвітіння впродовж 1997–2023 рр. демонструє значне переміщення на більш ранні строки з найвищим значенням апроксимації у *Tilia cordata*. При порівнянні середніх багаторічних дат початок цвітіння у 2010–2023 рр. порівняно з 1997–2009 рр. раніший у *Tilia cordata* на 5,4 доби, для *Acer platanoides*, *Crataegus submollis*, *Forsythia europaea*, *Spiraea × vanhouttei* ця величина становить від 0,8 до 1,4 доби. Кореляційний аналіз між початком цвітіння і сумою температур виявив найбільшу залежність від температур вище 5 °С – достовірним цей показник є у *Acer platanoides*, *Crataegus submollis*, *Tilia cordata*.

Кількість опадів зменшилась впродовж 1997–2023 рр. на 27%, що є особливо критичним підчас посух зазвичай у липні-вересні. При зростанні подібних кліматичних змін буде відбуватись поглиблення впливу літньо-осінніх по-

сух на фізіологічний стан рослин, збільшення кількості пилових буревіїв, інтенсивності випаровування, аномальних температурних проявів тощо. Подібні кліматичні прояви здатні внести значні корективи до асортименту деревних рослин, які використовують в озелененні промислових міст Степової зони України. Підвищення посушливості кліматичних умов все більше буде поглиблювати процеси ксерофітизації деревної рослинності, призводити до зміни життєвої форми та біометричних параметрів, а також патологічних змін росту крон та стовбурів. Поряд з цим на тлі зниження життєвого стану рослин будуть зростати їх ураження фітопатогенами та ентомошкідниками, що буде викликати патології різного характеру. Такі процеси передбачають перегляд наявного списку видів та культиварів, перспективних для інтродукції в степовий регіон, розширення та зміну діапазону критеріїв відбору.

Ключові слова: кліматичні зміни, цвітіння, деревні рослини, Степова зона, Кривий Ріг.

Yu. S. Yukhymenko, O. V. Danylchuk, L. I. Boyko

Kryvyi Rih Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Ukraine
Department of Introduction and Acclimatization of Plants, 50 Botanichna St,
Kryvyi Rih, 50089, Ukraine, e-mail: yukhimenkoj@gmail.com

THE INFLUENCE OF CLIMATE CHANGES ON THE FLOWERING START OF WOODY PLANTS IN THE STEPPE ZONE OF UKRAINE

Summary

Introduction. According to well-known climatologists, the Earth's air temperature increased by 0.3–0.6 °C in the 20th century, and this period of warming is quite long-term. Air temperature changes in the Steppe zone of Ukraine occur approximately as they do on the planet as a whole. An increase in air temperature causes shifts in the seasonal rhythm of development in plants of various natural habitats, which can be considered as one of the bioindicators of climate change. Spring phenological processes are more sensitive to changes in the temperature regime, so they experience the strongest transformation compared to other seasons. The most informative phenophase regarding the impact of climate change on plants is the phase of the beginning of flowering. Woody plants are an important component of optimizing urban landscapes and maintaining their diversity in the presence of climate change requires adaptation based on their genetic and phenotypic variability. Based on this, it is relevant to study the peculiarities of the adaptation of their phenorhythms to the modern climatic factors of the Steppe zone of Ukraine, which are aggravated by the action of air pollutants from the enterprises of the Kryvyi Rih region.

Aim. To study of the influence of global climate changes at the beginning of the flowering of woody plants in the conditions of an industrial city in the Steppe zone of Ukraine.

Methods. Fixation of the date of the beginning of flowering was carried out according to the method of phenological observations in botanical gardens. The study of climatic changes during 1997–2023 was carried out according to the data of the Internet resource (Weather website – <http://tp5.ua>). The equation of the trend

line and the reliability of their approximation (R^2) were calculated using the Excel 2016 program. The analysis of the non-parametric Spearman correlation coefficient was performed in the Excel 2016 program.

Main results. The results of the analysis of meteorological data in Kryvyi Rih for the period 1997–2023 recorded a gradual increase in the average annual temperature by 1.2 °C, which led to earlier periods of accumulation of positive, effective and active air temperatures for plants (above 0, 5, 10 °C, respectively) in the spring period. It was proven that in connection with this, the flowering phase of woody plants had shifted to earlier periods. The trend line for the beginning of flowering during 1997–2023 shows a significant shift to earlier dates with the highest approximation value for *Tilia cordata*. When comparing the average multi-year dates, the beginning of flowering in 2010–2023 compared to 1997–2009 is earlier for *Tilia cordata* by 5.4 days, for *Acer platanoides*, *Crataegus submollis*, *Forsythia europaea*, *Spiraea* × *vanhouttei* this value is from 0.8 up to 1.4 days. Correlation analysis between the beginning of flowering and the sum of temperatures revealed the greatest dependence on temperatures above 5 °C – this indicator is reliable in *Acer platanoides*, *Crataegus submollis*, *Tilia cordata*.

The amount of precipitation decreased during 1997–2023 by 27%, which is especially critical during droughts, usually in July–September. With the aggravation of such climatic changes, the influence of summer-autumn droughts on the physiological state of plants will deepen, the number of dust storms, the intensity of evaporation, abnormal temperature manifestations, etc. will increase. Such climatic manifestations are able to make significant adjustments to the range of woody plants used in the landscaping of industrial cities in the Steppe zone of Ukraine. In the future, desertification of this region, displacement of natural zones, which will affect the composition of tree vegetation, is possible. The gradual change in climatic conditions involves the revision of the existing list of species and varieties prospective for introduction into the steppe region, the expansion and change of the range of selection criteria.

Keywords: climatic changes, flowering, woody plants, Steppe zone, Kryvyi Rih.

References

- Boiko, T. O. (2020). Phytosanitary condition of green plantations of Kherson. *Scientific Bulletin of UNFU*. 30. 4. P. 67–72. DOI: 10.36930/40300412. [in Ukrainian].
- Bulakh, P.E. (2005). Phenological criteria of stability in introduction of plants [Fenologicheskie kriterii ustojchivosti v introdukcii rastenij]. *Plants Introduction*. 4. 9–19. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/IR_2005_4_3. [in Ukrainian].
- Vasyuk, E.A., Moroz, P.A. (2005). Introduction of Cherri elaeagnus (*Elaeagnus multiflora* Thunb.) in the Forest-Step zone of Ukraine. 1st report. Morphological features and seasonal development [Introdukciya maslinki bagatokvitkovoyi (*Elaeagnus multiflora* Thunb.) v Lisostepu Ukrayini. Povidomlennya 1. Morfologichni osoblivosti ta sezonnij rozvitok]. *Plants introduction*. 2. 17–20. URL: <http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0001036888>. [in Ukrainian].
- Didukh, Y. P. (2009). Ecological aspects of the global climate changes: reasons, consequences and actions [Ekologichni aspekti globalnikh zmin klimatu: Prichini, naslidki, diy]. *News of Ukrainian Academy of Sciences*. 2. 34–44. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vnanu_2009_2_12. [in Ukrainian].
- Bahrii, I.D., Bilous, A.M., Vylkul, Yu. H., Gozhik P.F., Grishhenko, S.G., Palij, V.M., Kovalenko, I.A., Kuzmenko, O.B., Mayakov, J.D., Antonov, O.M., Mamishev, I.Ye., Kosareczkij, V.V. (2000). Experience of comprehensive assessment and mapping of factors of man-made influence on the natural environment of the cities of Kryvyi Rih and Dniprodzerzhinsk [Dosvid kompleksnoyi otcinki ta kartografuvannya faktoriv tekhnogenogo vplivu na prirodne seredovishhe mist Krivogo Rohu ta Dniprodzerzhinska]. Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine. Kyiv: Feniks. 112. [In Ukrainian].

6. Yeremeiev, V. & Yefimov, V. (2003). Regional aspects of global climate change. News of Ukrainian Academy of Sciences [Regionalni aspekti globalnoyi zmini klimatu]. 2. 24–28 URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vnanu_2003_2_3. [in Ukrainian].
7. Zajczewa, I.O., Dolgova, L.G. (2010). Physiological and biochemical principles for the introduction of woody plants in the Dnieper Steppe: monograph [Fiziologo-biokhimichni osnovi introduktsiyi derevnikh roslin v Stepovomu Pridniprov'yi: monografiya]. Dnipropetrovsk: Vydavnytstvo Dnepropetrovsk National University. 388. [in Ukrainian].
8. Likholat Yu.V., Khromikh N.O., Shupranova L.V., Kovalenko Г.М., Fedenko V.S., Aleksyeyeva A.A. (2018). Adaptation patterns of native and introduced woody plant species under varying conditions of the Dnieper Steppe [Zakonomirnosti adaptatsiyi aborigennikh ta introdukovanih vidiv derevnikh roslin do minlivikh umov Stepovogo Pridniprov'ya]. Sumi: FOP Czjoma. 186. [in Ukrainian].
9. Marinich, O.M., Parkhomenko, G.O., Petrenko, O.M., Shishhenko, P.G. (2003). Improved scheme of physical and geographical zoning of Ukraine [Udoskonalena skhema fiziko-geografichnogo rajonuvannya Ukrayini]. *Ukrainian Geographical Journal*. 1. 16–20. [in Ukrainian].
10. Mezhenkyj, V. M. (2009). Climate changes and their influence on arboreal plants in the South-East of Ukraine [Klimatichni zmini ta yih vpliv na derevni roslini na pivennomu skhodi Ukrayini.]. *Industrial Botany*. 9. 56–59. URL: <https://harvester.nas.gov.ua/Record/irk-123456789-9179>. [in Ukrainian].
11. Oleksiyenko, N.A., Breus, N.Y. (2013). Dependence of the flowering of shrubs from climate change in the region of Kiev [Zalezhnist pochatku cvitinnya garnokvituchih kushhiv vid klimatichnih zmin u rajoni mista Kiyeva]. *Scientific Bulletin of UNFU*. 11. 126–129. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nplanu_2013_11_21. [in Ukrainian].
12. Reliable Prognosis (2023). [Raspisaniye pogodi Ltd.] <http://rp5.ua>.
13. Suslova O., Boyko L. (2023). Vital state of species of the genus Acer L. in the urban systems of the steppe zone of Ukraine. *Environmental Sciences*. 6 (51). 196–201. DOI 10.32846/2306-9716/2023.eco.6-51.3. [in Ukrainian].
14. Yukhimenko, Yu. S. (2023). Taxonomic composition collection and general state of the genus Malus Mil L. in the Kryvyi Rih Botanical Garden of the NAS of Ukraine. *Scientific Bulletin of UNFU*. 33. 6. 7–12. DOI: 10.36930/40330601. [in Ukrainian].
15. Bahuguna, R.N. & Jagadish, K.S.V. (2015) Temperature regulation of plan phenological development. *Environmental and Experimental Botany*. 111. 83–90. DOI:10.1016/j.enxvexbot.2014.10.007
16. Boychenko, S., Voloshchuk, V., Movchan, Y., Serdjuchenko, N., Tkachenko, V., Tyshchenko, O., Savchenko, S. (2016). Features of climate change on Ukraine: scenarios, consequences for nature and agroecosystems. *Proceedings of the National Aviation University*. 4 (69). 96–113. DOI: 10.18372/2306-1472.69.11061
17. Bramwell, D. (2008). Plant adaptation and climate change. In: *2nd World Scientific Congress Challenges in Botanical Research and Climate Change* (29 Juni - 4 July 2008). Programme Book of abstract. The Netherlands, Delft. 3.
18. Buonaiuto, D. M. & Wolkovich, E. M. (2021). Differences between flower and leaf phenological responses to environmental variation drive shifts in spring phenological sequences of temperate woody plants. *Journal of Ecology*. 109. 2922–2933. DOI:10.1111/1365-2745.13708.
19. Chuine, I. (2010). Why does phenology drive species distribution? *Philosophical transactions of the Royal Society B*. 365. 3149–3160. DOI: 10.1098/rstb.2010.0142.10.1098/rstb.2010.0142.
20. Chypyliak, T. & Zubrovska, O. (2022). Features of development of species of the genus Veronica L. in the conditions of steppe zone of Ukraine. *The Journal of Slovenian Academy of Sciences and Arts, Scientific Research Centre, Institute of Biology*. Hacquetia. 21 (1). 223–233. DOI: 10.2478/hacq-2021-0025.
21. Climate change (2013). The Physical Science Basis. – Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Changes UNEP/WMO. 1552. URL: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.
22. Climate Change (2014). Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. URL: <http://www.weadapt.org>.
23. Cook, B.I., Wolkovich, E.M. & Parmesan, C. (2012). Divergent responses to spring and winter warming drive community level flowering trends. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 109 (3). P. 9000–9005. DOI: 10.1073/pnas.111836410.
24. Dentec, C.F., Vitasse, Y., Bonhomme, M., Louvet, J. M., Kremer, A., Delson, S. (2013). Chilling and heat requirements for leaf unfolding in European beech and sessile oak populations at the southern limit of their distribution range. *J. Biometeorol.* 58 (9). 1853–1864. DOI 10.1007/s00484-014-0787-z.

25. Dikin, E., Proctor, H., Jebb, M., Sparks, T., Donnelly, A. (2012). The phenology of *Rubus fruticosus* in Ireland: herbarium specimens provide evidence for the response of phenophases to temperature, with implications for climate warming. *International Journal of Biometeorology* 56. 1103. DOI: 10.1007/s00484-012-0524-z.
26. Ellwood, E.R., Temple, S.A., Primack, R.B., Bradley, N.L., Davis, C.C. (2013). Record-breaking early flowering in the Eastern United States. *PLoS ONE*. DOI: 10.1371/journal.pone.0053788.
27. Fischlin, A. (2008). Concern on climate Change. *2nd World scientific Congress/ Challenges in Botanical Reserch and Climate Change*. Programme Book of abstract. Delft, The Wetherlands. 2.
28. Fyfe, J.C., Gillett, N.P. and Zwiers, F.W. (2013) Overestimated Global Warming over the Past 20 Years. *Nature Climate Change*. 3. 767–769. DOI: 10.1038/nclimate1972.
29. Gordo, O. & Jose, J. (2010). Impact of climate change on plant phenology in Mediterranean ecosystems. *Global Change Biology*. 16. 1082–1106. DOI:10.1111/j.1365-2486.2009.02084.x
30. Harfouche, A., Meilan, R., Altman, A. (2014). Molecular and physiological responses to abiotic stresses in forest trees and their relevance to tree improvement. *Tree Physiology*. 34 (11). 1181–1198. DOI: 10.1093/treephys/tpu012.
31. Heide, O.M. (2003). High autumn temperature delays spring bud burst in boreal trees counterbalancing the effect of climatic warming. *Tree Physiol*. 29. 931–936. DOI: 10.1093/treephys/23.13.931.
32. Ikovich, E. M., Cook, B. I., Allen, J. M., Crimmins, T. M., Betancourt, J. L., Travers, S. E., Pau, S., Regetz, J., Davies, T. J., Kraft, N. J., Ault, T. R., Bolmgren, K., Mazer, S. J., McCabe, G. J., McGill, B. J., Parmesan, C., Salamin, N., Schwartz, M. D., Cleland, E. E. (2012). Warming experiments underpredict plant phenological responses to climate change. *Nature*. 485 (7399). 494–497. DOI: 10.1038/nature11014.
33. Luedeling, E., Guo, L., Dai, J., Leslie, C., Blanke, M.M. (2013). Differential responses of trees to temperature variation during the chilling and forcing phases. *Agric. For. Meteorol.* 181. 33–42. DOI: 10.1016/j.agrformet.2013.06.018.
34. Menzel, A. & Fabian, P. (1999). Growing season extended in Europe. *Nature*. 397. 659. DOI: 10.1038/17709.
35. Menzel, A. (2006). European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*. 12. 1969–1976. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2006.01193.x.
36. Mittler, R. (2002). Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends Sci*. 7. 405–409. DOI: 10.1016/s1360-1385(02)02312-9.
37. Mund, M., Kutsch, W.L., Wirth, C., Kahl, T., Knohl, A., Skomarkova, M.V., Schulze, E.D. (2010). The influence of climate and fructification on the interannual variability of stream growth and net primary productivity in an old-growth, mixed beech forest. *Tree Physiology*. 30 (6). 684–704. DOI: 10.1093/treephys/tpq027.
38. Oerbauer, S. F., Elmendorf, S. C., Troxler, T. G., Hollister, R. D., Rocha, A. V., Bret-Harte, M. S., Dawes, M. A., Fosaa, A. M., Henry, G. H. R., Høye, T. T., Jarrad, F. C., Jónsdóttir, I. S., Klanderud, K., Klein, J. A., Molau, U., Rixen, C., Schmidt, N. M., Shaver, G. R., Slider, R. T., Totland, Ø., Wahren, C.-H., Welker, J. M. (2015). Phenological response of tundra plants to background climate variation tested using the International Tundra Experiment. *Philosophical transactions of the Royal Society B*. № 368 (1624). 1–13. DOI: 10.1098/rstb.2012.0481.
39. Prokhorova, S. & Netsvetov, M. (2020). Morphological and phenological shifts in the *Plantago lanceolata* L. species as linked to climate change over the past 100 years. *Hacquetia*. 19 (2). 293–305. DOI: 10.2478/hacq-2020-0006.
40. Sperlich, D., Chang, C.T., Penuelas, J., Gracia, C., Sabate, S. (2015). Seasonal variability of foliar photosynthetic and morphological traits and drought impacts in a Mediterranean mixed forest. *Tree Physiology*. 35(5). 501–520. DOI: 10.1093/treephys/tpv017.
41. Sykes, M. (2009). Climate change impacts: Vegetation. *Encyclopedia of Life Sciences*. 1–11. DOI: 10.1002/9780470015902.a0021227.
42. Van der Veken, S., Hermy, M., Vellend, M., Knepen, A., Verheyen, K. (2008). Garden plants get a head start on climate change. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 6 (4). 212–216. DOI: 10.1890/070063.
43. Walther, G.R., Roques, A., Hulme, P.E., Sykes, M.t., Pysek, P., Kuhn, I., Zobel, M. (2009). Alien species in a warmer world: Risks and opportunities. *Trends in Ecology and Evolution*. 24 (12). 686–693. DOI: 10.1016/j.tree.2009.06.008.
44. Wilczek, A. M., Burghardt, L.T., Cobb, A.R., Cooper, M.D., Welch, S.V., Schmitt, J. (2010). Genetic and physiological bases for phenological responses to current and predicted climates. *Phil. Trans. R. Soc. B*. 365. 3129–3147. DOI: 10.1098/rstb.2010.0128.

**ГЕНЕТИКА
І МОЛЕКУЛЯРНА БІОЛОГІЯ**



УДК 633.11: 577.11

[https://doi.org/10.18524/2077-1746.2024.2\(55\).320488](https://doi.org/10.18524/2077-1746.2024.2(55).320488)

Я. С. Фанін¹, PhD; <https://orcid.org/0000-0003-3129-7583>

М. А. Литвиненко¹, академік НААН, д.б.н.;

<https://orcid.org/0000-0002-8605-6587>

О. О. Молодченкова¹, д.б.н.; <https://orcid.org/0000-0003-2511-0866>

І. А. Міщенко², к.е.н.; <https://orcid.org/0000-0002-2919-8546>

І. І. Моцний¹, к.б.н.; <https://orcid.org/0000-0002-1812-9481>

А. А. Дуніч³, к.б.н.; <https://orcid.org/0000-0001-9614-3441>

Л. Т. Міщенко³, д.б.н., професор; <https://orcid.org/0000-0003-0697-6971>

¹Селекційно-генетичний інститут – Національний центр насіннєзнавства та сортовивчення, Овідіопольська дор., 3, м. Одеса 65036, Україна

²Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна

³Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Володимирська, 64/13, м. Київ, 01601, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ НОВИХ ГЕНЕТИЧНИХ ДЖЕРЕЛ ВИСОКОЇ БІЛКОВОСТІ ЗЕРНА ТА УРОЖАЙНОСТІ ВІД *AEGILOPS TAUSCHII* ТА *TRITICUM DICOCOIDES*

Досліджено вплив генів від *Aegilops tauschii* та *Triticum dicoccoides* на врожайність, седиментацію та основні біохімічні показники якості зерна пшениці м'якої озимої (*Triticum aestivum* L.). При виконанні досліджень використано 5 ліній з геном *Gpc-B1* від *T. dicoccoides* та 18 ліній з генами високої білковості від *Ae. tauschii*. Як контроль були залучені сорти, які найбільш розповсюджені на півдні України та є стандартами врожайності і адаптивності та сорти ранніх етапів селекції, які є еталоном за показниками якості зерна. За результатами досліджень були встановлені значні позитивні впливи генів від *Ae. tauschii* та *T. dicoccoides* на показники якості зерна. Досліджені лінії можна розглядати як джерело господарсько-цінних ознак та залучати їх до селекційних програм для покращення біохімічних показників якості зерна.

Ключові слова: *Triticum aestivum* L., врожайність, мікроелементи, біохімічні показники, якість зерна, віддалена гібридизація.

Вступ

Однією з найважливіших вимог до сучасного виробника є отримання високих валових зборів зерна пшениці з високими якісними показниками, в реалізації яких провідну роль відіграє білок. Крім того, формування високих хлібопекарських якостей можливе лише за достатньо високого вмісту білка в борошні [1]. Тому проблема генетичного поліпшення вмісту білка є одним з найважливіших наукових і практичних завдань селекції, які традиційно є гострими,

а іноді навіть дискусійними [2-4]. Хоча у світі давно відомі зразки пшениці м'якої озимої (*Triticum aestivum* L.) з високим вмістом білка (на 2-3% вище стандартів), вони не завжди проявляють свої переваги при висіві в інших екологічних або агротехнічних умовах [5], іноді формуючи дрібне та щупле зерно. Зокрема, це може бути через ураження їх вірусними та грибовими хворобами [6, 7]. Існування оберненої залежності між вмістом білка та продуктивністю рослин, відсутність надійних генетичних джерел ознаки та сильна залежність варіювання ознаки від факторів навколишнього середовища призводять до значних труднощів, і навіть викликають певний скептицизм щодо селекції на високий вміст білка, принаймні шляхом внутрішньовидової гібридизації.

Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є схрещування віддалених видів з високоврожайними сортами, що може значно підвищити вміст білка в отриманих лініях [8, 9]. Однак сорти, отримані в результаті міжвидової гібридизації, зазвичай поступаються батьківським формам і стандартам, особливо за продуктивністю та масою 1000 зерен, з якими часто небажано корелює вміст білка. Це можна пояснити багатьма факторами, включаючи неефективні процеси інтрогресії та цитологічну або генетичну нестабільність інтрогресивного матеріалу. Схрещування з видами, які мають однаковий з пшеницею геном, особливо з донором геному *D Aegilops tauschii* Coss., видаються більш перспективними в цьому відношенні, оскільки завдяки цьому геному пшениця м'яка набула високих хлібопекарських властивостей, хорошої адаптивності та інших позитивних характеристик, які роблять її найважливішою хлібною рослиною в світі. Цей геном від *Aegilops tauschii* також пов'язаний з низкою негативних рис, які потребують поліпшення, включаючи сприйнятливність до грибних хвороб і низький вміст білка в зерні. Використання 42-хромосомних амфідиплоїдів, одержаних від схрещування тетраплоїдних видів пшениці з *A. tauschii*, дає можливість перенести в геном пшениці не тільки окремі гени якісних ознак *A. tauschii*, але й цілі полігенні системи, що контролюють кількісні ознаки, такі як стійкість до хвороб, розмір зерна та вміст білка, шляхом звичайної гомологічної кон'югації хромосом з D-геномів пшениці та дикого виду [7, 10]. Також, перспективним напрямом на покращення біохімічних показників зерна є інтрогресія гена *Gpc-B1* від *T. dicoccoides* [11].

Метою досліджень було, оцінка за продуктивністю та показниками якості інтрогресивних ліній з геном *Gpc-B1* і генами від *Ae. tauschii* за різних умов років і варіантах внесення добрив з подальшим порівнянням кращих інтрогресивних ліній з сортами стандартами – носіями різних генетичних систем.

Матеріали та методи досліджень

Польові дослідження проводилися по чорному пару на дослідній ділянці відділу селекції та насінництва пшениці Селекційно-генетичного інституту – Національного центру насіннєзнавства і сортовивчення (СГІ–НЦНС) у період 2020–2022 рр.

Матеріалом для дослідження були 18 інтрогресивних ліній з генами високої стійкості до низки хвороб, крупнозерності та білковості від *A. tauschii*, отримані в результаті 3–10 насичених схрещувань адаптивних сортів пшениці Одеська 267, Зміна, Альбатрос з штучними видами пшениці та амфідиплоїдами, схрещування сорту Селянка з мексиканськими елітними синтетиками (амфідиплоїдами *T. durum* Desf./*Ae. tauschii* Coss.), які були створені к.б.н. І.І. Моцним [7, 12], та 5 ліній F_6 – F_7 , отримані від схрещування сорту Куяльник (*T. aestivum*) з лінією – донором гена *Gpc-B1* від *T. turgidum* ssp. *dicoccoides*, отримані від член-кор. НАН та НААН, д.б.н. О.І. Рибалки.

Для виявлення агробіологічних особливостей інтрогресивних ліній з генами високого вмісту білка в зерні від *Ae. tauschii* та геном *Gpc-B1* були відібрані 8 сортів для порівняння, поділені на такі групи: Одеська 16 – високорослий сорт екстенсивного типу (СГІ–НЦНС) та Одеська 51 – високорослий сорт напівінтенсивного типу (СГІ–НЦНС), індикатори білковості; Куяльник – середньорослий сорт-стандарт, носій алелів високих хлібопекарських властивостей борошна (СГІ–НЦНС); Годувальниця – середньорослий сорт, носій алелів високих хлібопекарських властивостей борошна, Щедрість – низкорослий сорт, носій пшенично-житньої транслокації (ПЖТ) – (1BL.1RS) (СГІ–НЦНС), Дума (СГІ–НЦНС) та Новосмуглянка (Інститут фізіології рослин і генетики) – низкорослі сорти, носії пшенично-житньої транслокації (ПЖТ) – (1AL.1RS); та представник закордонної селекції – сорт Колонія (французька компанія «Лімогрейн»).

Посів проводився в оптимальні для півдня України строки. Польові досліді проводилися на ділянках 6 м², в 3-х кратній повторності, в суцільному посіві, поділені на два варіанти за кількістю внесення азотних добрив (NH₄NO₃) на 1 га: N60 і N120.

За даними Гідрометеорологічного Центру Чорного та Азовського морів, у вегетаційний рік 2020/21 випало 500 мм, що на 70% більше, ніж в наступний рік досліджень. Цей рік можна вважати оптимальним для вегетації за абіотичними факторами. У 2021/22 вегетаційний рік випало 300 мм, але на відміну від 2021 року, в березні-квітні рівень опадів був дещо вищим. Другий рік досліджень можна вважати посушливим, що робить їх контрастними за опадами. Загальний вміст білка/азоту визначали методом К'ельдаля на автоматичному аналізаторі Kjeltex Auto 1030 ("FOSS") [13]. Рівень седиментації визначався методом із попереднім автолізом, зокрема, методом SDS-30 [14]. Визначення вмісту мінералів – Mg та Fe проводилися за загально прийнятими методиками [15].

Дані опрацьовували за допомогою трьохфакторного і двофакторного ієрархічного дисперсійного аналізу – (ANOVA) за допомогою програмного забезпечення Statistica 8 (StatSoft Inc.). Для порівняння середніх значень (\bar{X}) використовували найменшу істотну різницю (НІР_{0,05}), розраховану для відповідного фактору чи взаємодії за Б.А. Доспеховим [16], і рівень статистичної значущості (*p*). Визначені нами показники наводяться в таблицях і тексті з уніфікованими

позначеннями їхньої вірогідності: *, ** і *** – вірогідні при $p < 0,05, 0,01$ і $0,001$ рівні значущості, відповідно.

Перелік скорочень: ПЖТ - пшенично-житньої транслокації; МТЗ – маса тисячі зерен.

Результати та їх обговорення

Аналізуючи отримані результати методом дисперсійного аналізу варто зазначити, що групування ліній в фактор «Генотип», з градаціями: старі стандарти, нові стандарти, сорти з ПЖТ, лінії без *Gpc-B1*, лінії з *Gpc-B1* та лінії від *Ae. tauschii* виявило вірогідність самостійного впливу цього фактора на всі ознаки, крім МТЗ (табл. 1). Вірогідним виявився також вплив взаємодії цього фактора з умовами досліду («Рік дослідження» – фактор В та «Доза добрив» – фактор С) на ознаки врожайності і збір білка. Невірогідними були всі потрійні взаємодії за участю фактора А «Генотип», був вплив умов досліду (фактори В і С).

Такі результати дисперсійного аналізу зумовили характер представлення факторіальних середніх за дослідженими показниками в таблицях 2 і 3. При цьому було виявлено, що в цілому за фактором А врожайність ліній з геном *Gpc-B1* і ліній з генами високої білковості від *Ae. tauschii* мала несуттєву різницю (табл. 2) і відрізнялася від урожайності інших градацій за фактором А, зокрема поступалася урожайності генотипу без *Gpc-B1*. Крім того, генотип *Gpc-B1+* мав найвищий у досліді вміст і збір білка, та седиментацію SDS-30, найменшу масу 1000 зернин, а за абсолютним вмістом білка в 1000 зернин поступався лише старим сортам-стандартам високої білковості (табл. 2). Вказане цілком відповідає даним літератури [17]

Подібна, хоча і дещо інша картина спостерігалася при аналізі взаємодій досліджених факторів. Так, в середньому за лініями з геном *Gpc-B1* врожайність у варіанті N60 складала 5,62 т/га та 5,48 т/га за лініями з генами від *Ae. tauschii*, різниця складала 0,14 т/га при $HP_{0,05}$, за взаємодії факторів А×С («Генотип» × «Доза добрив») – 0,20 т/га, тобто різниця була несуттєвою. Аналогічна ситуація спостерігалася у варіанті внесення добрив N120: для ліній з геном *Gpc-B1* врожайність в середньому складала 6,48 т/га, для ліній з генами від *Ae. tauschii* – 6,44 т/га (табл. 3). При чому у 2021 р. лінії з геном *Gpc-B1*, в середньому, переважали генотип без *Gpc-B1*, а в 2022 р., навпаки поступалися йому. За літературними даними, ген *Gpc-B1* не впливає на врожайність [18].

Незважаючи на середні показники за групами, де градації «Лінії з *Gpc-B1*» та «Лінії від *Ae. tauschii*» не мали суттєвої різниці між собою, були виділені окремі лінії, що значно вирізнялися врожайністю. Вплив фактора D «Лінія» на врожайність і збір білка був високовірогідний як самостійно, так і у всіх можливих взаємодіях з іншими факторами (табл. 1). Так, найбільшу врожайність у 2021 році у варіанті N60 з групи ліній з генами від *Ae. tauschii* мали лінії АІЛ96ф/18 – 6,66 т/га та Е1089/19 – 6,59 т/га, відповідно. Найурожайніша в цьому варіанті досліду лінія з геном *Gpc-B1* 9155 мала показник на рівні 6,37 т/га та поступалася найбільш врожайній лінії з генами від *Ae. tauschii* на 0,29 т/га ($HP_{0,05}$ для взаємодії D×B×C = 0,62 т/га), що відповідає 4,5 % (табл. 4).

Таблиця 1.

Результати дисперсійного аналізу досліджених показників

Джерело варіації	df	Ознаки, mS					
		урожай- ність	вміст білка	збір білка	МТЗ ¹⁾	АВБ ¹⁾	SDS-30 ¹⁾
Трьохфакторний дисперсійний комплекс за участі фактора «Генотип»							
Генотип (А)	5	29,6***	21,0***	0,387***	81,0***	2,23***	7542***
Рік дослідження (В)	1	106,6***	25,3***	0,779***	98,3***	9,69***	7007***
Доза добрив (С)	1	73,6***	115,0***	1,075***	6,5	19,4***	6132***
А×В	5	1,12***	0,85	0,027***	4,4	0,28	72
А×С	5	0,53**	0,49	0,012**	3,7	0,15	62
В×С	1	2,58***	0,00	0,034**	0,6	0,00	385**
А×В×С	5	0,23	0,38	0,006	0,7	0,10	11
Похибка	360	0,16	0,48	0,004	5,1	0,14	44
Двофакторний ієрархічний дисперсійний комплекс							
Генотип (А)	5	29,6***	21,0***	0,387***	81,0	2,23*	7542***
Лінія (D)	26	1,26**	3,99***	0,029*	60,5***	1,30***	339***
Похибка	352	0,61	0,62	0,017	1,2	0,13	60
Трьохфакторний дисперсійний комплекс за участі фактора «Лінія»							
Лінія (D)	31	5,83***	6,74***	0,087***	63,8***	1,45***	1501***
Рік дослідження (В)	1	106,6***	25,3***	2,45***	98,3***	9,69***	7007***
Доза добрив (С)	1	73,6***	115,0***	2,78***	6,5***	19,35***	6132***
Д×В	31	0,42**	0,43***	0,009**	2,5***	0,13***	52***
Д×С	31	0,22*	0,40***	0,004**	2,4***	0,12***	80***
В×С	1	2,58***	0,00	0,073***	0,6	0,00	385***
Д×В×С	31	0,12***	0,19	0,002**	0,6	0,04	12
Похибка	256	0,04	0,18	0,001	0,5	0,036	13

¹⁾ МТЗ – маса 1000 зернин; АВБ – абсолютний вміст білка в 1000 зернин; SDS-30 – седиментація SDS-30. *, ** і *** – вірогідно при $p < 0,05$, $0,01$ і $0,001$, відповідно

У варіанті N120 найбільш продуктивні лінії з генами від *Ae. tauschii* E1089/19 і P1L634/18 мали врожайність на рівні 8,08 і 7,61 т/га, відповідно. Щодо ліній-носіїв гена *Gpc-B1*, то краща за врожайністю лінія 9200 *Gpc-B1+*, давши врожай 7,26 т/га, все ж поступалася кращим лініям з генами від *Ae. tauschii*.

Таблиця 2

**Середні значення досліджених ознак
за фактором А (Генотип)**

Генотип (Фактор А)	Урожай- ність, т/га	Вміст білка, %	Збір білка, т/га	Маса 1000 зернин, г	Абсолютний вміст білка в 1000 зернин, г	Седи- ментація SDS-30, мл
Індикатори білковості ¹⁾	3,65	12,7	0,46	38,0	4,83	53,6
Нові стандарти ²⁾	6,22	11,7	0,73	37,5	4,39	61,6
Сорти з ПЖТ ³⁾	6,64	11,1	0,74	37,8	4,20	39,7
Лінії без <i>Gpc-B1</i>	6,20	12,3	0,77	36,8	4,54	68,0
Лінії з <i>Gpc-B1</i>	6,05	13,0	0,79	36,4	4,73	77,6
Лінії від <i>Ae. tauschii</i>	5,96	12,0	0,72	39,1	4,69	67,7
НІР _{0,05} по фактору	0,14	0,2	0,02	0,8	0,13	2,3

¹⁾При рівня значущості $p < 0,05$ ²⁾ Сорти Одеська 16 і Одеська 51; ³⁾ сорти Куяльник, Годувальниця і Колонія; ⁴⁾ ПЖТ – пшенично-житні транслокації 1AL.1RS і 1BL.1RS

Таблиця 3

**Середні значення врожайності і збору білка інтрогресивних ліній та сортів-
стандартів в залежності від поділу на групи, дози добрив та року досліджень
(взаємодії факторів А×В і А×С, фактори В і С), т/га**

Генотип (Фактор А)	Урожайність				Збір білка			
	Рік дослідження (Фактор В)		Доза добрив, кг/га. (Фактор С)		Рік дослідження (Фактор В)		Доза добрив, кг/га. (Фактор С)	
	2021	2022	Н60	Н120	2021	2022	Н60	Н120
Індикатори білковості ¹⁾	3,78	3,51	3,50	3,79	0,48	0,45	0,42	0,50
Нові стандарти ²⁾	6,66	5,77	5,84	6,59	0,81	0,66	0,65	0,81
Сорти з ПЖТ ³⁾	7,20	6,09	6,17	7,11	0,83	0,65	0,66	0,82
Лінії без <i>Gpc-B1</i>	6,45	5,94	5,75	6,64	0,80	0,73	0,68	0,85
Лінії з <i>Gpc-B1</i>	6,65	5,45	5,62	6,48	0,88	0,70	0,70	0,89
Лінії від <i>Ae. tauschii</i>	6,53	5,38	5,48	6,44	0,80	0,63	0,63	0,81
НІР _{0,05} взаємодії	0,20 (АВ)		0,20 (АС)		0,03 (АВ)		0,03 (АС)	
\bar{X}	6,45	5,40	5,49	6,36	0,80	0,64	0,63	0,80
НІР _{0,05} по фактору	0,08 (В)		0,08 (С)		0,01 (В)		0,01 (С)	

¹⁾При рівня значущості $p < 0,05$ ²⁾ Сорти Одеська 16 і Одеська 51; ³⁾ сорти Куяльник, Годувальниця і Колонія; ⁴⁾ ПЖТ – пшенично-житні транслокації 1AL.1RS і 1BL.1RS

Таблиця 4

**Врожайність інтрогресивних ліній та сортів-стандартів
в залежності від дози добрив та року досліджень, т/га.**

Сорт, лінія Фактор В	Доза азотних добрив, N 60, кг/га, Фактор С			Доза азотних добрив, N 120, кг/га. Фактор С			Фактор В \bar{X}
	2021 ¹ р.	2022 ¹ р.	\bar{x}	2021 ¹ р.	2022 ¹ р.	\bar{x}	
Одеська 16	3,08	3,01	3,05	3,53	3,54	3,54	3,29
Одеська 51	4,34	3,57	3,96	4,18	3,92	4,05	4,00
Куяльник	6,83	6,06	6,45	7,34	6,56	6,95	6,70
Щедрість	6,67	6,12	6,40	8,23	7,01	7,62	7,01
Дума	6,54	5,54	6,04	7,76	5,63	6,70	6,37
Годувальниця	5,94	5,07	5,51	7,17	5,52	6,35	5,93
Новосмуглянка	6,43	5,74	6,09	7,56	6,49	7,03	6,56
Колонія	5,84	5,34	5,59	6,87	6,06	6,47	6,03
\bar{X}	5,71	5,06	5,38	6,58	5,59	6,09	5,73
Лінії-носії гена <i>GPC-B1</i>							
9099 <i>GPC-B1</i> -	5,95	5,56	5,76	6,96	6,32	6,64	6,20
9155 <i>GPC-B1</i> +	6,37	4,85	5,61	7,05	5,77	6,41	6,01
9200 <i>GPC-B1</i> +	6,22	4,95	5,59	7,26	5,96	6,61	6,10
9250 <i>GPC-B1</i> +	6,23	5,03	5,63	7,13	5,84	6,49	6,06
9300 <i>GPC-B1</i> +	6,01	4,87	5,44	7,07	5,76	6,42	5,93
9525 <i>GPC-B1</i> +	5,75	5,57	5,66	6,89	5,88	6,39	6,02
\bar{X}	6,09	5,14	5,61	7,06	5,92	6,49	6,05
Лінії - носії генів високої білковості від <i>A. tauschii</i>							
E 1598/12	5,67	5,33	5,50	6,26	6,23	6,25	5,87
PI1799/16	6,20	4,58	5,39	6,89	5,51	6,20	5,80
PI1634/18	6,19	5,01	5,60	7,61	5,69	6,65	6,13
PI1814/13	5,69	4,66	5,18	6,74	5,11	5,93	5,55
AI1379/18	6,57	5,47	6,02	7,30	6,00	6,65	6,34
AI196ф/18	6,66	5,55	6,11	7,44	6,08	6,76	6,43
F268-14	5,60	4,58	5,09	6,75	5,15	5,95	5,52
PI1690/18	6,28	5,15	5,72	6,58	5,67	6,13	5,92
PI1747/18	5,83	4,78	5,31	7,42	5,63	6,53	5,92
H 242-197-2	5,90	4,83	5,37	7,42	5,33	6,38	5,87
E 175-09	5,64	4,62	5,13	7,40	5,52	6,46	5,80
E 1089-19	6,59	5,63	6,11	8,08	6,56	7,32	6,72
NIL2	5,40	4,65	5,03	6,47	5,65	6,06	5,54
NIL4	6,05	5,45	5,75	7,05	6,35	6,70	6,23
AI1327/18	6,08	5,28	5,68	7,48	6,16	6,82	6,25
AI1341/18	5,47	4,67	5,07	6,97	5,57	6,27	5,67
E2778/14	5,62	4,92	5,27	7,02	5,83	6,43	5,85
PI1355PH18	5,60	4,86	5,23	6,69	5,78	6,24	5,73
Фактор AC \bar{X}	5,95	5,00	5,47	7,09	5,77	6,43	5,95

Примітка: «¹» – Фактор впливу А; при рівні значущості $p < 0,05$.

Для дослідження впливу гена *Gpc-B1* на продуктивність важливо було порівняти сестринські лінії з геном *Gpc-B1* і без нього. Лінія без гена *Gpc-B1* мала врожайність у 2021 році на рівні 5,95 і 6,96 т/га, відповідно до варіантів N60 і N120. Якщо порівнювати окремі лінії, то у варіанті N60 три з них з геном *Gpc-B1* (9155, 9200 і 9250) значно перевищували сестринську лінію без гена (6,37, 6,22 і 6,23 т/га, відповідно). У варіанті N120 лише одна лінія 9200 з геном *Gpc-B1* (7,26 т/га) значно перевищувала сестринську лінію без гена *Gpc-B1*.

Хоча інтрогресивні лінії з обох груп і поступалися найбільш продуктивному сорту-стандарту Щедрість, який мав врожайність у 2021 році на рівні 6,67 і 8,23 т/га у варіантах N60 і N120, відповідно, все ж вищезгадані (A1L96ф/18; E1089/19; P1L634/18; 9200 *Gpc-B1+*; 9155 *Gpc-B1+*) най-врожайніші інтрогресивні лінії переважали за врожайністю інші сорти-стандарты, наприклад, Колонію (5,84 і 6,67 т/га, відповідно до варіанту доз добрив N60 і N120), Годувальницю (5,94 і 7,17 т/га) та Куяльник (6,83 і 7,34 т/га). Це було менше від показника кращих за врожайністю ліній на 0,35 – 0,40 т/га при $НП_{0,05}$ для взаємодії $D \times B \times C = 0,62$ т/га. Необхідно зазначити, що виявилось доцільним порівнювати сорти-стандарты за врожайністю окремо по градаціям, тому що середнє значення продуктивності не було легітимним через значний розмах варіації. Це пов'язано з необхідністю включення в дослідження сортів ранніх етапів селекції (низькопродуктивних, високорослих, напівінтенсивного типу), метою чого було залучення стандартів саме за показником загального вмісту білка в зерні.

У 2022 р. загальна урожайність сортів і ліній помітно знизилась у порівнянні з минулим роком. Так, середня врожайність ліній з геном *Gpc-B1* склала 5,45 т/га, лінії з генами високої білковості від *Ae. tauschii* мали врожайність на рівні 5,38 т/га, що на 1,20 т/га (18,0 %) і 1,15 т/га (17,6 %) менше, ніж врожайність відповідних градацій 2021 року (табл. 3). (В цілому по матеріалу, урожайність знизилась на 16,3 %.) Отже, аналізуючи отримані дані за врожайністю, можна зробити такі висновки. Інтрогресивні лінії з геном *Gpc-B1* та з генами від *Ae. tauschii* дещо поступалися – на 14,5-18,1 % за врожайністю таким високоінтенсивним сортам, як Куяльник та Щедрість. Це пов'язано з тим, що головним фактором добору в досліді була якість зерна і, передусім, вміст білка в ньому. Але інтрогресивні лінії переважали чи мали однакову врожайність з усіма іншими сортами-стандартыми, такими як Колонія, Годувальниця і високорослий сорт напівінтенсивного типу Одеська 51 (табл. 4).

Слід зазначити, що сестринські лінії з геном та без гена *Gpc-B1* в оптимальний за погодними умовами 2021 рік не мали значної різниці за врожайністю, тоді як в дефіцитний за опадами 2022 рік лінії з геном *Gpc-B1* вірогідно поступалися за врожайністю сестринській без гена на 8,2-10 % (табл. 3). Можна припустити, що в оптимальні умови року наявність гена *Gpc-B1* не призводить до зменшення врожайності, але при дефіциті вологи спостерігалось зменшення врожайності.

Вміст білка є одним з основних показників якості зерна та борошна, якому приділяється особлива увага при оцінці селекційного матеріалу. Через те, що саме білок і його якість були головними об'єктами наших досліджень, як і очікувалось, підвищення дози азотних добрив позитивно вплинуло на загальний вміст білка і залежний від нього збір білка (табл. 1 і 3). В середньому по матеріалу підвищення вмісту білка складало від 11,55 % (у варіанті N60) до 12,66 % (у варіанті N120) при $HP_{0,05}$ за фактором С (Доза добрив) – 0,14 %. Крім того, нами було виявлено, що при збільшенні дози азотних добрив різниця між генетичними групами зростала. Порівнюючи результати з білковості зерна за два роки була виявлена загальна тенденція зменшення середніх значень вмісту білка врожаю 2022 року (в середньому по досліді – 11,8 %), проти результатів, одержаних у оптимальний за погодними умовами 2021 рік (в середньому – 12,4 %).

При аналізі отриманих результатів за вмістом білка за окремими лініями двох експериментальних генетичних груп (лінії з генами від *Ae. tauschii* та лінії з геном *Gpc-B1*) спостерігалася значна диференціація. Однак, порівнюючи найбільш високобілкові лінії із цих груп, виявлено, що різниця між ними складала не більше, ніж 0,40 % (за абсолютними значеннями) при $HP_{0,05}$ за фактором D (Лінія) – 0,34 %. У 2021 р. найбільший вміст білка зерна у ліній з геном *Gpc-B1* мала лінія 9300 – 12,7 % і 14,0 % та лінія 9525 – 13,0 % й 14,2 %, відповідно до 2-х варіантів внесення добрив. З поміж ліній з генами від *Ae. tauschii* найвищий вміст білка був у лінії E1598/12 – 12,7 % та 13,9 %, а також у лінії F268/14 – 12,8 % і 13,8 %. Важливим є порівняння сестринських ліній з геном та без гена *Gpc-B1*. У варіанті внесення добрив N60 лінія без гена мала вміст білка на рівні 11,8 %, що на 1,2 % менше, ніж у лінії з найвищою білковістю ($HP_{0,05}$ для взаємодії D×C («Лінія»×«Доза добрив») – 0,48 %). У варіанті внесення добрив N120 при вмісті білка у лінії без *Gpc-B1* – 13,0 %, різниця за вмістом білка між лініями склала 1,2 % (табл. 5). Отже, в умовах 2021 року лінії з геном *Gpc-B1* мали стабільну перевагу за вмістом білка над сестринською лінією без гена.

Щодо вмісту білка в зерні сортів-стандартів, то за два роки досліджень середній вміст його у варіанті N60 був 11,2 %, у варіанті N120 – 12,2 %. Порівнюванням цих показників з середньою білковістю зерна ліній з геном *Gpc-B1* було встановлено, що різниця на агрофоні N60 складала 1,2 %, на агрофоні N120 – 1,3 %. Різниця за вмістом білка зерна в середньому за всіма варіантами досліді між лініями з генами від *Ae. tauschii* і сортами-стандартами не переважала значення $HP_{0,05}$ за фактором А («Генотип») – 0,24 %. Але, як вже відомо з попередніх досліджень, середній показник по вибірці не завжди може давати повне уявлення щодо досліджуваних ліній та їх показників. Також, бажано проводити порівняння дослідних генотипів з найбільш високобілковими сортами, до яких відносяться високорослі сорти Одеська 16 і Одеська 51. Встановлено, що у 2021 р. найбільш високобілкові лінії з геном *Gpc-B1* (9300, 9525) переважали в середньому на 0,6 % за вмістом білка ці сорти у варіанті N60 та на 1 % при N120, а похідні від *Ae. tauschii* на 0,5 % і 0,7 %, відповідно.

Таблиця 5

**Вміст білка зерна в інтрогресивних лінії та сортів-стандартів
в залежності від дози добрив та року досліджень, %.**

Сорт, лінія Фактор В	Доза азотних добрив, N 60, кг/га. Фактор С			Доза азотних добрив, N 120, кг/га. Фактор С			Фактор В \bar{X}
	2021 ¹ р.	2022 ¹ р.	\bar{x}	2021 ¹ р.	2022 ¹ р.	\bar{x}	
Одеська 16	12,5	12,4	12,5	13,3	14,1	13,7	13,1
Одеська 51	12,0	11,5	11,8	13	12,7	12,9	12,3
Куяльник	11,9	11,7	11,8	13,1	12,5	12,8	12,3
Щедрість	11,4	10,5	11,0	12,4	10,7	11,6	11,3
Дума	10,5	9,9	10,2	11,1	10,5	10,8	10,5
Годувальниця	10,8	10,5	10,7	12,7	12,0	12,4	11,5
Новосмуглянка	11,2	10,8	11,0	12,5	11,4	12,0	11,5
Колонія	11,3	10,1	10,7	12,5	11,2	11,9	11,3
\bar{X}	11,5	10,9	11,2	12,6	11,9	12,2	11,3
Лінії - носії гена <i>GPC-B1</i>							
9099 <i>GPC-B1-</i>	11,8	12,0	11,9	13,0	12,5	12,8	12,3
9155 <i>GPC-B1+</i>	12,4	12,0	12,2	13,7	13,2	13,5	12,8
9200 <i>GPC-B1+</i>	12,5	12,5	12,5	13,6	13,2	13,4	13,0
9250 <i>GPC-B1+</i>	12,7	12,6	12,7	13,8	13,2	13,5	13,1
9300 <i>GPC-B1+</i>	12,7	12,2	12,5	14,0	13,6	13,8	13,1
9525 <i>GPC-B1+</i>	13,0	12,0	12,5	14,2	14,1	14,2	13,3
\bar{X}	12,5	12,2	12,4	13,7	13,3	13,5	12,9
Лінії - носії генів високої білковості від <i>A. tauschii</i>							
E 1598/12	12,7	12,2	12,5	13,9	13,9	13,9	13,2
PIL799/16	12,5	11,8	12,2	13,7	13,1	13,4	12,8
PIL634/18	11,5	10,9	11,2	12,3	12,3	12,3	11,8
PIL814/13	12,5	12,5	12,5	13,3	13,1	13,2	12,9
AIL379/18	12,6	11,6	12,1	13,3	13,3	13,3	12,7
AIL96ф/18	12,2	10,9	11,6	12,9	12,1	12,5	12,0
F268-14	12,8	11,8	12,3	13,6	12,0	12,8	12,6
PIL690/18	12,3	10,9	11,6	13,4	12,7	13,1	12,3
PIL747/18	12,1	12,1	12,1	12,7	12,3	12,5	12,3
H 242-197-2	11,7	10,8	11,3	12,5	12,3	12,4	11,8
E 175-09	12,2	11,3	11,8	12,6	11,9	12,3	12,0
E 1089-19	11,3	10,5	10,9	12,5	12,5	12,5	11,7
NIL2	11,2	10,8	11,0	12,4	11,9	12,2	11,6
NIL4	10,5	10,1	10,3	11,7	11,1	11,4	10,9
AIL327/18	10,5	10,2	10,4	11,7	11,2	11,5	10,9
AIL341/18	11,5	10,8	11,2	12,6	12,2	12,4	11,8
E2778/14	10,7	10,3	10,5	11,9	11,7	11,8	11,2
PIL355PH18	11,7	11,1	11,4	12,9	11,8	12,4	11,9
Фактор АС \bar{X}	11,8	11,1	11,5	12,8	12,3	12,5	12,0

Примітка: «¹» – Фактор впливу А.; при рівні значущості $p < 0,05$.

У 2022 році вміст білка у ліній з геном *Gpc-B1* в середньому був на рівні 12,2 % у варіанті N60 та 13,5 % – у варіанті N120, що на 0,3 % й 0,4 % менше відповідно до варіантів в порівнянні з минулим роком. Така ж тенденція спостерігалась і для ліній з генами від *Ae. tauschii*: у варіанті N60 – 11,1 % та у варіанті N120 – 12,0 %, що на 0,7 й 0,8 % менше, ніж попереднього року. Отже, як і минулого року, загальний вміст білка в середньому був вище саме у ліній з геном *Gpc-B1*. При несприятливих погодних умовах ці лінії менше знижували білковість зерна. Незважаючи на доволі суттєву різницю в погодних умовах між роками, закономірності за вмістом білка в зерні інтрогресивних ліній зберігалися.

За результатами 2022 року, максимальний вміст білка у групах інтрогресивних ліній був на однаковому рівні. У лінії з геном *Gpc-B1* (9250) у варіанті N60 вміст білка був на рівні 12,6 %, а для лінії з генами від *Ae. tauschii* (PIL814/13) – 12,5 %. Різниця була не більше 0,40 % при $HP_{0,05}$ за взаємодії D×C («Лінія»×«Доза добрив») – 0,48 %. Ці показники були на рівні з показниками високорослого екстенсивного сорту Одеська 16 та переважали на 1 % показники високорослого сорту напівінтенсивного типу Одеська 51. У варіанті N120 найбільш високий вміст білка серед інтрогресивних ліній з геном *Gpc-B1* був у лінії 9225 (14,1 %) та у лінії з генами від *Ae. tauschii* E1598/12 (13,9 %). Порівнюючи кращі за білковістю зерна лінії, можна зазначити, що різниця й у цьому варіанті внесення добрив була несуттєва, у межах $HP_{0,05}$. При дозі добрив N120, як і в інших випадках, найбільш високий вміст білка мали високорослі сорти Одеська 16 – 14,1 % і Одеська 51 – 12,7 %. Якщо вміст білка у сорту Одеська 16 був на рівні з найбільш високобілковими інтрогресивними лініями, то у сорту Одеська 51 – на 1,3 % менше. Якщо порівнювати ці результати з показниками високоінтенсивних сортів, то різниця зростала ще більше: у варіанті N60 від 0,8 % до 2,7 % у варіанті N120 від 1,4% до 2,7 %.

Важливим є порівняння сестринських ліній з геном і без гена *Gpc-B1* для встановлення можливого впливу цього гена на вміст білка зерна. У варіанті доз добрив N60 різниця за вмістом білка між лінією без гена й найбільш високобілковою лінією 9225 була суттєво менша, ніж минулого року – 0,6 %, у варіанті N120 різниця склала 1,6 %, що було вище за показники минулого року при $HP_{0,05}$ за взаємодії D×C («Лінія»×«Доза добрив») – 0,48 %. З отриманих результатів за два роки можна зробити висновок, що лінії з геном *Gpc-B1* стабільно, незалежно від дози добрив і року досліджень, перевищували за вмістом білка сестринську лінію без гена. Приріст білка складав від 0,6 до 1,6 % в залежності від року та агрофону.

Визначення показника седиментації у інтрогресивних ліній та сортів-стандартів дозволило встановити, що найвищий рівень седиментації був у ліній з геном *Gpc-B* (табл. 2), в середньому різниця між групами інтрогресивних ліній складала 9,9 мл (12,8 %) на користь ліній з геном *Gpc-B1* при $HP_{0,05}$ по фактору А (Генотип) – 2,3 мл. Хоча за середніми значеннями лінії з генами

від *Ae. tauschii* поступалися лініям з геном *Gpc-B1*, але окремі лінії цієї групи стабільно виділися за цим показником. Серед них лінії AIL379/18, PIL814/13, PIL690/18, NIL2, які в окремих випадках мали седиментацію на рівні ліній з геном *Gpc-B1*.

Аналізуючи сестринські лінії з геном і без гена *Gpc-B1* за рівнем седиментації, можна бачити значний його вплив на підвищення цього показника якості (табл. 2). Так, у варіанті N60 лінія без гена мала показник седиментації, в середньому по роках, 64,6 мл, що на 8,4 мл (13 %) менше, ніж у ліній з *Gpc-B1*. У варіанті N120 лінія без гена мала седиментацію на рівні 70,1 мл, різниця склала 12 мл, або 14,6 % на користь ліній з *Gpc-B1*, при $HP_{0,05}$ за взаємодії факторів $D \times C - 4,1$ мл.

Виявлено, що як у нашому експерименті, так і згідно з літературними даними [19], наявність пшенично-житніх транслокацій (1BL.1RS і 1AL.1RS) значно знижує показники седиментації. Враховуючи те, що в нашому досліді були сорти-стандарти з наявністю транслокацій (Щедристь, Дума, Новосмуглянка), показник їхньої седиментації поступався на 20 – 25 мл. сортам без транслокацій. В такому випадку, експериментальні лінії доцільно порівнювати зі стандартами без транслокацій. У досліджених інтрогресивних ліній середній показник седиментації у варіанті N60 складав 53,6 мл, різниця між інтрогресивними лініями і стандартами була в межах 19,4 й 10 мл відповідно до груп ліній (з геном *Gpc-B1* чи генами від *Ae. tauschii*). У варіанті N120 середній показник седиментації у сортів-стандартів був на рівні 63,2 мл, що було менше на 19 і 9 мл відповідно до груп ліній при $HP_{0,05}$ за фактором А (Генотип) – 2,3 мл.

Визначення вмісту заліза проводилося в основному в зерні ліній з геном *Gpc-B1*. Це аргументується тим, що за літературними даними, саме цей ген здатен збільшити загальний вміст заліза та марганцю в зерні [20]. Середній вміст заліза в зернах ліній з геном *Gpc-B1* складав 43,6 мкг/г, що на 12,1 мкг/г більше, ніж у сорту Куяльник. Така ж різниця була встановлена між сестринською лінією без гена та лініями з геном *Gpc-B1*, що відповідало 34 %. В зерні лінії E1598/12 виявили значно менший вміст цього мікроелемента, ніж у ліній носіїв гена *Gpc-B1*, який знаходився на одному рівні з сортом Куяльник і лінією без гена *Gpc-B1* (табл. 4).

Середня концентрація марганцю у дослідних зразках складала 0,055 мкг/г, тоді як середній показник по групі ліній з геном *Gpc-B1* був 0,059 мкг/г. Різниця між вмістом марганцю у сорту Куяльник і середнім його значенням в інтрогресивних лініях з *Gpc-B1* складала 0,009 мкг/г на користь інтрогресивних ліній, що у відсотковому відношенні складало 18 %. Лінія з генами від *Ae. tauschii* мала найменшу концентрацію марганцю й поступалася за цим показником сорту Куяльник на 31 % та лініям з геном *Gpc-B1* на 55 %. Отже, ген *Gpc-B1* від *T. turgidum* ssp. *dicoccoides* підвищує не тільки вміст білка в зерні, але й концентрацію заліза та марганцю.

Таблиця 6

**Вміст мікроелементів у інтрогресивних лініях пшениці
урожаю 2020-2022 року.**

Сорт, лінія	Вміст заліза, мкг /г	Вміст марганцю, мкг/г
Куяльник	31,5±0,2	0,050±0,002
9099 (<i>GPC-B₁-</i>)	31,5±0,1	0,049±0,002
9155 (<i>GPC-B₁+</i>)	43,5±0,2	0,063±0,001
9200 (<i>GPC-B₁+</i>)	42,5±0,1	0,050±0,002
9250 (<i>GPC-B₁+</i>)	41,5±0,2	0,057±0,001
9300 (<i>GPC-B₁+</i>)	44,0±0,3	0,060±0,001
99525(<i>GPC-B₁+</i>)	46,5±0,2	0,065±0,002
E1598/12	31,0±0,3	0,038±0,003

Висновки

За врожайністю інтрогресивні лінії з геном *Gpc-B1* від *T. dicoccoides* та з генами від *Ae. tauschii* поступалися на 14,5-18,1 % високоінтенсивним сортам Куяльник та Щедрість. Але переважали чи мали однакову врожайність з іншими сортами, такими, як Колонія, Годувальниця і Одеська 51. В оптимальні умови року наявність гена *Gpc-B1* не знижувала врожайність, але при дефіциті вологи спостерігався його негативний вплив. Серед інтрогресивних ліній було кілька (AIL96ф/18, E1089/19, NIL4, Eг. 9155 та Eг. 9200), які незалежно від умов і варіантів внесення добрив мали врожайність на рівні чи вище найурожайніших стандартів.

Найбільш високобілкові лінії з геном *Gpc-B1* і генами від *Ae. tauschii* мали однаковий вміст білка. Серед індикаторів білковості найвищий вміст білка був у сорту Одеська 16. В залежності від року і дози добрив вміст білка на рівні цього сорту мали до половини досліджених ліній з генами від *Ae. tauschii* (E1598/12, P1L814/13, AIL379/18 та F268/14).

Наявність гена *Gpc-B1* значно збільшувала рівень седиментації; лінії носії гена *Gpc-B1* перевищували сорти-стандарти, в середньому, на 19,0–19,4 мл, лінії з генами від *Ae. tauschii* – на 9,5–9,8 мл, а сестринську лінію без гена *Gpc-B1* на 8,4–12,0 мл. Кілька ліній з генами від *Ae. tauschii* (AIL379/18, P1L814/13, P1L690/18, NIL2, E1598/12 та E1089/19), незалежно від року і дози мінеральних добрив, мали вищий рівень седиментації, ніж сорти-стандарти.

Наявність гена *Gpc-B1* суттєво підвищувало вміст мікроелементів у досліджених генотипах. Середні значення вмісту марганцю у лініях з геном *Gpc-B1* були вищі на 18 %, ніж у сорту Куяльник, а вміст заліза – на 34 %.

Робота виконана за підтримки і фінансування проєкту НФДУ. «Механізми стійкості економічно-важливих культур до вірусних хвороб за умов воєнного стану і глобального потепління» № 2023.03/0244 конкурсу «Передова наука в Україні».

Стаття надійшла до редакції 19.08.2024

Список використаної літератури

1. Balyan H.S., Gupta P.K., Kumar S., Dhariwal R., Jaiswal V., Tyagi S., Agarwal P., Gahlaut V., Kumari S. Genetic improvement of grain protein and other health-related constituents of wheat grain. *Plant Breeding*. 2013. P. 446-457 available at <http://wileyonlinelibrary.com>. doi: 10.1111/pbr.12047.
2. Zilic S., Barac M., Pesic M., Characterization of proteins from grain of different bread and durum wheat genotypes et. all *Int. J. Mol. Sci.* – 2011. – V.12 (9). – P. 5878–5894. doi: 10.3390/ijms12095878.
3. Wenefrida, I., Utomo, H.S., and Linscombe, S.D., Mutational breeding and genetic engineering in the development of high grain protein content, *J. Agric.Food Chem.*, 2013, Vol. 61, No. 48, pp. 11702–10, doi: 10.1021/jf4016812.
4. Michel S., Kummer C., Gallee M., Hellinger J., Ametz C., Akgöl B., Epure D., Güngör H., Löschenberger F., Buerstmayr H. Improving the baking quality of bread wheat by genomic selection in early generations. *Theor. Appl. Genet.*, 2018, Vol. 131, No. 2, P. 477–93, doi: 10.1007/s00122-017-2998-x.
5. Laidig F., Piepho H.P., Rentel D., Drobek T., Meyer, U., Huesken, A. Breeding progress, environmental variation and correlation of winter wheat yield and quality traits in German official variety trials and on-farm during 1983–2014. *Theor. Appl. Genet.*, 2017, Vol. 130, No. 1, P. 223–45, doi: 10.1007/s00122-016-2810-3.
6. Mishchenko L., Nazarov T., Dunich A., Mishchenko I., Ryshchakova O., Motsnyi I., Dashchenko A., Bez-krovna L., Fanin Y., Molodchenkova O., Smertenko A. Impact of wheat streak mosaic virus on peroxisome proliferation, redox reactions, and resistance responses in wheat. *Int. J. Mol. Sci.* 2021. Vol. 22, 10218. P. 1–17. doi: [org/10.3390/ijms221910218](https://doi.org/10.3390/ijms221910218).
7. Motsnyi I.I., Molodchenkova O.O., Nargan T.P., Nakonechnyi M.Yu., Mishchenko I.A., Lyfenko S.Ph., Smertenko A.P., Mishchenko L.T. Impact of alien genes on disease resistance, drought tolerance, and agronomic traits in winter wheat commercial varieties. *The Open Agriculture Journal*. 2022. V. 16. P. 1–10. doi: [org/10.2174/18743315-v16-e2111260](https://doi.org/10.2174/18743315-v16-e2111260).
8. Padmanaban S., Zhang P., Hare R.A., Sutherland M.W., Martin A., Pentaploid wheat hybrids: applications, characterisation and challenges. *Front. Plant Sci.*, 2017, Vol. 8, P. 1–11, doi: [org/10.3389/fpls.2017.00358](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00358).
9. Tabbata F., Lewis S., Vouilloz J.P., Ortega M.A., Kade M., Abbate P.E., Barneix A.J. Effects of the Gpc-B1 locus on high grain protein content introgressed into Argentinean wheat germplasm. *Plant Breed.* 2013, Vol. 132, No. 1, P. 48–52, doi: [org/10.1111/pbr.12011](https://doi.org/10.1111/pbr.12011).
10. Mujeeb-Kazi A., GulKazi A., Dundas I., Rasheed F., Ogbonnaya F., Kishii M., Bonnett D., Wang R. R.-C., Xu S., Chen P., Mahmood T., Bux, H., Farrakh S., Chapter four-genetic diversity for wheat improvement as a conduit to food security. *Advances in Agronomy*. 2013. Vol. 122, P. 179–257. doi: [org/10.1016/B978-0-12-417187-9.00004-815](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417187-9.00004-815).
11. Verma S.K., Kumar S., Sheikh I. et al. Transfer of useful variability of high grain iron and zinc from *Aegilops kotschyi* into wheat through seed irradiation approach. *International Journal of Radiation Biology*. 2016. Vol. 92. P. 132–139.
12. Motsnyi I., Lytvynenko M., Golub E., Nargan T., Nakonechnyi M., Lyfenko S., Molodchenkova O., Fanin Ya., Mishchenko I., Smertenko A., Mishchenko L. Disease resistance and adaptation of winter wheat lines derived from wide hybridisation under arid environments. *Zemdirbyste-Agriculture*. 2022. V. 109, № 3. P. 227–236. doi: [10.13080/z-a.2022.109.029](https://doi.org/10.13080/z-a.2022.109.029).
13. Jarell W.M., Beverly R.B. The dilution effect in plant nutrition studies. *Advances in Agronomy*. 1981. Vol. 34 P. 197–224.
14. ДСТУ 3768–2010. Пшениця. Технічні умови. – Держспожив-стандарт України. – 2010. – С. 14.
15. Рибалка О. І., Червоніс М. В., Парфентьев М. Г., Аксельруд Д. В. Пат. № 17023 Україна, (2006) А01Н 1/04. Спосіб непрямої оцінки «сили» бо-рошна – седиментація SDS-30. Селекційно-генетичний інститут. № u200610062; заявл. 06.02.2006; опубл. 15.09.2006; Бюл. № 9. 6 с.
16. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследования) [5-е изд., доп. и перераб.]. Москва: Агропромиздат, 1985. 351 с.

17. Рибалка О. І., Моргун В. В., Моргун Б. В., Поліщук С. С., Червоніс М. В., Соколов В. М. Нова генетична варіабельність для поліпшення якості пшениці (*Triticum aestivum* L.). *Cytology and Genetics*. 2023. Т. 57 (1). С 1-11.
18. Рибалка О. І., Моргун Б. В., Поліщук С. С. *GPC-B1 (NAM-B1)* ген як новий генетичний ресурс у селекції пшениці на підвищення вмісту білка в зерні та мікроелементів. *Физиология растений и генетика*. 2018. Т 50. (4), С 279-298.
19. Литвиненко М.А., Топал М.М. Ефекти пшенично-житніх транс-локацій 1AL/1RS I 1BL/1RS на якість зерна у сортів пшениці м'якої озимої. *ScienceRise*. 2015. № 3.1 (8). С. 82-87.
20. Жемела Г.П., Кузнецова О.А. Вплив сортових властивостей на продуктивність та якість зерна пшениці м'якої озимої. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2012. № 3. С. 23-25.

**Я. С. Фанін¹, М. А. Литвиненко¹, О. О. Молодченкова¹, І. А. Міщенко²,
І. І. Моцний¹, А. А. Дуніч³, Л. Т. Міщенко³**

¹Селекційно-генетичний інститут – Національний центр насіннєзнавства та сортовивчення, Овідіопольська дор., 3, м. Одеса, 65036, Україна

²Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна

³Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Володимирська, 64/13, м. Київ, 01601, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ НОВИХ ГЕНЕТИЧНИХ ДЖЕРЕЛ ВИСОКОЇ БІЛКОВОСТІ ЗЕРНА ВІД *AEGILOPS TAUSCHII* ТА *TRITICUM DICOCCOIDES*

Резюме

Вступ. Однією з найважливіших вимог до сучасного виробника є отримання високих валових зборів зерна пшениці *Triticum aestivum* L. з високими якісними показниками, в реалізації яких провідну роль відіграє білок. Хоча у світі давно відомі зразки пшениці м'якої озимої з високим вмістом білка (2-3%), вони не завжди проявляють свої переваги при висіві в інших екологічних або агротехнічних умовах. Перспективним шляхом розв'язання цієї проблеми є схрещування віддалених видів з високоврожайними сортами, що може значно підвищити вміст білка в отриманих лініях. Один із цих напрямків для підвищення біохімічних показників є інтрогресія гена *Gpc-B1* від *T. dicoccoides*.

Мета. Перше, оцінка за продуктивністю та показниками якості інтро-гресивних ліній з джерелами високої білковості з геном *Gpc-B1* і генів від *Aegilops tauschii*, друге порівняння кращих інтрогресивних ліній, носіїв різних генетичних систем, з сортами стандартами.

Методика. Польові дослідження проводилися на дослідних полях СГП-НЦНС, на двох контрастних варіантах внесення азотних добрив N60 і N120. В дослідженні брали участь 2 групи ліній з геном *Gpc-B1* та генами від *Ae. tauschii*. Найкращі представники цих груп порівнювалися з сортами-стандартами. Лінії досліджувалися за показником врожайності, вмісту білка, рівня седиментації та мікроелементного складу.

Основні результати. Були проведені дослідження 18 ліній з генами високої білковості від *A. tauschii* та 5 ліній з геном *Gpc-B1* від *T. dicoccoides*. За врожайністю були виявлені такі закономірності: інтрогресивні лінії з геном *Gpc-B1* та з генами від *Ae. tauschii* поступалися на 14,5-18,1% таким

високоінтенсивним сортам, як Куяльник та Щедрість, але інтрогресивні лінії переважали чи мали однакову врожайність з усіма іншими сортами, такими, як Колонія, Годувальниця і високорослий напівінтенсивного типу сорт Одеська 51. Встановлено, що в оптимальні умови року наявність гена *Gpc-B1* не знижувало врожайності, але при дефіциті вологи таке може спостерігатися. Високобілкові лінії з геном *Gpc-B1* і генами від *Ae. tauschii* мали однаковий середньо арифметичний вміст білка. Найбільший вміст білка в зерні серед сортів-стандартів був у сорту Одеська 16, залежно від року і дози добрив вміст білка на рівні цього сорту мали від однієї до дев'яти інтрогресивних ліній з генами від *Ae. tauschii*. Вміст білка у ліній з геном *Gpc-B1* був дещо вищий, за винятком варіанту N120 у 2022 році, коли всі дослідні лінії показали вміст білка на рівні сорту-стандарту Одеська 16.

Лінії носії гена *Gpc-B1* перевищували в середньому сорти-стандарту за цим показником на 19 – 19,4 мл, на 9,5 – 9,8 мл лінії з генами від *Ae. tauschii* та сестринську лінію без гена *Gpc-B1* на 8,4 – 12,0 мл. Наявність гена *Gpc-B1* від *Triticum turgidum* ssp. *dicoccoides* суттєво підвищувало вміст мікроелементів у досліджених генотипах. Середні значення вмісту марганцю у лініях з геном *Gpc-B1* були вищі на 18%, ніж у сорту Куяльник, вміст заліза – на 34%.

Ключові слова: *Triticum aestivum* L., врожайність, мікроелементи, біохімічні показники, якість зерна, віддалена гібридизація.

Ya. S. Fanin¹, M. A. Lytyynenko¹, O. O. Molodchenkova¹, I. A. Mishchenko², I. I. Motsnyi¹, A. A. Dunich³, L. T. Mishchenko³

¹Plant Breeding and Genetics Institute – National Center of Seed and Cultivar Investigation, 3 Ovidiopolska Rd, Odesa, 65036, Ukraine

²National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15 Heroiv Oborony St, Kyiv, 03041, Ukraine

³Taras Shevchenko National University of Kyiv, 64/13 Volodymyrska St, Kyiv, 01601, Ukraine

STUDY OF NEW GENETIC SOURCES OF HIGH GRAIN PROTEIN CONTENT FROM AEGILOPS TAUSCHII AND TRITICUM DICOCOIDEOS

Summary

Introduction. One of the most important requirements for a modern producer is to obtain high gross yields of wheat grain with high quality indicators, in the realisation of which protein plays a leading role. Although the world has long known samples of soft winter wheat with a high protein content (2-3%), they do not always show their advantages when sown under different environmental or agronomic conditions. A promising way to solve this problem is to cross distant species with high-yielding varieties, which can significantly increase the protein content of the resulting lines. One of these ways to improve biochemical parameters is introgression of the *Gpc-B1* gene from *T. dicoccoides*.

Objective. Firstly, to evaluate the productivity and quality indicators of introgressive lines with high protein sources with the *Gpc-B1* gene and genes from *Aegilops tauschii*, and secondly, to compare the best introgression lines with varieties of standards of carriers of different genetic systems.

Methods. Field studies were conducted on the experimental fields of the SGI-NCSCI, on two contrasting variants of nitrogen fertilizer application N60 and N120. The

study involved 2 groups of lines with genes from *T. dicoccoides* and *Ae. tauschii*. The best representatives of these groups were compared with the standard varieties. The lines were studied for yield, protein content, protein fractional composition, sedimentation level and trace element composition.

Main results. 18 lines with high protein genes from *Ae. tauschii* and 5 lines with the *Gpc-B1* gene from *T. dicoccoides* were studied. The following patterns were found in terms of yield: introgression lines with the *Gpc-B1* gene and genes from *Ae. tauschii* were 14.5-18.1% inferior to such high-intensity varieties as Kuyalnyk and Shchedrish, but introgression lines were superior or had the same yield as all other varieties, such as Kolonia, Giduvanitsa and tall semi-intensive type variety Odeska 51. It was found that in optimal conditions of the year, the presence of the *Gpc-B1* gene did not reduce yields, but in case of moisture deficit, this can be observed. High-protein lines with the *Gpc-B1* gene and genes from *Ae. tauschii* had the same arithmetic mean protein content. The highest protein content in grain among the standard varieties was in Odeska 16, and depending on the year and fertilizer dose, from one to nine introgression lines with genes from *Ae. tauschii* had protein content at the level of this variety. The protein content of the lines with the *Gpc-B1* gene was slightly higher, except for the variant N120 in 2022, when all experimental lines showed protein content at the level of the standard variety Odeska 16.

Lines carrying the *Gpc-B1* gene exceeded the standard varieties by 19 - 19.4 ml on average, lines with genes from *Ae. tauschii* by 9.5 - 9.8 ml and the sister line without the *Gpc-B1* gene by 8.4 - 12.0 ml. The presence of the *Gpc-B1* gene from *Triticum turgidum* ssp. *dicoccoides* significantly increased the content of trace elements in the studied genotypes. The average manganese content in the lines with the *Gpc-B1* gene was 18% higher than in the Kuyalnik variety, and the iron content was 34% higher.

Keywords: *Triticum aestivum* L., yield, trace elements, biochemical parameters, grain quality, remote hybridisation.

References

- Balyan, H. S., Gupta, P. K., Kumar, S., Dhariwal, R., Jaiswal, V., Tyagi, S., Agarwal, P., Gahlaut, V., & Kumari, S. (2013). Genetic improvement of grain protein and other health-related constituents of wheat grain. *Plant Breeding*. 446-457. <http://wileyonlinelibrary.com>. doi: 10.1111/pbr.12047.
- Žilić, S., Barać, M., Pešić, M., Dodig, D., & Ignjatović-Mičić, D. (2011). Characterization of Proteins from Grain of Different Bread and Durum Wheat Genotypes. *International Journal of Molecular Sciences*. 12(9), 5878-5894. <https://doi.org/10.3390/ijms12095878>.
- Wenefrida, I., Utomo, H.S., & Linscombe S.D. (2013). Mutational breeding and genetic engineering in the development of high grain protein content. *J. Agric. Food Chem.* 61, 48, 11702-10. doi: 10.1021/jf4016812.
- Michel, S., Kummer, C., Gallee, M., Hellinger, J., Ametz, C., Akgöl, B., Epure, D., Güngör, H., Löschenberger, F., & Buerstmayr, H. (2018). Improving the baking quality of bread wheat by genomic selection in early generations. *Theor. Appl. Genet.* 131, 2, 477-93. doi: 10.1007/s00122-017-2998-x.
- Laidig, F., Piepho, H.P., Rentel, D., Drobek, T., Meyer, U., & Huesken, A. (2017). Breeding progress, environmental variation and correlation of winter wheat yield and quality traits in German official variety trials and on-farm during 1983-2014. *Theor. Appl. Genet.* 130, 1, 223-45. doi: 10.1007/s00122-016-2810-3.
- Mishchenko, L., Nazarov, T., Dunich, A., Mishchenko, I., Ryschakova, O., Motsnyi, I., Dashchenko, A., Bez-krovna, L., Fanin, Y., Molodchenkova, O., & Smertenko, A. (2021). Impact of wheat streak mosaic virus on peroxisome proliferation, redox reactions, and resistance responses in wheat. *Int. J. Mol. Sci.* 22, 10218. 1-17. doi: org/10.3390/ijms221910218.
- Motsnyi, I. I., Molodchenkova, O. O., Nargan, T. P., Nakonechnyi, M. Yu., Mishchenko, I. A., Lyfenko, S. Ph., Smertenko, A. P., & Mishchenko, L. T. (2022). Impact of alien genes on disease resistance, drought tolerance,

- and agronomic traits in winter wheat commercial varieties. *The Open Agriculture Journal*. 16. 1–10. doi: org/10.2174/18743315-v16-e2111260.
8. Padmanaban, S., Zhang, P., Hare, R. A., Sutherland, M. W., & Martin, A. (2017). Pentaploid wheat hybrids: applications, characterisation and challenges. *Front. Plant Sci.* 8, 1–11. doi: org/10.3389/fpls.2017.00358.
 9. Tabbita, F., Lewis, S., Vouilloz, J.P., Ortega, M.A., Kade, M., Abbate, P.E., & Barneix, A.J. (2013). Effects of the *Gpc-B1* locus on high grain protein content introgressed into Argentinean wheat germplasm. *Plant Breed.* 132, 1, 48–52, doi: org/10.1111/pbr.12011.
 10. Mujeeb-Kazi, A., GulKazi, A., Dundas, I., Rasheed, F., Ogbonnaya, F., Kishii, M., Bonnett, D., Wang, R. R.-C., Xu, S., Chen, P., Mahmood, T., Bux, H., & Farrakh, S. (2013). Chapter four-genetic diversity for wheat improvement as a conduit to food security. *Advances in Agronomy*. 122, 179–257. doi: org/10.1016/B978-0-12-417187-9.00004-815.
 11. Verma, S. K., Kumar, S. Sheikh I. et al. (2016). Transfer of useful variability of high grain iron and zinc from *Aegilops kotschyii* into wheat through seed irradiation approach. *International Journal of Radiation Biology*. 92. 132–139.
 12. Motsnyi, I., Lytvynenko, M., Golub, E., Nargan, T., Nakonechnyi, M., Lyfenko, S., Molodchenkova, O., Fanin, Ya., Mishchenko, I., Smertenko, A., & Mishchenko, L. (2022). Disease resistance and adaptation of winter wheat lines derived from wide hybridisation under arid environments. *Zemdirbyste-Agriculture*. 109, № 3. P. 227–236. doi: 10.13080/z-a.2022.109.029.
 13. Jarell, W.M., & Beverly R.B. (1981). The dilution effect in plant nutrition studies. *Advances in Agronomy*. 34: 197–224.
 14. DSTU 3768-2010. Wheat. Technical specifications. - State Consumer Standard of Ukraine.[Pshenytsia. Tekhnichni umovy. Derzhspozhyv-standart Ukrainy]. 2010. C. 14.
 15. Rybalka, O. I., Chervonis, M. V., Parfentiev, M. G., & Axelrud, D. V. Pat. No 17023 Ukraine, (2006) A01N 1/04. Method for indirect evaluation of bo-roshna 'strength' - SDS-30 sedimentation. [Sposib nepriamoi otsinky «syly» bo-roshna – sedimentatsiia SDS-30]. Selection and Genetic Institute. No. u200610062; application for application for 06.02.2006; published 15.09.2006; Bulletin No. 9. 6 p. [in Ukrainian].
 16. Dospikhov, B. A. (1985). «Methods of field experience (with the basics of statistical processing of research results» [«Metody polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniy)», Moscow, Agropromizdat, 351 p. [in Ukrainian].
 17. Rybalka, O. I., Morgun, V. V., Morgun, B. V., Polishchuk, S. S., Chervonis, M. V., & Sokolov V. M. (2023). New genetic variation for improving the quality of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Cytology and Genetics*. [Nova henetychna variabelnist dlia polipshennia yakosti pshenytsi (*Triticum aestivum* L.)]. 57 (1). 1-11. [in Ukrainian].
 18. Rybalka, O. I., Morgun, B. V., & Polishchuk, S. S. (2018). *GPC-B1 (NAM-B1)* gene as a new genetic resource in wheat breeding for increasing the content of protein in grain and microelements. [*GPC-B1 (NAM-B1)* hen yak novyi henetychnyi resurs u selektsii pshenytsi na pidvyshchennia vmistu bilka v zerni ta mikroelementiv]. *Plant Physiology and Genetics*. 50. (4), 279-298. [in Ukrainian].
 19. Litvinenko, M. A., Topal., M. M. (2015). Effects of wheat-rye trans-locations 1AL/1RS and 1BL/1RS on grain quality in winter durum wheat varieties.. [Efekty pshenychno-zhytnikh trans-lokatsii 1AL/1RS I 1VL/1RS na yakist zerna u sortiv pshenytsi miakoi ozymoi]. *ScienceRise* № 3.1 (8). C. 82-87.
 20. Zhemela, G. P., & Kuznetsova, O. A. (2012). Influence of varietal properties on productivity and grain quality of soft winter wheat. [Vplyv sortovykh vlastyvoitei na produktyvnist ta yakist zerna pshenytsi miakoi ozymoi]. *Bulletin of Poltava State Agrarian Academy*. 3. 23-25.

ФІЗІОЛОГІЯ ЛЮДИНИ ТА ТВАРИН



УДК 615.9:504.5:57.087.1:577.322

[https://doi.org/10.18524/2077-1746.2024.2\(55\).320636](https://doi.org/10.18524/2077-1746.2024.2(55).320636)

S. I. Bendas¹, PhD student; <https://orcid.org/0009-0003-6654-1061>

B. M. Galkin², PhD in Biological Sciences, Professor;

<https://orcid.org/0000-0002-9503-1277>

N. A. Kyrylenko¹, PhD in Biological Sciences, Associate Professor;

<https://orcid.org/0000-0002-2612-4656>

Odesa I. I. Mechnikov National University, 2 Vsevoloda Zmiiienka St,
Odesa, 65082, Ukraine

¹Department of Physiology, Human Health and Safety and Natural Science Education;

²Biotechnology Science-Educational Centre, e-mail: bgalkin@ukr.net

***IN SILICO* STUDY OF THE ANTI-INFLAMMATORY PROPERTIES OF PFOA, PFOS, KClO₄, AND AlCl₃**

In this study, we used a machine learning-based toxicity prediction tool to assess the potential toxic effects of military and civil chemical pollutants (perfluorooctanoic acid, perfluorooctane sulfonic acid, AlCl₃, and KClO₄). Additionally, molecular docking and molecular dynamic simulations were employed to explore the interaction of perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonic acid with key protein targets. The results indicate that these ligands exhibit high binding affinities for human serum albumin, monoamine oxidase A and COX-1, suggesting potential impacts on protein function.

Keywords: inflammation, molecular docking analysis, molecular dynamic, aluminium chloride, potassium perchlorate, perfluorooctanoic acid, perfluorooctane sulfonic acid, binding.

Military operations cause extensive environmental damage. This includes industrial and chemical contamination, wildfires ignited by shelling, pollution and waste from military vehicles, toxic substances from weapons and missiles, emissions from the displacement of people, nuclear hazards and destruction of water resources [14]. War-induced environmental destruction is likely to lead to higher rates of illness and death among civilians [12]. Chemical pollution poses the most significant environmental threat in this situation [18]. Detonation of rockets and artillery results in the emission of a complex mixture of chemical compounds. These include carbon oxides, water vapor, nitrogen oxides, formaldehyde, hydrogen cyanide, and a variety of toxic organic substances. Additionally, heavy metals such as lead, arsenic, and mercury are released into the environment. Aluminum, while a versatile and widely used metal, can become a pollutant in the context of war. Its presence as a pollutant in war-torn environments arises from several factors, including its use in military equipment, weaponry, and infrastructure. Aluminum (Al³⁺) has a strong tendency to bind with and cross-link proteins. Unlike other common metals like iron, manganese,

and zinc, aluminum is not known to have any physiological role in the human body. Besides causing oxidative stress and attaching to negatively charged membrane structures in neurons, aluminum can also alter calcium signaling pathways in the hippocampus, which are essential for neuronal plasticity and, consequently, memory. [21, 13, 16]. Perchlorate is another chemical compound commonly employed in military ordnance and equipment, which poses a significant environmental and health concern. Its presence has been detected in various environmental matrices, including drinking water, air, soil, and even human breast milk. Human exposure to perchlorate primarily occurs in regions affected by armed conflict and areas adjacent to military training facilities [24, 8]. These pollutants are subsequently dispersed into soil, air, and water

Furthermore, munitions may contain per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS), which are characterized by their exceptional environmental persistence [17]. PFAS constitute a group of synthetic chemicals renowned for their oil-, water-, and heat-resistant properties. These compounds, commonly used in producing a range of consumer and industrial products, including non-stick cookware, food packaging, fire-fighting foams, and munitions, have become ubiquitous environmental contaminants due to their persistent nature [4]. Humans are primarily exposed to these contaminants through inhalation of contaminated air and dust, as well as ingestion. Such exposure has been associated with endocrine disruption, compromised immune function, and an increased risk of developing certain cancers [27, 17, 5]. Among the most prominent PFAS are perfluorooctane sulfonic acid (PFOS) and perfluorooctanoic acid (PFOA), which exhibit exceptional stability and resistance to degradation [20]. Bioaccumulation of PFAS in critical organs, such as the blood and liver, can induce adverse health effects even after cessation of exposure, underscoring the long-term implications of these persistent contaminants [1, 15]. Human serum albumin (HSA) is the main protein responsible for transporting substances in the blood and has been found to interact with PFAS at multiple binding sites. Consequently, it plays a significant role in the distribution and accumulation of PFAS in the body [9]. From the literature it is also known that PFAS activate nuclear receptor protein, specifically Peroxisome Proliferator-Activated Receptor alpha (PPAR α) and Peroxisome Proliferator-Activated receptor gamma (PPAR γ) [7].

HAS and PPAR-gamma have important roles in the inflammation process, either directly or indirectly. PPAR-gamma has strong anti-inflammatory effects and human serum albumin can modulate inflammatory responses, although its role is more indirect. These proteins are potential therapeutic targets for controlling inflammation in various diseases [9, 7]. The aim of this study is to investigate the potential toxicity of perfluorooctanoic acid, perfluorooctane sulfonic acid, AlCl₃, and KClO₄ using *in silico* approaches.

Materials and methods

Toxicity calculation for aluminium chloride, potassium perchlorate, perfluorooctanoic acid and perfluoro-octanesulfonic acid was performed with virtual lab ProTox 3.0 based on machine learning algorithms [2].

Molecular docking was provided using AutoDock Vina 1.2.5. (<http://vina.scripps.edu>), Schrödinger Maestro –2023–2 Glide (trial license). The molecular docking process was performed utilizing crystal structure of human serum albumin (7Z57), crystal structures of the ligand binding domain of human PPAR-gamma (2F4B), Human Monoamine Oxidase A in complex with Clorgyline (2BXR), Human COX-1 Crystal Structure (6Y3C) from the database of biological macromolecules PDB (<http://www.rcsb.org/>). During the research, perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonic acid were docked. The binding site was automatically identified based on the position of the reference ligand.

AutoDockVina-1.2.5. The structures of the ligands (perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonic acid and reference ligands) were provided in *.pdb format and optimized by the internal energy value in the Avogadro program (v 1.2.0) and the Merck molecular force field - algorithm (MMFF94), protonation at a physiological pH value of 7.4. Protein structures were optimized using AutoDock tools 1.5.7. For protein optimization polar hydrogens, Kollman charges were added and pdbqt format structure was obtained. The area of docking process was determined using grid box. We determined the strong binding affinity by the most negative Autodock Vina score [21].

Schrödinger Maestro Glide. The structures of the ligands (perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonic acid and reference ligands) were optimized using Lig-Prep, OPLS2005 force field algorithm, the pH range for the generation of tautomers and protonated states was 7,4. The protein was modelled using the Protein Preparation of Schrödinger Suite; to prepare the protein structure, hydrogen atoms were added and hydrogen bonds were optimized, pH 7.4. The following formula was used to rank the ligands based on their G-scores: $G\text{-score} = (0.05 * vdW) + (0.15 * Coul) + Lipo + Hbond + Metal + Rewards + RotB + Site (1)$; where vdW is the van der Waals energy, Coul represents the Coulomb energy, the term Lipo explains the lipophilicity Rewards describes the favorable hydrophobic interactions, Hbond is an indicator that reflects the hydrogen bond, Metal provides information about metal binding, RotB informs about the negative effect related to the freezing of spin bonds, and Site determines the polar interactions in the active site. The binding free energies (MM-GBSA) of the complexes were determined using the Prime module within the Schrödinger suite. The binding energy is determined using the formula: $\Delta G_{bind} = E_{complex}(minimized) - E_{ligand}(minimized) - E_{receptor}(minimized)$ [28, 29].

Visualization of docking results was performed using Schrödinger Maestro, DiscoveryStudio2021 (BIOVIA, Dassault Systèmes. Discovery Study), PyMOL (The PyMOL Molecular Graphics System, Version 3.0 Schrödinger, LLC).

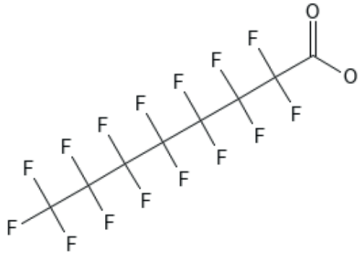
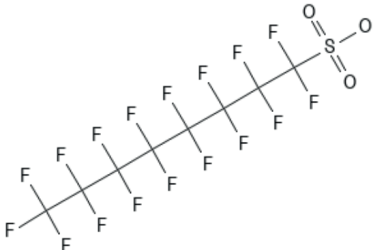
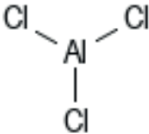
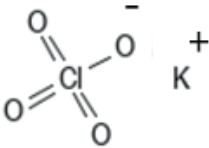
Molecular dynamic simulation was performed for complex (perfluorooctanoic acid-human serum albumin, AlCl_3 - human serum albumin) using software PlayMolecule. Ligands were prepared with GAFF2 force field and the parametrization function. We used ProteinPrepare tools for protein preparation [26] and SystemBuilder for building system for simulation (pH=7,4, forcefield Amber) [6, 26]. SimpleRun was used for the production molecular dynamic run, with a run time of 6 ns, globular simulation type [26].

Results and Discussion

We estimated the toxicity of a number of compounds that may have a military origin, using machine learning algorithm lab ProTox 3.0. ProTox 3.0 is particularly useful for predicting the toxicity of newly synthesized or experimentally unstudied compounds but can also be applied to already known chemicals to confirm or refine existing data. While these compounds may be part of the database on which the training algorithms were based, the new versions of ProTox 3.0 use improved machine learning models and more complete and updated datasets, potentially allowing for the consideration of new aspects of toxicity that may have been missed in previous studies [2]. Also, we provided docking analysis of perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonic acid, determining docking scores, free binding energy and mechanisms of binding. For a broader understanding of the stability of the complexes (human serum albumin with perfluorooctanoic acid and human serum albumin with AlCl_3), molecular modeling was carried out. All studied ligands in our research were presented in table 1.

Table 1

Structures of the studied compounds

Perfluorooctanoic acid (PFOA)	Perfluorooctane sulfonic acid (PFOS)
	
Aluminum chloride	Potassium perchlorate
	

Based on *in silico* toxicity study all studied substances (KClO_4 , AlCl_3 , PFOA, PFOS) may have the potential to cross the blood-brain barrier (Table 2). According to the prediction results, potassium perchlorate and aluminium chloride have influence on estrogenic receptors and have activity on transthyretin (TTR). Gorgogietas and colleagues indicate that aluminum salts cause a significant rise in estrogen receptor protein levels, potentially through alterations in estrogen receptor gene expression or the stability of the estrogen receptor protein. The authors assume that this effect could have impact on breast physiology by influencing estrogen receptor-mediated gene expression, either directly or indirectly, through interactions with estrogen receptor DNA binding [10]. Also, potassium perchlorate is primarily known for its role in disrupting thyroid function by inhibiting iodide uptake, which can lead to thyroid hormone imbalances [30]. The direct influence of KClO_4 on estrogenic receptors is less documented. The search results in scientific literature do not provide any information about the activity of potassium perchlorate or aluminum chloride on transthyretin (TTR). Furthermore, based on the results of ProTox 3.0 KClO_4 can have impact on pregnane X receptor (PXR). PXR is a nuclear receptor recognized as a key regulator of xenobiotics. It plays a crucial role in the regulation of the expression of genes responsible for drug-metabolizing enzymes and drug transporters, playing a vital role in detoxifying and removing xenobiotics and endotoxins from the body [23]. But there is no evidence in the scientific literature that KClO_4 has this influence. AlCl_3 exceeds the threshold for cardiotoxicity and ecotoxicity. AlCl_3 is predicted to be active in CYP2C9 inhibition according to ProTox 3.0, which means that the compound is likely to inhibit the enzyme cytochrome P450 2C9 (CYP2C9). It may cause adverse interactions with drugs that are processed by this enzyme, affecting their efficacy and safety. PFOA reaches levels associated with nephrotoxicity, carcinogenicity, and Tumor Suppressor p53. PFOS acid surpasses the threshold for respiratory toxicity.

ProTox 3.0 predictions indicate that PFOA and PFOS may have higher toxicological risks, particularly related to carcinogenicity, nephrotoxicity, and potential endocrine disruption. In November 2023, the International Agency for Research on Cancer (IARC) designated PFOA as a “carcinogen to humans” (Group 1) and PFOS as “possibly carcinogenic to humans” (Group 2B) [30]. Ducolomb and his colleagues have shown that PFOS and PFOA act on steroidogenic ovarian cells, acting as endocrine disruptors, which could influence the functions dependent on sexual steroids [3]. KClO_4 and AlCl_3 also demonstrate significant potential for toxicity through multiple pathways, with KClO_4 potentially posing risks to the endocrine systems, and AlCl_3 demonstrating cardiotoxicity. In the scientific literature, there is evidence that potassium perchlorate induces the development of dystrophic processes in the bone tissue of the jaws of rats with hypothyroidism. KClO_4 blocks the absorption of iodine by the thyroid gland and the synthesis of iodinase, which confirms the results of prediction [30]. AlCl_3 is recognized for its propensity to accumulate in several body tissues, including the liver, pancreas, kidneys, brain, and heart. It has been linked to liver damage, kidney toxicity, nervous system impairment, and heart toxicity [11].

Table 2

**Prediction toxicity of potassium perchlorate, aluminum chloride,
PFOA and PFOS**

Target	KClO ₄	AlCl ₃	PFOA	PFOS
	Probability/ Prediction	Probability/ Prediction	Probability/ Prediction	Probability/ Prediction
1	2	3	4	5
Hepatotoxicity	0.98/In	0.94/In	0.81/In	0.89/In
Neurotoxicity	0.91/In	0.68/In	0.88/In	0.94/In
Nephrotoxicity	0.62/In	0.70/In	0.51/Ac	0.52/In
Respiratory toxicity	0.61/In	0.67/In	0.59/In	0.54/Ac
Cardiotoxicity	0.97/In	0.55/Ac	0.89/In	0.88/In
Carcinogenicity	0.80/In	0.55/In	0.63/Ac	0.68/In
Immunotoxicity	0.99/In	0.99/In	0.99/In	0.99/In
Mutagenicity	0.75/In	0.84/In	0.92/In	0.64/In
Cytotoxicity	0.73/In	0.68/In	0.68/In	0.75/In
BBB-barrier	0.91/Ac	0.99/Ac	0.97/Ac	0.91/Ac
Ecotoxicity	0.52/In	0.68/Ac	0.85/In	0.61/In
Clinical toxicity	0.85/In	0.83/In	0.79/In	0.76/In
Nutritional toxicity	0.62/In	0.74/In	0.92/In	0.86/In
AhR	1/In	0.99/In	1/In	1/In
AR	1/In	1/In	1/In	1/In
AR-LBD	0.99/In	0.99/In	1/In	1/In
Aromatase	0.99/In	0.99/In	1/In	0.99/In
ER	1/Ac	0.99/In	1/In	0.99/In
ER-LBD	0.98/In	0.96/In	1/In	0.98/In
PPAR-Gamma	0.99/In	1/In	1/In	1/In
nrf2/ARE	1/In	0.90/In	1/In	0.96/In
HSE	1/In	0.90/In	1/In	0.96/In
MMP	0.99/In	0.93/In	1/In	0.93/In
Tumor Suppressor p53	0.98/In	0.89/In	0.77/Ac	0.97/In
ATAD5	0.99/In	0.99/In	1/In	1/In
THR α	0.85/In	0.94/In	0.90/In	0.90/In
THR β	0.81/In	0.93/In	0.78/In	0.78/In

Table 2

1	2	3	4	5
TTR	0.58/Ac	0.56/Ac	0.97/In	0.97/In
RYR	0.97/In	0.95/In	0.98/In	0.98/In
GABAR	0.71/In	0.71/In	0.96/In	0.96/In
NMDAR	0.90/In	0.93/In	0.92/In	0.92/In
AMPAR	0.99/In	0.99/In	0.97/In	0.97/In
KAR	1/In	1/In	0.99/In	0.99/In
AChE	0.58/In	0.64/In	0.81/In	0.89/In
CAR	0.99/In	1/In	0.98/In	0.98/In
PXR	0.59/Ac	0.55/In	0.92/In	0.92/In
NADHOX	0.69/In	0.75/In	0.97/In	0.97/In
VGSC	0.8/In	0.75/In	0.95/In	0.95/In
NIS	0.94/In	0.94/In	0.98/In	0.98/In
CYP1A2	0.92/In	0.87/In	0.9/In	0.93/In
CYP2C19	0.88/In	0.84/In	0.86/In	0.89/In
CYP2C9	0.54/In	0.59/Ac	0.55/In	0.60/In
CYP2D6	0.88/In	0.79/In	0.87/In	0.87/In
CYP3A4	0.98/In	0.98/In	0.99/In	0.99/In
CYP2E1	0.96/In	0.92/In	0.99/In	0.90/In

Notes: In-inactive, Ac-active, Aryl hydrocarbon Receptor (AhR), Androgen Receptor (AR), Androgen Receptor Ligand Binding Domain (AR-LBD), Estrogen Receptor Alpha (ER), Estrogen Receptor Ligand Binding Domain (ER-LBD), Peroxisome Proliferator Activated Receptor Gamma (PPAR-Gamma), Nuclear factor (erythroid-derived 2)-like 2/antioxidant responsive element (nrf2/ARE), Heat shock factor response element (HSE), Mitochondrial Membrane Potential (MMP), Phosphoprotein (Tumor Suppressor) p53, ATPase family AAA domain-containing protein 5 (ATAD5), Thyroid hormone receptor alpha (THR α), Thyroid hormone receptor beta (THR β), Transthyretin (TTR), Ryanodine receptor (RYR), GABA receptor (GABAR), Glutamate N-methyl-D-aspartate receptor (NMDAR), alpha-amino-3-hydroxy-5-methyl-4-isoxazolepropionate receptor (AMPAR), Kainate receptor (KAR), Achetylcholinesterase (AChE), Constitutive androstane receptor (CAR), Pregnane X receptor (PXR), NADH-quinone oxidoreductase (NADHOX), Voltage gated sodium channel (VGSC), Na⁺/I⁻ symporter (NIS)

ProTox 3.0 has predicted that PFOA and PFOS could have pharmacophore fit to Amine Oxidase A (MAO-A) 42.24%, 33.43%, and 38.99%, 50.55% to Prostaglandin G/H Synthase 1 (PGHS-1), respectively. Docking of PFOA and PFOS with MAO-A and PGHS-1 might be considered reasonable if the predicted pharmacophore fits suggest potential binding interactions. ProTox 3.0 predictions, although showing low prediction percentages, still indicated potential pharmacophore matches, which provides grounds for molecular docking (Table 3).

Table 3

Possible toxicity targets

Toxicity Target	PFOA	PFOS
Amine Oxidase A	42.24%	33.43%
Prostaglandin G/H Synthase 1	38.99%	50.55%

We performed docking of PFOA and PFOS with human serum albumin (7Z57), PPAR- γ (2F4B), monoamine oxidase A (2BXR) and COX-1 (6Y3C) (Table 4). According to AutoDock Vina and MMGBSA binding free energy calculations, the investigated ligands exhibit a strong binding affinity for human serum albumin, -9.2 kJ/mol for PFOA and -8.9 kJ/mol for PFOS (AutoDock Vina). We obtained moderate binding affinity results for the studied PFAS with PPAR γ , particularly from the analyses conducted using Schrödinger Maestro. The MM-GBSA binding energy for 2F4B with PFOA was -10.2 kJ/mol, while for 2F4B with PFOS, it was -4.8 kJ/mol. Scientific literature suggests that PFAS activate nuclear PPAR γ [7], leading us to hypothesize that PPAR γ undergoes conformational changes *in vivo* that enhance binding, which may not be accurately reflected in static crystal structures. On the other hand, ligands have moderate affinity of interaction with monoamine oxidase A. PFOS has docking score with MAO-A AutoDock Vina -9.5 kJ/mol and MMGBSA value -25.4 kJ/mol. PFOS also demonstrates reliable free binding energy of interaction with human COX-1 (-26,1 kJ/mol).

Table 4

Docking scores and free binding energy of PFAS with human serum albumin and PPAR- γ

Protein	Docking score	PFOA	PFOS	Reference ligand
7Z57	AutoDock Vina	-9.2	-8.9	-8.6
	Maestro Schrodinger	-6.2	-7.3	-7.3
	MMGBSA	-22.3	-27.9	-24.7
2F4B	AutoDock Vina	-7.4	-7.7	-10.6
	Maestro Schrodinger	-5.3	-4.5	-9.4
	MMGBSA	-10.2	-4.8	-41.1
2BXR	AutoDock Vina	-8.9	-9.5	-6.3
	Maestro Schrodinger	-5.8	-6.1	-2.7
	MMGBSA	-5.9	-25.4	-7.9
6Y3C	AutoDock Vina	-7.7	-7.0	-4.9
	Maestro Schrodinger	-5.5	-5.2	-6.3
	MMGBSA	-21.2	-26.1	-5.9

Notes: 7z57 -Crystal structure of Human Serum Albumin in complex with surfactant GenX (2,3,3,3-tetrafluoro-2-(heptafluoropropoxy) propanoate);

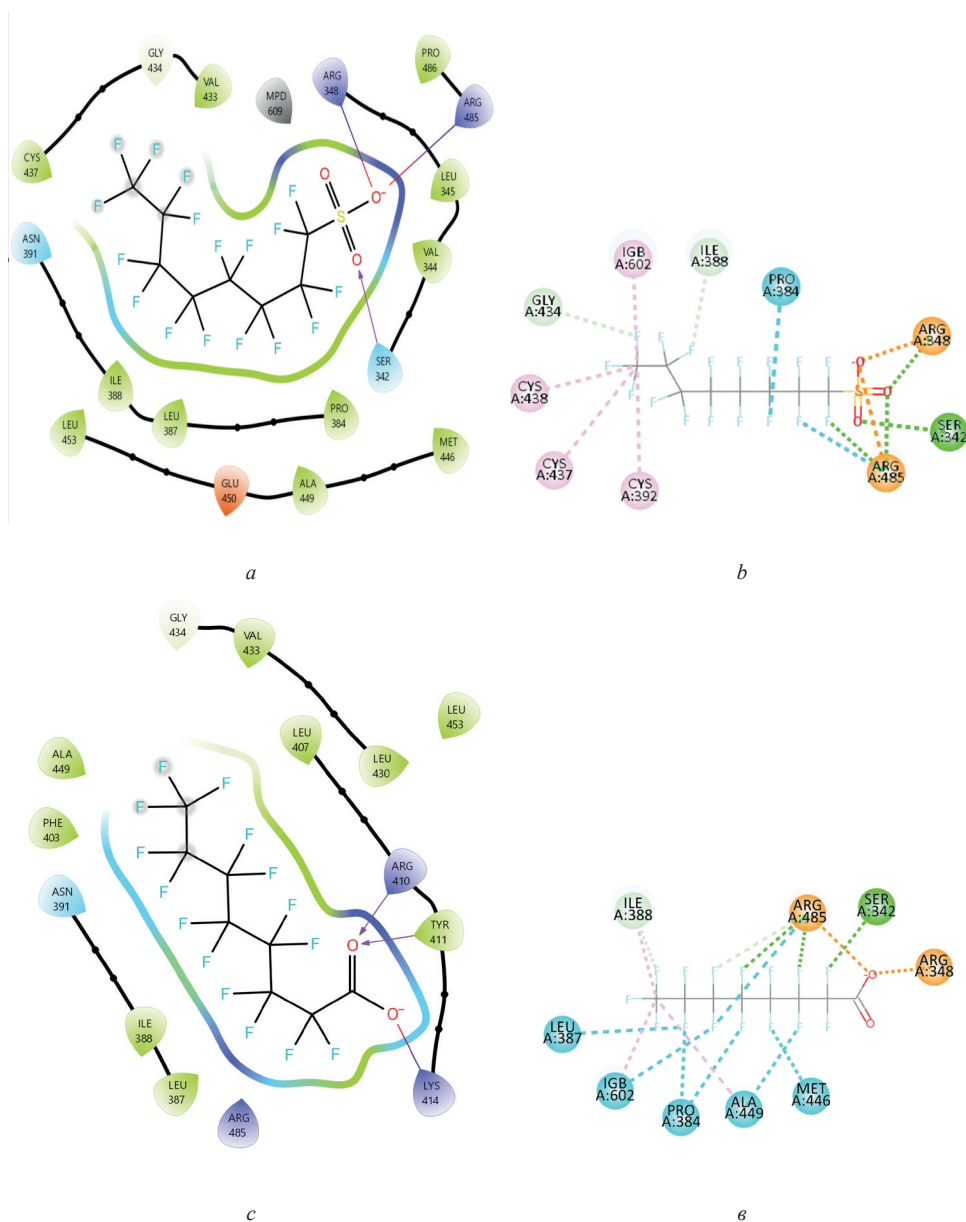
2f4b - Crystal structure of the ligand binding domain of human PPAR- γ in complex with an agonist;

2bxr - Human Monoamine Oxidase A in complex with Clorgy line, Crystal Form A;

6y3c - Human COX-1 Crystal Structure.

This interaction may influence the enzyme's function, potentially leading to toxicological or inflammation effects. Although there is no mention in the scientific literature of the effects of PFAS on MAO-A and human COX-1.

The investigated PFAS create the hydrogen bonds with SER 342, ARG 410 and TYR 411 of the HSA. PFOS creates hydrogen interaction by the sulfonic acid functional group and PFOA by the carboxyl group (Fig.1).



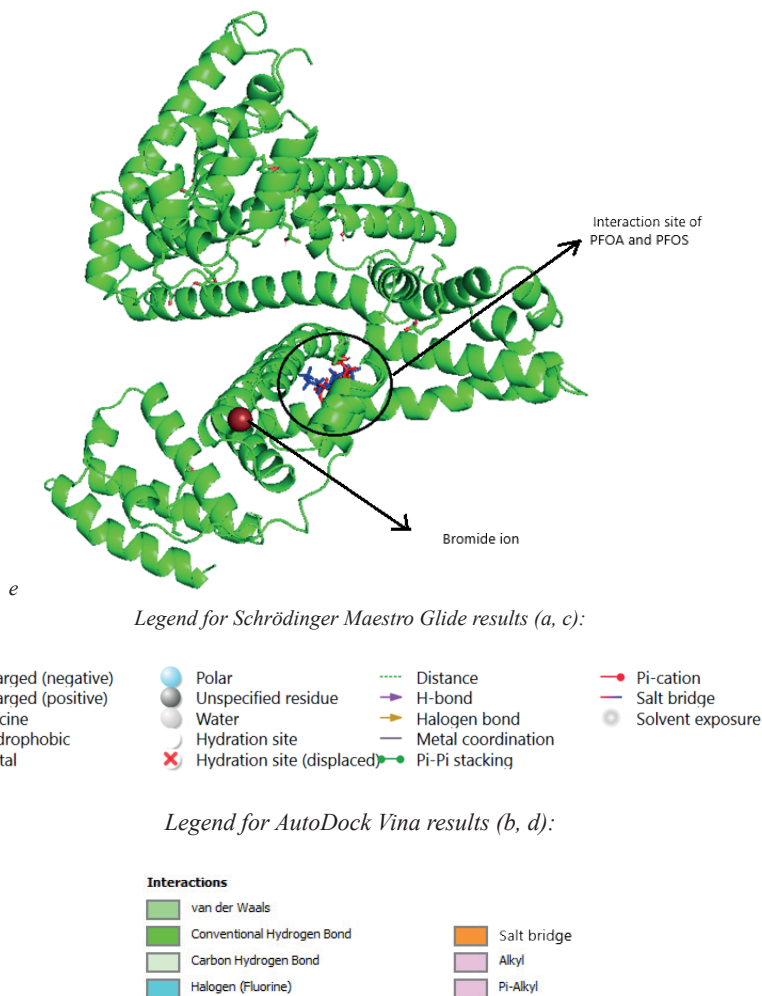


Fig. 1 a) Visualized position of PFOS in the specific binding sites of human serum albumin (Schrödinger Maestro Glide); b) Visualized position of PFOS in the specific binding sites of human serum albumin (AutoDock Vina); c) Visualized position of PFOA in the specific binding sites of human serum albumin (Schrödinger Maestro Glide); d) Visualized position of PFOA in the specific binding sites of human serum albumin (AutoDock Vina); e) Whole structure of complex human serum albumin with PFOA and PFOS;

Based on the molecular docking results ARG 348 and ARG 485 participated in salt bridges interactions with the studied ligands. Sepúlveda and colleagues observed that ligands with strong binding affinity to human serum albumin (HSA) predominantly form hydrogen bonds and salt bridges with the Arg485 and Arg348 residues [9].

Guo and colleagues reported in their studies that PFOA forms hydrogen bonds with the Ser289, His449, and Tyr473 residues of PPAR γ [19]. The predicted results

of our research indicated that PFOA creates a hydrogen bond with ARG 288 and PFOS with TYR 327. In our case Ser289, His449 form polar contacts with ligands. We performed molecular docking of the studied ligands at the clorgyline-binding site of monoamine oxidase A, to analyze their interactions. PFOS creates a hydrogen bond interaction with ALA 68 and arginine TYR 69 of the binding site of monoamine oxidase A. Given that amine oxidase A regulates amines such as dopamine, serotonin, and norepinephrine, the possibility of PFOA and PFOS interacting suggests that they may affect neurotransmitter levels, potentially leading to mood-related or neurological problems.

Both PFOA and PFOS form of the hydrogen bonds interaction with glutamate 524 and arginine 120 of the cyclooxygenase 1 (COX -1). Interaction with COX-1 raises concerns about potential effects on inflammation, gastric health, and blood clotting. PFOS, with a higher probability of interaction with COX-1, may pose a slightly higher risk for these pathways than PFOA. Based on the positive molecular docking results of PFOA with HSA, we performed molecular dynamics (MD) simulations of these complexes to further explore the mechanisms of interaction. We also provided MD simulation of the HSA with $AlCl_3$ to modulate presence of cations Al^{3+} (fig. 2, 3).

The difference between the RMSD (root mean square deviation) values at 6 ns and 3 ns for the protein without a ligand is 1.733. It shows a significant increase in RMSD over time. This suggests that the protein structure undergoes substantial conformational changes when unbound, indicating flexibility or instability in the absence of a ligand. The protein with the PFOA ligand has a smaller RMSD range (0.973), indicating that PFOA binding helps stabilize the protein structure to some extent. The overall RMSD values are also lower compared to the unbound protein, suggesting that PFOA may confer some structural stability. The protein with $AlCl_3$ shows moderate structural changes over time with an RMSD range of 1.047. The initial RMSD at 3 ns is slightly higher than for PFOA, which might suggest a more flexible starting structure with this ligand. However, its overall stability appears similar to PFOA, although it does not stabilize the protein as effectively as PFOA. The complex HAS with $AlCl_3$ shows the highest RMSD fluctuations, reaching peaks close to or above 2.5 Å, indicating that it undergoes larger structural deviations.

If PFOA binds tightly to HAS, it could compete with the molecules for binding sites on HSA, potentially displacing essential substances or reducing the transport efficiency of these molecules. It could lead to accumulation of PFOA in the bloodstream, since it may bind strongly and remain bound to albumin over time. HSA plays a crucial role in maintaining colloid osmotic pressure (oncotic pressure) in the blood, which helps to retain fluid within blood vessels. If PFOA binding alters the structure or functional sites of HSA, it could impact HSA's ability to maintain this pressure.

The RMSF (Root Mean Square Fluctuation) analysis was performed to assess the movement of residues following ligand binding (Fig.3). $AlCl_3$ often causes the highest fluctuation across several residues (51–101 and 501–551), indicating that

Table 5

Visualization of the location of PFOA and PFOS in the specific binding site of the studied targets Maestro Schrödinger Suite

Protein	PFOA	PFOS																				
<i>2F4B</i>																						
<i>2BXR</i>																						
<i>6Y3C</i>																						
<table border="0"> <tr> <td> Charged (negative)</td> <td> Polar</td> <td> Distance</td> <td> Pi-cation</td> </tr> <tr> <td> Charged (positive)</td> <td> Unspecified residue</td> <td> H-bond</td> <td> Salt bridge</td> </tr> <tr> <td> Glycine</td> <td> Water</td> <td> Halogen bond</td> <td> Solvent exposure</td> </tr> <tr> <td> Hydrophobic</td> <td> Hydration site</td> <td> Metal coordination</td> <td></td> </tr> <tr> <td> Metal</td> <td> Hydration site (displaced)</td> <td> Pi-Pi stacking</td> <td></td> </tr> </table>			Charged (negative)	Polar	Distance	Pi-cation	Charged (positive)	Unspecified residue	H-bond	Salt bridge	Glycine	Water	Halogen bond	Solvent exposure	Hydrophobic	Hydration site	Metal coordination		Metal	Hydration site (displaced)	Pi-Pi stacking	
Charged (negative)	Polar	Distance	Pi-cation																			
Charged (positive)	Unspecified residue	H-bond	Salt bridge																			
Glycine	Water	Halogen bond	Solvent exposure																			
Hydrophobic	Hydration site	Metal coordination																				
Metal	Hydration site (displaced)	Pi-Pi stacking																				

Notes: *2F4B* - Crystal structure of the ligand binding domain of human PPAR-gamma in complex with an agonist; *2BXR* - Human Monoamine Oxidase A in complex with Clorgy line, Crystal Form A; *6Y3C* - Human COX-1 Crystal Structure

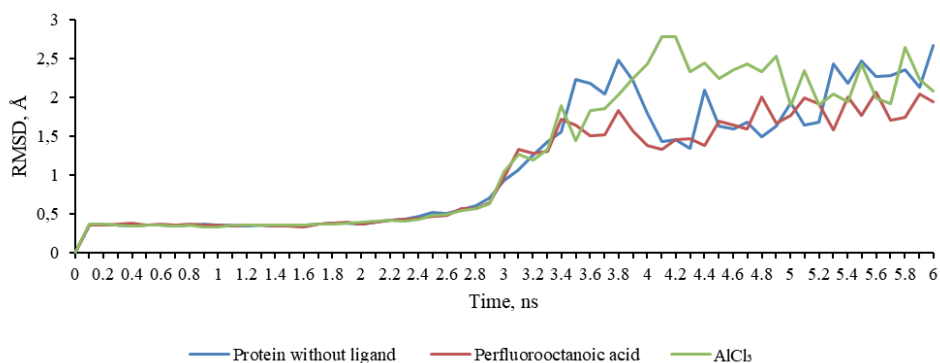


Fig. 2 RMSD values of HSA without and in complex with ligands

AlCl_3 presence increases the flexibility of certain parts of the protein more than PFOA or the unbound state. PFOA tends to show the lowest RMSF across most residues, indicating that it stabilizes the protein more, potentially reducing the flexibility in these regions.

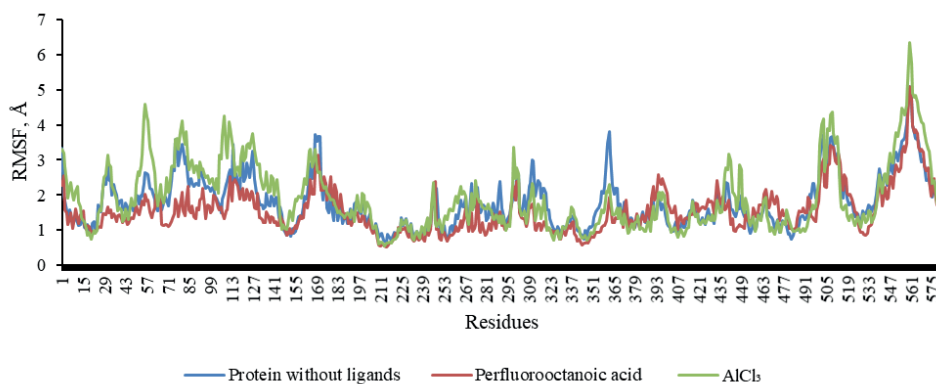


Fig.3 RMSF values of human serum albumin without and in complex with ligands

Conclusion

Based on the prediction toxicity machine learning based virtual lab ProTox 3.0 all compounds (KClO_4 , AlCl_3 , PFOA, PFOS) demonstrate significant potential for toxicity through multiple pathways, such as carcinogenicity, nephrotoxicity for PFOA, respiratory toxicity for PFOS, cardiotoxicity for AlCl_3 and estrogenic receptor alpha toxicity for KClO_4 . According to ProTox 3.0 PFOA and PFOS can create interaction with Prostaglandin G/H Synthase 1 and Amine Oxidase A.

HSA showed the best docking score and binding free energy among the target proteins when docked with PFOA and PFOS. Binding of PFOA to human serum albumin, leading to its stabilization, could disrupt many of the essential functions that HSA performs in the blood. This binding could contribute to bioaccumulation, interfere with normal transport processes, impact drug efficacy, and potentially lead to chronic health issues by continuously exposing the body to PFAS toxicity. The persistence of PFOA-bound HSA in circulation thus represents a pathway for prolonged exposure and associated health risks.

The molecular docking results indicate that PFOS has moderate binding affinities with Monoamine Oxidase A and COX-1. These results are theoretical predictions and require further experimental studies.

These findings contribute valuable insights into the toxicity profiles and biological interactions of these pollutants, providing a foundation for further toxicological studies.

The research paper was received on November 7, 2024

References

1. Alcaraz C., Caiola N., Ibáñez C. Bioaccumulation of pollutants in the zebra mussel from hazardous industrial waste and evaluation of spatial distribution using GAMs. *The Science of the Total Environment*. 2011. V. 409 (5). P. 898–904. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.11.015>.
2. Banerjee P., Kemmler E., Dunkel M., Preissner R. ProTox 3.0: A webserver for the prediction of toxicity of chemicals. *Nucleic Acids Research*. 2024. V. 52 (1). P. W513–W520. <https://doi.org/10.1093/nar/gkae303>.
3. Chaparro-Ortega A., Betancourt M., Rosas P., Vázquez-Cuevas F. G., Chavira R., Bonilla E., Casas E., Ducolomb Y. Endocrine disruptor effect of perfluorooctane sulfonic acid (PFOS) and perfluorooctanoic acid (PFOA) on porcine ovarian cell steroidogenesis. *Toxicology in vitro : an international journal published in association with BIBRA*. 2018. V. 46. P. 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2017.09.030>
4. Cousins E. M., Richter L., Cordner A., Brown P., Diallo S. Risky Business? Manufacturer and Retailer Action to Remove Per- and Polyfluorinated Chemicals From Consumer Products. *New Solutions: A Journal of Environmental and Occupational Health Policy: NS*. 2019. V. 29 (2). P. 242–265. <https://doi.org/10.1177/1048291119852674>.
5. DeWitt J. C., Blossom S. J., Schaidler L. A. Exposure to per-fluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances leads to immunotoxicity: Epidemiological and toxicological evidence. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*. 2019. V. 29 (2). P. 148–156. <https://doi.org/10.1038/s41370-018-0097-y>.
6. Doerr S., Harvey M. J., Noé F., De Fabritiis G. HTMD: High-Throughput Molecular Dynamics for Molecular Discovery. *Journal of Chemical Theory and Computation*. 2016. V. 12 (4). P. 1845–1852. <https://doi.org/10.1021/acs.jctc.6b00049>.
7. Evans N., Conley J. M., Cardon M., Hartig P., Medlock-Kakaley E., Gray L. E. In vitro activity of a panel of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS), fatty acids, and pharmaceuticals in peroxisome proliferator-activated receptor (PPAR) alpha, PPAR gamma, and estrogen receptor assays. *Toxicology and Applied Pharmacology*. 2022. V. 449. P. 116136. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2022.116136>.
8. Furman B. L. Potassium Perchlorate. *Reference Module in Biomedical Sciences*. Elsevier. 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801238-3.98055-3>.
9. Gallagher A., Kar S., Sepúlveda M. S. Computational Modeling of Human Serum Albumin Binding of Per- and Polyfluoroalkyl Substances Employing QSAR, Read-Across, and Docking. *Molecules*. 2023. V. 28 (14). Article 14. <https://doi.org/10.3390/molecules28145375>.
10. Gorgogietas V. A., Tsialtas I., Sotiropoulou N., Laschou V. C., Karra, A. G., Leonidas D. D., Chrousos G. P., Prototopa, E., Psarra, A. G. Potential interference of aluminum chlorohydrate with estrogen receptor signaling in breast cancer cells. *Journal of molecular biochemistry*. 2018. V. 7(1). P. 1–13.

11. Hawas A. M. M., Rashed L. A., Mohamed, M. A. E. H. Evaluation of glucosamine effect against heart and brain damage induced by Y-radiation or aluminium chloride in female rats. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 2020. V. 63. e20180687. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2020180687>
12. Hryhorczuk D., Levy B. S., Prodanchuk M., Kravchuk O., Bubalo N., Hryhorczuk A., Erickson T. B. The environmental health impacts of Russia's war on Ukraine. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*. 2024. V. 19 (1). P. 1. <https://doi.org/10.1186/s12995-023-00398-y>.
13. Kawahara M., Kato-Negishi M. Link between Aluminum and the Pathogenesis of Alzheimer's Disease: The Integration of the Aluminum and Amyloid Cascade Hypotheses. *International Journal of Alzheimer's Disease*. 2011. V. 2011. P. 276393. <https://doi.org/10.4061/2011/276393>.
14. Khrushch O., Moskalets V., Fedyk O., Karpyuk Y., Hasiuk M., Ivantsev N., Ivantsev L., Arjjumend H. Environmental and Psychological Effects of Russian War in Ukraine. *Grassroots Journal of Natural Resources*. 2023. V. 6. P. 37–84. <https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.060103>.
15. Kim M., Li L. Y., Grace J. R., Yue C. Selecting reliable physicochemical properties of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) based on molecular descriptors. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*. 2015. V. 196. P. 462–472. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.11.008>.
16. Klotz K., Weistenhöfer W., Neff F., Hartwig A., van Thriel C., Drexler H. The Health Effects of Aluminum Exposure. *Deutsches Ärzteblatt International*. 2017. V. 114 (39). P. 653–659. <https://doi.org/10.3238/arztebl.2017.0653>.
17. Koban L. A., Pfluger A. R. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) exposure through munitions in the Russia-Ukraine conflict. *Integrated Environmental Assessment and Management*. 2023. V. 19 (2). P. 376–381. <https://doi.org/10.1002/ieam.4672>.
18. Krainiuk O. V., Buts Y. V., Didenko N. V., Barbashyn V. V. Ecological Consequences of Environmental Pollution with Heavy Metals as a Result of the War in Ukraine. 2023. V. 1. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520013>.
19. Li C.-H., Ren X.-M., Guo L.-H. Adipogenic Activity of Oligomeric Hexafluoropropylene Oxide (Perfluorooctanoic Acid Alternative) through Peroxisome Proliferator-Activated Receptor γ Pathway. *Environmental Science & Technology*. 2019. V. 53 (6). P. 3287–3295. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06978>.
20. Martin J. W., Smithwick M. M., Braune B. M., Hoekstra P. F., Muir D. C. G., Mabury S. A. Identification of long-chain perfluorinated acids in biota from the Canadian Arctic. *Environmental Science & Technology*. 2004. V. 38 (2). P. 373–380. <https://doi.org/10.1021/es034727+>.
21. Morris G. M., Huey R., Lindstrom W., Sanner M. F., Belew R. K., Goodsell D. S., Olson A. J. AutoDock4 and AutoDockTools4: Automated docking with selective receptor flexibility. *Journal of Computational Chemistry*. 2009. V. 30 (16). P. 2785–2791. <https://doi.org/10.1002/jcc.21256>.
22. Nday C. M., Drever B. D., Salifoglou T., Platt B. Aluminium interferes with hippocampal calcium signaling in a species-specific manner. *Journal of Inorganic Biochemistry*. 2010. V. 104 (9). P. 919–927. <https://doi.org/10.1016/j.jinorgbio.2010.04.010>.
23. Oladimeji P. O., Chen T. PXR: More Than Just a Master Xenobiotic Receptor. *Molecular Pharmacology*. 2018. V. 93 (2). P. 119–127. <https://doi.org/10.1124/mol.117.110155>.
24. United States. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. PFAS : an overview of the science and guidance for clinicians on per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). 2019
25. Reh B., Wang X., Feng Y., Bhandari R. K. Potassium perchlorate effects on primordial germ cells of developing medaka larvae. *Aquatic Toxicology*. 2022. V. 251. P. 106283. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2022.106283>.
26. Torrens-Fontanals M., Tourlas P., Doerr S., De Fabritiis G. PlayMolecule Viewer: A Toolkit for the Visualization of Molecules and Other Data. *Journal of Chemical Information and Modeling*. 2024. V. 64 (3). P. 584–589. <https://doi.org/10.1021/acs.jcim.3c01776>.
27. Tavasoli E., Luck J. L., Malley J. P., Mouser P. J. Distribution and fate of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in wastewater treatment facilities. *Environmental Science. Processes & Impacts*. 2021. V. 23 (6). P. 903–913. <https://doi.org/10.1039/d1em00032b>.
28. Friesner R. A., Murphy R. B., Repasky M. P., Frye L. L., Greenwood J. R., Halgren T. A., Sanschagrin P. C., Mainz D. T. Extra precision glide: Docking and scoring incorporating a model of hydrophobic enclosure for protein-ligand complexes. *Journal of Medicinal Chemistry*. 2006. V. 49 (21). P. 6177–6196. <https://doi.org/10.1021/jm051256o>
29. Yang Y., Yao K., Repasky M. P., Leswing K., Abel R., Shoichet B. K., Jerome S. V. Efficient exploration of chemical space with docking and deep learning. *Journal of Chemical Theory and Computation*. 2021. V. 17 (11). P. 7106–7119. <https://doi.org/10.1021/acs.jctc.1c00810>
30. Zahm S., Bonde J.P., Chiu W.A., Hoppin J., Kanno J., Abdallah M., Blystone C.R., Calkins M.M., Dong G.H., Dorman D.C., Fry R., Guo H., Haug L.S., Hofmann J.N., Iwasaki M., Machala M., Mancini F.R., Maria-Engler S.S., Møller P., Ng J.C., Pallardy M., Post G.B., Salihovic S., Schlezinger J., Soshilov A., Steenland K.,

Steffensen I.L., Tryndyak V., White A., Woskie S., Fletcher T., Ahmadi A., Ahmadi N., Benbrahim-Tallaa L., Bijoux W., Chittiboyina S., de Conti A., Facchin C., Madia F., Mattock H., Merdas M., Pasqual E., Suonio E., Viegas S., Zupunski L., Wedekind R., Schubauer-Berigan M.K. Carcinogenicity of perfluorooctanoic acid and perfluorooctanesulfonic acid. *The Lancet. Oncology*. 2024. V. 25(1), P. 16–17. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(23\)00622-8](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(23)00622-8)

31. Макаренко О. А., Задерей О. В., Зубачик М. В. Експериментальне обґрунтування профілактики порушень метаболізму кісткової тканини щелеп шурів при гіпотиреозі. *Проблеми ендокринної патології*. 2022. № 3(79). С. 65–71. <https://doi.org/10.21856/j-PEP.2022.3.09>

С. І. Бендас¹, Б. М. Галкін², Н. А. Кириленко¹,

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова;

¹Кафедра фізіології, здоров'я і безпеки людини та природничої освіти;

²Біотехнологічний науково-навчальний центр, Одеса, вул. Всеволода Змієнка, 2, м. Одеса, 65082, Україна, e-mail: bgalkin@ukr.net

***IN SILICO* ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОТИЗАПАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ PFOA, PFOS, КСІО₄ ТА АІСІ₃**

Резюме

Вступ. Військові дії завдають великої шкоди навколишньому середовищу. Найбільшу екологічну загрозу в цій ситуації становить хімічне забруднення (оксиди вуглецю, оксиди азоту, формальдегід, ціанід водню, калію перхлорат, алюміній та різноманітні токсичні органічні речовини). Крім того, боеприпаси можуть містити пер- та поліфторалкільні речовини (PFAS), які характеризуються винятковою екологічною стійкістю. Серед найвідоміших PFAS є перфтороктансульфонова кислота (PFOS) і перфтороктанова кислота (PFOA), які виявляють виняткову стабільність і стійкість до деградації. На нашу думку ці хімічні сполуки є високо токсичними та можуть підсилювати запальні процеси в організмі.

Мета: дослідження потенційної токсичності перфтороктанової кислоти, перфтороктанової сульфокислоти, АІСІ₃ і КСІО₄ за допомогою підходів *in silico*.

Методи. Розрахунок токсичності хлориду алюмінію, перхлорату калію, перфтороктанової кислоти та перфтороктансульфонокислоти проводили за допомогою віртуальної лабораторії ProTox 3.0 на основі алгоритмів машинного навчання. Молекулярний докінг був забезпечений за допомогою AutoDock Vina 1.2.5. (<http://vina.scripps.edu>), Schrödinger Maestro–2023–2 Glide (пробна ліцензія). Процедура молекулярного докінгу проводили з використанням кристалічної структури сироваткового альбуміну людини (7Z57), кристалічних структур лігандзв'язуючого домену PPAR-гамма людини (2F4B), моноаміноксидази А людини в комплексі з клоргіліном (2BXR), ЦОГ людини -1 Crystal Structure (6Y3C) з бази даних біологічних макромолекул PDB (<http://www.rcsb.org/>). Під час досліджень проводили докінг перфтороктанової кислоти та перфтороктанової сульфокислоти. Молекулярно-динамічне моделювання було виконано для комплексу (перфтороктанова кислота – сироватковий альбумін людини, АІСІ₃ – сироватковий альбумін людини) за допомогою програмного забезпечення PlayMolecule.

Результати. На основі віртуальної лабораторії ProTox 3.0, заснованої на машинному навчанні прогнозування токсичності, усі сполуки (КСІО₄, АІСІ₃, перфтороктанова кислота, перфтороктанова сульфоновна кислота) демонструють значні потенціали токсичності, такі як канцерогенність, нефротоксичність

для перфтороктанової кислоти, респіраторна токсичність для перфтороктанової сульфокислоти, кардіотоксичність для AlCl_3 і альфа-токсичність естрогенного рецептора для KClO_4 . Відповідно до ProTox 3.0 перфтороктанова кислота та перфтороктансульфонова кислота можуть взаємодіяти з простагландин G/H синтазою 1 та аміноксидазою А. Людський сироватковий альбумін показав найкращий показник докінгу та вільну енергію зв'язування серед цільових білків при докуванні з перфтороктановою кислотою та перфтороктановою сульфокислотою. Результати молекулярного докінгу демонструють, що перфтороктансульфонова кислота має помірну афінність зв'язування з моноаміноксидазою А та ЦОГ-1. Ці результати є теоретичними прогнозами і потребують подальших експериментальних досліджень.

Висновки. Дослідження токсичності за допомогою віртуальної лабораторії ProTox 3.0 та молекулярного докінгу виявило значний токсикологічний потенціал досліджуваних сполук (KClO_4 , AlCl_3 , перфтороктанової кислоти, перфтороктанової сульфонові кислоти). Зв'язування PFOA з сироватковим альбуміном людини, що призводить до його стабілізації, може порушити багато основних функцій, які HSA виконує в крові. Це зв'язування може сприяти біоаккумуляції, перешкоджати нормальним транспортним процесам, впливати на ефективність ліків і потенційно призводити до хронічних проблем зі здоров'ям через постійний вплив на організм токсичності PFAS. Таким чином, стійкість HSA, пов'язаного з PFOA, у циркуляції, може бути шляхом для тривалого впливу та пов'язаних із цим ризиків для здоров'я.

Ключові слова: запалення, аналіз молекулярного докінгу, молекулярна динаміка, перфтороктанова кислота, перфтороктан сульфокислота, зв'язування.

S. I. Bendas¹, B. M. Galkin², N. A. Kyrylenko¹

Odesa I. I. Mechnikov National University,

¹Department of Physiology, Human Health and Safety and Natural Science Education

²Biotechnology Science-Educational Centre; 2 Vsevoloda Zmiienka St, Odesa, 65082, Ukraine, e-mail: bgalkin@ukr.net

IN SILICO STUDY OF THE ANTI-INFLAMMATORY PROPERTIES OF PFOA, PFOS, KClO_4 , AND AlCl_3

Summary

Introduction. Military operations cause great damage to the environment. The great-est environmental threat in this situation is chemical pollution (carbon oxides, nitro-gen oxides, formaldehyde, hydrogen cyanide, potassium perchlorate, aluminum and various toxic organic substances). In addition, ammunition may contain per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS), which are characterized by exceptional envi-ronmental stability. Among the most famous PFAS are perfluorooctane sulfonic acid (PFOS) and perfluorooctanoic acid (PFOA), which exhibit exceptional stability and resistance to degradation. In our opinion, these chemical compounds are highly toxic and can enhance inflammatory processes in the body.

Aim. to study the potential toxicity of perfluorooctanoic acid, perfluorooctane sulfonic acid, AlCl_3 and KClO_4 using *in silico* approaches.

Methods. The toxicity of aluminum chloride, potassium perchlorate, perfluorooctanoic acid, and perfluorooctane sulfonic acid was calculated using the ProTox 3.0 virtual laboratory based on machine learning algorithms. Molecular docking was performed using AutoDock Vina 1.2.5. (<http://vina.scripps.edu>), Schrödinger Maestro–2023–2 Glide (trial license). The molecular docking procedure was performed using the crystal structure of human serum albumin (7Z57), crystal structures of the ligand-binding domain of human PPAR-gamma (2F4B), human monoamine oxidase A in complex with clorgyline (2BXR), human COX-1 Crystal Structure (6Y3C) from the PDB database of biological macromolecules (<http://www.rcsb.org/>). During the studies, docking of perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonic acid was performed. Molecular dynamics simulations were performed for the complex (perfluorooctanoic acid – human serum albumin, AlCl_3 – human serum albumin) using the PlayMolecule software.

Results. Based on the ProTox 3.0 virtual laboratory based on machine learning for toxicity prediction, all compounds (KClO_4 , AlCl_3 , perfluorooctanoic acid, perfluorooctanoic sulfonic acid) show significant toxicity potential through several pathways such as carcinogenicity, nephrotoxicity for perfluorooctanoic acid, respiratory toxicity for perfluorooctanoic sulfonic acid, cardiotoxicity for AlCl_3 and estrogen receptor alpha toxicity for KClO_4 . According to ProTox 3.0, perfluorooctanoic acid and perfluorooctanoic sulfonic acid can interact with prostaglandin G/H synthase 1 and amine oxidase A. Human serum albumin showed the best docking score and binding free energy among the target proteins when docked with perfluorooctanoic acid and perfluorooctanoic sulfonic acid. The molecular docking results indicate that PFOS has moderate binding affinities with Monoamine Oxidase A and COX-1. These results are theoretical predictions and require further experimental studies.

Conclusions. Toxicity studies using the ProTox 3.0 virtual laboratory and molecular docking revealed significant toxicological potential of the compounds tested (KClO_4 , AlCl_3 , perfluorooctanoic acid, perfluorooctanoic acid). Binding of PFOA to human serum albumin, resulting in its stabilization, may disrupt many of the essential functions that HSA performs in the blood. This binding may promote bioaccumulation, interfere with normal transport processes, affect drug efficacy, and potentially lead to chronic health problems due to ongoing exposure to PFAS toxicity. Thus, the persistence of PFOA-bound HSA in the circulation may be a pathway for long-term exposure and associated health risks.

Keywords: inflammation, molecular docking analysis, molecular dynamics, perfluorooctanoic acid, perfluorooctane sulfonic acid, binding.

References

1. Alcaraz, C., Caiola, N., & Ibáñez, C. (2011). Bioaccumulation of pollutants in the zebra mussel from hazardous industrial waste and evaluation of spatial distribution using GAMs. *The Science of the Total Environment*, 409(5), 898–904. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.11.015>
2. Banerjee, P., Kemmler, E., Dunkel, M., & Preissner, R. (2024). ProTox 3.0: A webserver for the prediction of toxicity of chemicals. *Nucleic Acids Research*, 52(W1), W513–W520. <https://doi.org/10.1093/nar/gkae303>
3. Chaparro-Ortega, A., Betancourt, M., Rosas, P., Vázquez-Cuevas, F. G., Chavira, R., Bonilla, E., Casas, E., & Ducolomb, Y. (2018). Endocrine disruptor effect of perfluorooctane sulfonic acid (PFOS) and perfluorooctanoic acid (PFOA) on porcine ovarian cell steroidogenesis. *Toxicology in vitro : an international journal published in association with BIBRA*, 46, 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2017.09.030>
4. Cousins, E. M., Richter, L., Corder, A., Brown, P., & Diallo, S. (2019). Risky Business? Manufacturer and Retailer Action to Remove Per- and Polyfluorinated Chemicals From Consumer Products. *New*

- Solutions: A Journal of Environmental and Occupational Health Policy: NS, 29(2), 242–265. <https://doi.org/10.1177/1048291119852674>*
5. DeWitt, J. C., Blossom, S. J., & Schaidler, L. A. (2019). Exposure to per-fluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances leads to immunotoxicity: Epidemiological and toxicological evidence. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology, 29(2)*, 148–156. <https://doi.org/10.1038/s41370-018-0097-y>
 6. Doerr, S., Harvey, M. J., Noé, F., & De Fabritiis, G. (2016). HTMD: High-Throughput Molecular Dynamics for Molecular Discovery. *Journal of Chemical Theory and Computation, 12(4)*, 1845–1852. <https://doi.org/10.1021/acs.jctc.6b00049>
 7. Evans, N., Conley, J. M., Cardon, M., Hartig, P., Medlock-Kakaley, E., & Gray, L. E. (2022). *In vitro* activity of a panel of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS), fatty acids, and pharmaceuticals in peroxisome proliferator-activated receptor (PPAR) alpha, PPAR gamma, and estrogen receptor assays. *Toxicology and Applied Pharmacology, 449*, 116136. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2022.116136>
 8. Furman, B. L. (2017). Potassium Perchlorate. In *Reference Module in Biomedical Sciences*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801238-3.98055-3>
 9. Gallagher, A., Kar, S., & Sepúlveda, M. S. (2023). Computational Modeling of Human Serum Albumin Binding of Per- and Polyfluoroalkyl Substances Employing QSAR, Read-Across, and Docking. *Molecules, 28(14)*, Article 14. <https://doi.org/10.3390/molecules28145375>
 10. Gorgogietas, V. A., Tsialtas, I., Sotiriou, N., Laschou, V. C., Karra, A. G., Leonidas, D. D., Chrousos, G. P., Protopapa, E., & Psarra, A. G. (2018). Potential interference of aluminum chlorohydrate with estrogen receptor signaling in breast cancer cells. *Journal of molecular biochemistry, 7(1)*, 1–13.
 11. Hawas, A. M. M., Rashed, L. A., & Mohamed, M. A. E. H. (2020). Evaluation of glucosamine effect against heart and brain damage induced by Y-radiation or aluminium chloride in female rats. *Brazilian Archives of Biology and Technology, 63*, e20180687. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2020180687>
 12. Hryhoreczuk, D., Levy, B. S., Prodanchuk, M., Kravchuk, O., Bubalo, N., Hryhoreczuk, A., & Erickson, T. B. (2024). The environmental health impacts of Russia's war on Ukraine. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology, 19(1)*, 1. <https://doi.org/10.1186/s12995-023-00398-y>
 13. Kawahara, M., & Kato-Negishi, M. (2011). Link between Aluminum and the Pathogenesis of Alzheimer's Disease: The Integration of the Aluminum and Amyloid Cascade Hypotheses. *International Journal of Alzheimer's Disease, 2011*, 276393. <https://doi.org/10.4061/2011/276393>
 14. Khrushch, O. Moskalets, V., Fedyk, O., Karpyuk, Y., Hasiuk, M., Ivantsev, N., Ivantsev, L., & Arjjumend, H. (2023). Environmental and Psychological Effects of Russian War in Ukraine. *Grassroots Journal of Natural Resources, 6*, 37–84. <https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.060103>
 15. Kim, M., Li, L. Y., Grace, J. R., & Yue, C. (2015). Selecting reliable physicochemical properties of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) based on molecular descriptors. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987), 196*, 462–472. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.11.008>
 16. Klotz, K., Weistenhöfer, W., Neff, F., Hartwig, A., van Thriel, C., & Drexler, H. (2017). The Health Effects of Aluminum Exposure. *Deutsches Ärzteblatt International, 114(39)*, 653–659. <https://doi.org/10.3238/arztebl.2017.0653>
 17. Koban, L. A., & Pfluger, A. R. (2023). Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) exposure through munitions in the Russia-Ukraine conflict. *Integrated Environmental Assessment and Management, 19(2)*, 376–381. <https://doi.org/10.1002/ieam.4672>
 18. Krainiuk, O. V., Buts, Y. V., Didenko, N. V., & Barbashyn, V. V. (2023). *Ecological Consequences of Environmental Pollution with Heavy Metals as a Result of the War in Ukraine. 2023(1)*, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520013>
 19. Li, C.-H., Ren, X.-M., & Guo, L.-H. (2019). Adipogenic Activity of Oligomeric Hexafluoropropylene Oxide (Perfluorooctanoic Acid Alternative) through Peroxisome Proliferator-Activated Receptor γ Pathway. *Environmental Science & Technology, 53(6)*, 3287–3295. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06978>
 20. Martin, J. W., Smithwick, M. M., Braune, B. M., Hoekstra, P. F., Muir, D. C. G., & Mabury, S. A. (2004). Identification of long-chain perfluorinated acids in biota from the Canadian Arctic. *Environmental Science & Technology, 38(2)*, 373–380. <https://doi.org/10.1021/es034727+>
 21. Morris, G. M., Huey, R., Lindstrom, W., Sanner, M. F., Belew, R. K., Goodsell, D. S., & Olson, A. J. (2009). AutoDock4 and AutoDockTools4: Automated docking with selective receptor flexibility. *Journal of computational chemistry, 30(16)*, 2785–2791. <https://doi.org/10.1002/jcc.21256>
 22. Nday, C. M., Drever, B. D., Salifoglou, T., & Platt, B. (2010). Aluminium interferes with hippocampal calcium signaling in a species-specific manner. *Journal of Inorganic Biochemistry, 104(9)*, 919–927. <https://doi.org/10.1016/j.jinorgbio.2010.04.010>
 23. Oladimeji, P. O., & Chen, T. (2018). PXR: More Than Just a Master Xenobiotic Receptor. *Molecular Pharmacology, 93(2)*, 119–127. <https://doi.org/10.1124/mol.117.110155>

24. United States. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2019). PFAS : an overview of the science and guidance for clinicians on per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS).
25. Reh, B., Wang, X., Feng, Y., & Bhandari, R. K. (2022). Potassium perchlorate effects on primordial germ cells of developing medaka larvae. *Aquatic Toxicology*, 251, 106283. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2022.106283>
26. Torrens-Fontanals, M., Tourlas, P., Doerr, S., & De Fabritiis, G. (2024). PlayMolecule Viewer: A Toolkit for the Visualization of Molecules and Other Data. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 64(3), 584–589. <https://doi.org/10.1021/acs.jcim.3c01776>
27. Tavasoli, E., Luek, J. L., Malley, J. P., & Mouser, P. J. (2021). Distribution and fate of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in wastewater treatment facilities. *Environmental Science. Processes & Impacts*, 23(6), 903–913. <https://doi.org/10.1039/d1em00032b>
28. Friesner, R. A., Murphy, R. B., Repasky, M. P., Frye, L. L., Greenwood, J. R., Halgren, T. A., Sanschagrin, P. C., & Mainz, D. T. (2006). Extra precision glide: Docking and scoring incorporating a model of hydrophobic enclosure for protein-ligand complexes. *Journal of Medicinal Chemistry*, 49(21), 6177–6196. <https://doi.org/10.1021/jm051256o>
29. Yang, Y., Yao, K., Repasky, M. P., Leswing, K., Abel, R., Shoichet, B. K., & Jerome, S. V. (2021). Efficient exploration of chemical space with docking and deep learning. *Journal of Chemical Theory and Computation*, 17(11), 7106–7119. <https://doi.org/10.1021/acs.jctc.1c00810>
30. Zahm, S., Bonde, J. P., Chiu, W. A., Hoppin, J., Kanno, J., Abdallah, M., Blystone, C. R., Calkins, M. M., Dong, G. H., Dorman, D. C., Fry, R., Guo, H., Haug, L. S., Hofmann, J. N., Iwasaki, M., Machala, M., Mancini, F. R., Maria-Engler, S. S., Möller, P., Ng, J. C., ... & Schubauer-Berigan, M. K. (2024). Carcinogenicity of perfluorooctanoic acid and perfluorooctanesulfonic acid. *The Lancet. Oncology*, 25(1), 16–17. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(23\)00622-8](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(23)00622-8)
31. Makarenko, O. A., Zaderey, O. V., & Zubachyk, M. V. (2022). «Experimental substantiation of jaw bone tissue dysmetabolism prevention in rats with hypothyroidism» [Eksperymentalne obgruntuvannya profilaktyky porushen metabolizmu kistkovoï tkanyny shchelep shchuriv pry hipotyreozi.]. *Problems of Endocrine Pathology*, 3 (79) 65-71. <https://doi.org/10.21856/j-PEP.2022.3.09> [in Ukrainian].

УДК: 615.2:616.002: 616-092

[https://doi.org/10.18524/2077-1746.2024.2\(55\).320489](https://doi.org/10.18524/2077-1746.2024.2(55).320489)

Ю. О. Молодан¹, аспірант; <https://orcid.org/0000-0002-2594-8274>

В. Б. Ларіонов², д.б.н., завідувач лабораторії;

<https://orcid.org/0000-0003-2678-4264>

¹ Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, кафедра фізіології, здоров'я і безпеки людини та природничої освіти, вул. Всеволода Змієнка, 2, м. Одеса, 65082, Україна

² Фізико-хімічний інститут ім. О. В. Богатського НАН України, лабораторія молекулярної фармакології та медицини, вул. Люстдорфська дорога, 86, м. Одеса, 65080, Україна, e-mail: yuliabonbonka@gmail.com

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ПРОТИЗАПАЛЬНОЇ АКТИВНОСТІ КВЕРЦЕТИНУ ТА ДИКЛОФЕНАКУ НАТРІЮ НА МОДЕЛІ КАРАГІНАНОВОГО ЗАПАЛЕННЯ У ЩУРІВ

Нестероїдні протизапальні засоби загалом вважаються основним засобом лікування запальних реакцій, проте їх тривале застосування може викликати побічні ефекти. З урахуванням ролі активних форм кисню у запаленні, застосування біофлавоноїдів, що виявляють антиоксидантні властивості, може бути ефективним у деяких формах запалення. Тому у роботі досліджували порівняльну протизапальну дію кверцетину та диклофенаку натрію на моделі запалення, яке викликали у щурів шляхом введення у лапу 0,1 мл 1% карагінану. Протизапальну ефективність препаратів визначали за розмірами набряку протягом доби, маркерами запалення у сироватці крові та ділянці пошкодженої кінцівки тварин: активністю еластази, кислій фосфатази та вмісту малонового діальдегіду. Встановлено, що диклофенак виявляє більшу протиексадативну і протизапальну дію, а кверцетин – значнішу антиоксидантну активність в умовах карагінанового запалення. Результати дослідження підтверджують можливість користі застосування біофлавоноїдів, зокрема кверцетину, в лікуванні запальних станів.

Ключові слова: щури, запалення, карагінан, диклофенак натрію, кверцетин, протизапальна дія.

Запалення є найпоширенішим аспектом тканинної патології і бере участь у патогенезі багатьох захворювань, включаючи рак, діабет, серцево-судинні, нейродегенеративні та інші небезпечні для життя і виснажливі хвороби [3, 8]. Запальні стани є захисним механізмом вищих організмів, необхідним для локалізації й усунення уражень і видалення пошкоджених тканинних компонентів, сприяння одужання організму. Запальні процеси фактично не можна прирівнювати лише до інфекційних процесів. Як правило, причиною інфекції є бактеріальне, вірусне або грибокве зараження, а запальні процеси включають реакцію організму, направлену на самовідновлення або самозцілення. Запалення може бути пов'язане з широким діапазоном патологій, таких як

алергічна реакція, онкологічні процеси, хвороба Альцгеймера та безліч інших патологічних станів.

Нестероїдні протизапальні засоби (НПЗЗ) займають провідне місце серед широкого спектру лікарських засобів, що частіше призначаються для лікування запальних ефектів. НПЗЗ представляють собою групу різних за хімічною структурою лікарських засобів, що мають протизапальну, анальгетичну, жарознижувальну та антиагрегатну дію. Їхній механізм дії пов'язаний з пригніченням активності ключового ферменту метаболізму арахідонової кислоти – циклооксигенази (ЦОГ), що призводить до зниження синтезу основних медіаторів запалення – простагландинів. Серед найбільш вивчених та відомих НПЗЗ є диклофенак натрію, який є загально визнаним стандартом протизапальної терапії. З літературних джерел відомо, що застосування диклофенаку натрію в дозі 150 мг на добу, здатне блокувати вироблення простагландинів майже на 94 % [1, 7]. Майже як усі НПЗЗ, диклофенак натрію має ряд побічних ефектів, серед яких, на першому місці є біль в шлунку, виникнення виразок у шлунку або кишечнику, блювота, діарея, алергічні реакції, свербіж тощо [1, 10].

З огляду на це, сьогодні є перспективною розробка засобів протизапальної дії на основі природних речовин – флаваноїдів. Активні форми кисню (АФО), такі як супероксид-іон (O_2^-), перекис водню (H_2O_2) та гідроксильний радикал (ОН), є природними побічними продуктами метаболізму. Однак, надмірне їх накопичення може викликати окиснювальний стрес, що активує антиоксидантні механізми захисту, зокрема супероксиддисмутазу та каталазу, які нейтралізують шкідливий вплив АФО. Припускають, що утворення АФО у місці запалення є одним з основних чинників пошкодження клітин і тканин, властивих багатьом запальним процесам.

Перекисне окиснення ліпідів здатне спричинити пошкодження через порушення цілісності мембран і ковалентне сполучення реактивних проміжних продуктів з важливішими біологічними молекулами, такими, як глутатіон. Крім того, вільні радикали, які утворюються в результаті такого зв'язування, можуть спричинити запальні процеси з вивільненням прозапальних цитокінів, здатних призвести до клітинної загибелі [13]. Крім того, утворення вільних радикалів, що виникають внаслідок цього процесу, може спричинити додаткове запалення через вивільнення протизапальних цитокінів. Це підвищує рівень окисного стресу в тканинах і може призводити до клінічних проявів хронічних запальних захворювань.

До найвідоміших протизапальних компонентів природнього походження відноситься біофлаваноїд кверцетин. Кверцетин ($C_{15}H_{10}O_7$) – це флавоноїдний антиоксидант, що походить від вторинних поліфенольних метаболітів. Він має значний терапевтичний потенціал у профілактиці й лікуванні різноманітних хронічних захворювань, таких як патології печінки, рак, серцево-судинні та нейродегенеративні хвороби [6, 12].

Відомі протизапальні властивості кверцетину поєднуються з потужною антиоксидантною активністю та відсутністю негативних побічних ефектів навіть

за тривалого його використання. Тому актуальним є порівняльне дослідження протизапальної активності кверцетину з відомим протизапальним лікарським засобом диклофенаком натрію на моделі карагінанового набряку стопи у щурів.

У ході проведення експерименту використовували карагінан-індуковану модель гострого запалення. Карагінан – полісахарид, що є класичним флогогеном, який викликає запальну реакцію завдяки активації ЦОГ, збільшуючи утворення більшості медіаторів запалення, зокрема простагландинів.

Мета роботи: порівняльна оцінка протизапального та протинабрякового ефектів кверцетину та диклофенаку натрію на моделі карагінанового запалення у щурів.

Матеріали та методи досліджень

Порівняльне вивчення протизапальних властивостей досліджуваних препаратів проводили на лабораторних нелінійних статевозрілих самцях щурів (вік 7,0 місяців, вагою 180-220 г). Експериментальна частина роботи виконана на базі Фізико-хімічного інституту ім. О. В. Богатського, у відділі біомедицини під керівництвом М.Я. Головенко. Для досліду було закуплені лабораторні тварини у віварії Одеського національного медичного університету, які були на стандартному раціоні при вільному доступі до їжі та води. Дослідження проведено з дотриманням Директиви Європейського Союзу 2010/10/63 EU щодо експериментів на тваринах [6].

Тварин розділили на три групи таким чином:

1 група – щури з набряком лапи – контрольні, тварини, яким моделювали запалення відповідно до методики – вводили еквівалентну кількість фізіологічного розчину;

2 група – щури з набряком лапи, що отримали внутрішньоочеревинно суспензію кверцетину в дозі 80 мг/кг (одноразово за 1 год. до моделювання карагінанового запалення);

3 група – щури з набряком лапи, що отримали суспензію-референс препарату диклофенаку натрію внутрішньоочеревинно 8 мг/кг (одноразово за 1 годину до моделювання карагінанового запалення).

Для моделювання гострої запальної реакції вводили 0,1 мл 1% розчину карагінану субплантарно (плантарний апоневроз) [3, 14]. Вимірювання розміру набряку за використанням інженерного штангенциркуля проводили через 2, 4, 6 і 24 години після введення карагінану.

Через 24 год. після введення карагінану тварин виводили з експерименту під тіопенталовим наркозом (40 мг /кг), декапітували і отримували сироватку крові, у якій визначали маркери запалення (активність кислої фосфатази, еластази, вміст малонового діальдегіду (МДА) [2]. Виділяли ділянку запалення з набряку на лапі щурів, гомогенізували (50 мг/мл 0,05 М буфера трис-НСІ, рН 7,5) і визначали активність еластази, кислої фосфатази, вміст МДА [2]. Для проведення біохімічного аналізу сироватки крові та м'язової тканини

додатково використовували 7 здорових щурів того ж віку та статі, які склали інтактну групу.

Ведення банку даних та їх опрацювання здійснювали за допомогою програми «Microsoft Excel 2019». Статистичне опрацювання даних проводили шляхом обчислення середнього арифметичного (M) для опису центральної закономірності, стандартної похибки середнього (m) для оцінки варіативності ознаки. Для визначення статистичної значущості відмінностей застосовували t -тесту Стьюдента, вважаючи результати значущими при значеннях $p < 0,05$.

Результати та їх обговорення

Динаміку змін запального процесу оцінювали на підставі морфометричних показників висоти та ширини набряку уражених кінцівок щурів, результати виміру яких наведені у таблиці 1.

Після введення карагінану у тварин контрольної групи спостерігали виразний набряк лапи, що поступово зростав. Так, товщина (висота) кінцівки тварин контрольної групи через 2 год. після моделювання запалення збільшилась на 62,5 %, через 4 год. – на 70,8 %. Через 6 год. після ін'єкції карагінану товщина лапи почала дещо знижуватися і була лише на 63,9 %, а через 24 год. – на 52,8 % більш ніж до моделювання запалення. Такі ж зміни спостерігали зі зміною ширини запального набряку, а саме, збільшення на 13,2-, 28,6-, 26,4- і 28,6 % через 2, 4, 6 і 24 години після моделювання патології, відповідно (табл. 1). Тобто, максимальний набряк лапи щурів контрольної групи зареєстровано на 4 год. моделювання гострого запалення. У зоні набряку фіксували виразний ціаноз, а тварини під час переміщення у стерильні бокси внаслідок болю уникали наступання на травмовану задню кінцівку, спостерігались часті облизування кінцівки, і своєрідні підтягування лапи під час пересування.

Відомо, що ін'єкція карагінану в лапу тварин спричиняє двофазну відповідь. Першу фазу спостерігають протягом першої години, вона опосередковується вивільненням гістаміну та серотоніну, за якою слідує друга фаза – прискорення набряку, спричинена вивільненням простагландину, лейкотрієнів, брадикініну та лізоциму [4]. Крім того, друга фаза набряку чутлива як до стероїдних, так і до нестероїдних протизапальних засобів. При субплантарному введенні у підшовну лапу тварин карагінан збільшує проникність судин і проковує розвиток вираженої типової реакції з переважанням ексудативної фази запалення [4, 5].

У тварин 2-ої групи, яким до моделювання запалення вводили суспензію кверцетину, так само як і в контрольній групі спостерігали максимальне наростання розвитку набряку на 4 год. експозиції. Товщина кінцівки значно збільшилась через 2 год. після введення карагінану, але була на 17,9 % меншою, ніж у контролі ($p_1 < 0,05$). На наступних термінах спостереження товщина кінцівки у тварин, які отримали кверцетин, також була статистично меншою за відповідним показником набряку лапи у контрольних щурів ($p_1 < 0,05$). Ширина набряку лап 2-ої групи тварин збільшилась після ін'єкції карагінану ($p < 0,05$). Але цей

показник статистично не відрізнявся від відповідних значень у контрольних щурів, за винятком останнього терміну через 24 год. – ширина набряку лапи 2-ої групи була на 8,2 % ($p_1 < 0,05$) меншою, ніж у контролі зі запаленням. У однієї тварини 2-ої групи спостерігали відсутність ознак запалення на 24 год.

Таблиця 1

Динаміка розвитку набряку уражених кінцівок щурів з карагінановим запаленням та профілактичним введенням кверцетину і диклофенаку

Групи	строки дослідження, години					
		перед	2	4	6	24
Модель запалення (контроль)	висота	0,72 ± 0,01	1,17±0,05 $p < 0,001$	1,23±0,05 $p < 0,001$	1,18±0,04 $p < 0,001$	1,10±0,05 $p < 0,001$
	ширина	0,91 ± 0,02	1,03±0,04 $p < 0,001$	1,17±0,03 $p < 0,001$	1,15±0,05 $p < 0,001$	1,17±0,04 $p < 0,001$
Кверцетин + модель запалення	висота	0,75 ± 0,02 $p_1 > 0,05$	0,96±0,03 $p < 0,001$ $p_1 < 0,05$	1,10±0,05 $p < 0,001$ $p_1 < 0,05$	0,98±0,04 $p < 0,001$ $p_1 < 0,05$	0,86±0,04 $p < 0,001$ $p_1 < 0,05$
	ширина	1,03 ± 0,08 $p_1 > 0,05$	1,01±0,04 $p < 0,05$ $p_1 > 0,05$	1,12±0,08 $p < 0,05$ $p_1 > 0,05$	1,05±0,04 $p < 0,05$ $p_1 > 0,05$	1,01±0,04 $p > 0,05$ $p_1 < 0,05$
Диклофенак + модель запалення	висота	0,69 ± 0,03 $p_1 > 0,05$	0,71±0,03 $p > 0,05$ $p_1 < 0,05$ $p_2 < 0,05$	0,96±0,04 $p < 0,05$ $p_1 < 0,05$ $p_2 < 0,05$	0,94±0,04 $p < 0,05$ $p_1 < 0,05$ $p_2 > 0,05$	0,73±0,04 $p > 0,05$ $p_1 < 0,05$ $p_2 < 0,05$
	ширина	0,94 ± 0,04 $p_1 > 0,05$	0,97±0,04 $p > 0,05$ $p_1 < 0,05$ $p_2 > 0,05$	1,03±0,06 $p > 0,05$ $p_1 < 0,05$ $p_2 > 0,05$	1,03±0,06 $p > 0,05$ $p_1 < 0,05$ $p_2 > 0,05$	1,03±0,06 $p > 0,05$ $p_1 > 0,05$ $p_2 > 0,05$

Примітка: p – вірогідність відхилень показника від значень перед введенням карагану;

p_1 – вірогідність відхилень показника від значень у контролі;

p_2 – вірогідність відхилень між значеннями показників у групах «кверцетин» і «диклофенак».

У 3-ій групі тварин, що отримали диклофенак натрію, визначали збільшення товщини кінцівки на 39,1 % порівняно з вихідним значенням тільки на 4 год. після введення карагану. Цей стан зберігався і на 6 год. При цьому, ширина лапи тварин 3-ої групи відповідала вихідному стану ($p > 0,05$) протягом спостереження. Через 24 год. після моделювання запалення спостерігали відсутність ознак набряку як за товщиною, так і за шириною кінцівки щурів 3-ої групи, які отримували диклофенак ($p > 0,05$, табл. 1) У всіх тварин спостерігали відсутність ознак запалення на 24 год.

При порівнянні протизапальної ефективності досліджуваних препаратів треба відмітити більш виражену протиексудативну дію диклофенаку за показником товщини лапи, яка була статистично меншою через 2, 4 і 24 год. після введення карагану, ніж висота набряку у щурів, які отримали кверцетин ($p_2 < 0,05$, табл. 1).

На наступному етапі дослідження визначали загальну запальну реакцію у щурів за показниками активності кислої фосфатази (КФ), еластази та вмісту малонового діальдегіду (МДА) у сироватці крові. Результати аналізу наведені у таблиці 2.

Моделювання карагінанового запалення спричинило підвищення активності еластази на 54,2 % у сироватці крові щурів ($p < 0,05$). Еластаза має нейтрофільне походження [3], тому збільшення її активності у сироватці крові вважається ознакою запалення, що індуковано введенням карагінану. Попереднє введення кверцетину щурам сприяло зниженню активності сироваткової еластази на 21,8 % ($p_1 < 0,05$), а диклофенаку – на 27,2 % ($p_1 < 0,05$). Незважаючи на те, що статистично значущої різниці між активністю еластази у сироватці крові щурів, яким ввели кверцетин або диклофенак, не встановлено ($p_2 > 0,5$), цей показник запалення відповідав нормальним значенням після використання диклофенаку ($p > 0,05$), а після кверцетину – перевищував рівень у інтактній групі ($p < 0,05$, табл. 2).

Таблиця 2

Деякі показники запалення сироватці крові щурів з карагінановим запаленням та профілактичним введенням кверцетину і диклофенаку

Групи щурів	Активність еластази, мккат/л	Активність КФ, мккат/л	Вміст МДА, ммоль/л
Інтактна	3,10 ± 0,22	1,95 ± 0,23	0,67 ± 0,05
Модель запалення (контроль)	4,78 ± 0,35 $p < 0,05$	3,51 ± 0,27 $p < 0,05$	1,21 ± 0,07 $p < 0,001$
Кверцетин + модель запалення	3,74 ± 0,21 $p < 0,05$ $p_1 < 0,05$	2,76 ± 0,23 $p < 0,05$ $p_1 < 0,05$	0,78 ± 0,05 $p > 0,05$ $p_1 < 0,05$
Диклофенак + модель запалення	3,48 ± 0,26 $p > 0,05$ $p_1 < 0,05$ $p_2 > 0,05$	2,54 ± 0,18 $p < 0,05$ $p_1 < 0,05$ $p_2 > 0,05$	0,97 ± 0,06 $p < 0,05$ $p_1 < 0,05$ $p_2 < 0,05$

Примітка: p – вірогідність відхилення показника від значень у інтактній групі;

p_1 – вірогідність відхилення показника від значень у контролі запалення;

p_2 – вірогідність відхилення між значеннями показників у групах «кверцетин» і «диклофенак».

Активність КФ у сироватці крові щурів з моделлю запалення також підвищилася на 80,0 % ($p < 0,05$). Оскільки КФ міститься в лізосомах і її активність підвищується внаслідок порушення цілісності мембран при запаленні, цей фермент також вважають маркером запалення. Відомо, що спалах запалення, як правило, супроводжується різким збільшенням активності цього лізосомального ферменту у тканинах і сироватці крові [3]. У сироватці крові тварин, яким вводили перед карагінаном досліджувані препарати, активність КФ була нижчі, ніж значення у контролі зі запаленням на 21,4-27,6 %. Протизапальна ефективність кверцетину і диклофенаку за активністю КФ була приблизно однаковою ($p_2 > 0,05$, табл. 2).

Моделювання запалення за допомогою карагінану викликало збільшення вмісту МДА у сироватці крові тварин. МДА є кінцевим продуктом переокисного окиснення ліпідів і, як правило, збільшується при різних видах запалення. У нашому досліді вміст МДА у сироватці крові тварин з запаленням підвищився на 80,6 % ($p < 0,001$). Попереднє введення диклофенаку сприяло зниженню рівня МДА у сироватці крові на 19,8 % ($p_1 < 0,05$), а після кверцетину суттєвіше – на 35,5 % ($p_1 < 0,05$), тобто антиоксидантна активність кверцетину за цим маркером була вищою ($p_2 < 0,05$; табл. 2).

Показники запалення визначали і у гомогенатах ділянки набряку лап досліджуваних щурів, результати чого наведено у табл. 3. Введення карагінану призвело до збільшення усіх показників у ділянці набряку на лапах тварин: активності еластази і КФ – у середньому на 76,2 % ($p < 0,001$), а вмісту МДА – на 80,2 % ($p < 0,001$).

Таблиця 3

Показники запалення у м'язовій тканині ділянці набряку кінцівок щурів з карагінановим запаленням та профілактичним введенням кверцетину і диклофенаку

Групи щурів	Активність еластази, мккат/кг	Активність КФ, мккат/кг	Вміст МДА, ммоль/кг
Інтактна	45,2 ± 1,9	65,8 ± 4,2	23,2 ± 2,1
Модель запалення (контроль)	79,7 ± 3,8 $p < 0,001$	115,9 ± 4,7 $p < 0,001$	41,8 ± 3,0 $p < 0,001$
Кверцетин + модель запалення	58,6 ± 2,1 $p < 0,05$ $p_1 < 0,05$	91,4 ± 3,0 $p < 0,05$ $p_1 < 0,05$	27,6 ± 2,3 $p > 0,05$ $p_1 < 0,05$
Диклофенак + модель запалення	50,3 ± 3,2 $p > 0,05$ $p_1 < 0,05$ $p_2 < 0,05$	80,4 ± 2,5 $p < 0,05$ $p_1 < 0,05$ $p_2 < 0,05$	35,2 ± 2,6 $p < 0,05$ $p_1 < 0,05$ $p_2 < 0,05$

Примітка: p – вірогідність відхилення показника від значень у інтактній групі;

p_1 – вірогідність відхилення показника від значень у контролі запалення;

p_2 – вірогідність відхилення між значеннями показників у групах «кверцетин» і «диклофенак».

Попереднє введення кверцетину гальмувало підвищення активності еластази і КФ лише на 26,5 і 21,1 %, відповідно. Використання диклофенаку сприяло більш значному зменшенню активності цих ферментів: активності еластази на 63,1% ($p_1 < 0,05$), а кислій фосфатази – на 30,6 % ($p_1 < 0,05$; $p_2 < 0,05$). Вміст МДА у ділянці набряку кінцівок щурів суттєвіше знизився після введення кверцетину на 34,0 % ($p_1 < 0,05$) порівняно з диклофенаком – 15,8 % ($p_1 < 0,05$; $p_2 < 0,05$; табл. 3).

В ході дослідження було виявлено, що кверцетин демонструє суттєвий вплив на зниження окисного стресу в клітинах, що підтверджується зменшенням рівня малонового діальдегіду та підвищенням активності антиоксидантних ферментів. Диклофенак, у свою чергу, ефективно інгібує синтез проста-

гландинів, знижуючи запальні процеси. Проте між ними існують відмінності в механізмах дії: кверцетин проявляє значну антиоксидантну активність, що пов'язано з його впливом на регуляцію ферментативних систем. В той же час, диклофенак, реалізує свою протизапальну дію через пригнічення циклооксигенази, що визначає його ефективність у зменшенні запалення.

Крім того, ми спостерігали активацію антиоксидантних ферментів, що свідчить про ефективну клітинну адаптацію до підвищеного рівня АФО. Це є важливим механізмом захисту клітин від негативного впливу окиснювального стресу. Виявлене зростання активності супероксиддисмутази (СОД) та каталази підтверджує, що клітини намагаються нейтралізувати надмірне навантаження АФО. При цьому, АФО – може бути не лише наслідком клітинного стресу, а й важливими чинниками, що регулюють подальші клітинні реакції, включаючи запалення.

Таким чином, порівняльне дослідження дії протизапальних препаратів диклофенаку і кверцетину на моделі карагінанового запалення взагалі дало змогу встановити більш високу ефективність диклофенаку за метричними показниками розвитку набряку, тобто протиекзудативної активності, а також за біохімічними визначенням активності еластази і кислій фосфатази у сироватці крові та ділянці набряку лап тварин. Але антиоксидантна активність кверцетину у сироватці крові і тканині пошкодженої кінцівки тварин за вмістом малонового діальдегіду була більша, ніж диклофенаку. Отримані результати свідчать про перспективність дослідження протизапальної активності біофлаваноїду кверцетину. Крім того, враховуючи низку побічних ефектів, відомих для диклофенаку, і відсутність таких для кверцетину, вважаємо, що кверцетин може зайняти достойне місце серед протизапальних засобів.

Висновки

1. Моделювання запалення призвело до розвитку набряку у ділянці ін'єкції та підвищення маркерів запалення, зокрема активності еластази, кислій фосфатази та вмісту малонового діальдегіду.

2. Диклофенак продемонстрував високу ефективність у гальмуванні запального процесу, зокрема знижуючи набряк, активність еластази і кислій фосфатази, а також рівень малонового діальдегіду в крові та тканинах.

3. Кверцетин знижував маркери запалення, але виявився менш ефективним порівняно з диклофенаком щодо контролю набряку та активності ферментів, хоча його антиоксидантна дія була виражена сильніше, зокрема у зниженні рівня малонового діальдегіду.

4. Порівняння протизапальної активності показало, що диклофенак має кращі результати у зниженні набряку та запалення, тоді як кверцетин продемонстрував більш виражену антиоксидантну активність.

Стаття надійшла до редакції 4 жовтня 2024 р.

Список використаної літератури

1. Гладких Ф. В. Нестероїдні протизапальні засоби: терапевтичні та небажані ефекти, шляхи їх оптимізації. Вінниця: Твори, 2022. 216 с. <https://doi.org/10.46879/2022.1>
2. Макаренко О. А., Хромагіна Л. М., Ходаков І. В. та ін. Методи дослідження стану кишечника та кісток у лабораторних щурів: довідник. Одеса: Видавець С. Л. Назарчук, 2022. 81 с.
3. Експериментальне дослідження протизапальних властивостей екстракту «Веностен» / О. С. Кухтенко, А. Л. Загайко, Л. В. Галузінська, П. І. Бушин. *Український біофармацевтичний журнал*. 2018. № 2. С. 17-20. <https://doi.org/10.24959/ubphj.18.174>.
4. Халімова О.І. Анальгетичні властивості похідних 3-замішених 1,2-дигідро-3н-1,4-бенздіазепін-2-онів: дис ... канд. біол. наук: 14.03.05 «Фармакологія», Одеса, 2016. 158 с.
5. Іванова І.І., Богатський О.В., Кузьмін В.С. Дослідження фізико-хімічних властивостей гідрогелів на основі карагінану та їх вплив на процеси загоєння ран. *Фізико-хімічний журнал*. 2018. № 92(3). С. 45-52. <https://doi.org/10.1007/s00323-018-0145-6>.
6. Хендель Н. В. Регламентация проведения экспериментов над тваринами : міжнародні та національні правові стандарти. *Український часопис міжнародного права*. 2013. С. 71-76.
7. Role of Antioxidants and Natural Products in Inflammation / Arulselvan P., Fard M. T., Tan W. S. et al. *Oxidative medicine and cellular longevity*. 2016, Vol. 13 (2016). P. 527-613. <https://doi.org/10.1155/2016/5276130>.
8. Bindu S., Mazumder S., Bandyopadhyay U. Non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs) and organ damage: A current perspective. *Biochemical pharmacology*. 2020, Vol. 180. P. 114-147. <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2020.114147>.
9. Inflammatory responses and inflammation-associated diseases in organs / Chen L., Deng H., Cui H. et al. *Oncotarget*. 2017, 9(6). P. 7204-7218. <https://doi.org/10.18632/oncotarget.23208>.
10. Anti-inflammatory effects of propoxazepam on different model of inflammation / Golovenko N. Ya., Kabanova T. A., Andronati S. A. et al. *International Journal of Medicine and Medical Research*. 2019, Vol. 5 (2). P. 105-112 <https://doi.org/10.11603/ijmmr.2413-6077.2019.2.10900>.
11. Harirforoosh S., Asghar W., Jamali F. Adverse effects of nonsteroidal antiinflammatory drugs: an update of gastrointestinal, cardiovascular and renal complications. *J Pharm Pharm Sci*. 2013. Vol. 16(5). P. 821-847. <https://doi.org/10.18433/J3VW2F>.
12. Comprehensive Review of Non-Steroidal Anti-Inflammatory Drug Use in The Elderly / Wongrakpanich S, Wongrakpanich A, Melhado K, Rangaswami J. A. *Aging and disease*. 2018, Vol. 9(1). P. 143-150. <https://doi.org/10.14336/AD.2017.0306>.
13. Comprehensive and critical view on the anti-inflammatory and immunomodulatory role of natural phenolic antioxidants / Pisoschi A. M., Iordache F., Stanca L. et al. *European Journal of Medicinal Chemistry*. 2023, Vol. 265. P. 18-23. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2023.116075>.
14. The Structural Integrity of the Model Lipid Membrane during Induced Lipid Peroxidation: The Role of Flavonols in the Inhibition of Lipid Peroxidation / Sadzak A., Mravljak J., Maltar-Strmečki N. et al. *Antioxidants (Basel)*. 2020, Vol. 9(5). P. 430. <https://doi.org/10.3390/antiox9050430>.
15. Stewart A. G., Beart P. M. Inflammation: maladies, models, mechanisms and molecules. *British Journal Pharmacology*. 2016. Vol. 173(4). P. 631-634. <https://doi.org/10.1111/bph.13389>.

Ю. О. Молодан¹, В. Б. Ларіонов²

¹ Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, кафедра фізіології, здоров'я і безпеки людини та природничої освіти, вул. Всеволода Змієнка, 2, м. Одеса, 65082, Україна

² Фізико-хімічний інститут ім. О. В. Богатського НАН України, лабораторія молекулярної фармакології та медицини, вул. Люстдорфська дорога, 86, м. Одеса, 65080, Україна, e-mail: yuliabonbonka@gmail.com

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ПРОТИЗАПАЛЬНОЇ АКТИВНОСТІ КВЕРЦЕТИНУ ТА ДИКЛОФЕНАКУ НАТРІЮ НА МОДЕЛІ КАРАГІНАНОВОГО ЗАПАЛЕННЯ У ЩУРІВ

Резюме

Актуальність. Нестероїдні протизапальні засоби, такі як диклофенак, традиційно використовуються у лікуванні запальних реакцій, але його тривале застосування може викликати побічні ефекти, включаючи шлунково-кишкові розлади, що обмежує їх застосування. Це спонукає до пошуку альтернатив на основі природних компонентів, таких як кверцетин. З огляду на роль активних форм оксигену у запаленні, використання кверцетину, який відомий своїми антиоксидантними властивостями, може бути ефективним за певних форм запалення та перспективним завдяки меншій кількості побічних ефектів.

Мета. Порівняльна характеристика протизапальної дії кверцетину та диклофенаку натрію на моделі карагінанового запалення у щурів.

Методи. В експерименті використано щурів, яким у задню лапу вводили 0,1 мл 1% карагінану субплантарно для моделювання запалення. Одноразово за 1 годину до відтворення запалення щурам вводили внутрішньоочеревинно диклофенак натрію або кверцетин. Оцінювали протизапальну ефективність препаратів за розмірами набряку, активністю еластази, кислій фосфатази та вмісту малонового діальдегіду у сироватці крові та ділянці запалення.

Основні результати. Дослідження показало, що введення карагінану щурам викликало розвиток запалення за збільшенням товщини лапи на 62,5% через 2 години і на 70,8% через 4 години. Максимальний набряк спостерігався на 4 годину, після чого він почав зменшуватися. Введення кверцетину знизило набряк на 17,9% через 2 години порівняно з контрольною групою ($p_1 < 0,05$). Диклофенак натрію виявився більш ефективним у зменшенні товщини набряку, порівняно з кверцетином, протягом всього періоду спостереження ($p < 0,05$). Активність еластази, маркера запалення, зросла на 54,2% у крові тварин із запаленням, проте попереднє введення кверцетину та диклофенаку натрію знизило цей показник на 21,8% та 27,2% відповідно. У сироватці крові та пошкоджених тканинах карагінан призвів до підвищення активності кислій фосфатази на 80,0% і 76,2%, відповідно. Використання кверцетину та диклофенаку запобігло активації кислій фосфатази, яка знижувалась на 21,4-30,6%. Більш виражене зменшення активності кислій фосфатази зареєстровано після використання диклофенаку натрію. Збільшення вмісту малонового діальдегіду, показника окисного стресу, було більш значним у контрольній групі (80,6%). Введення кверцетину гальмувало зріст цього маркера на 35,5%, а диклофенаку – на 19,8%.

Висновки. Порівняльне дослідження протизапальної ефективності препаратів встановило вищу протиекседативну та протизапальну ефективність диклофенаку натрію за показниками розмірів набряку та активністю еластази і кислоти фосфатази. Водночас, кверцетин проявляв вищу антиоксидантну активність, зменшуючи рівень малонового діальдегіду у сироватці крові та ділянці пошкодженої кінцівки. Результати дослідження свідчать про перспективність використання біофлаваноїду кверцетину як протизапального засобу. Враховуючи низку побічних ефектів диклофенаку і відсутність таких у кверцетина, вважаємо, що кверцетин може зайняти достойне місце серед протизапальних засобів.

Ключові слова: щури, запалення, карагінан, диклофенак натрію, кверцетин, протизапальна дія.

Yu. O. Molodan¹, **V. B. Larionov**²

¹Odesa I. I. Mechnikov National University, Department of Physiology, Human Health and Safety and Natural Science Education, 2 Vsevoloda Zmiiienka St, Odesa, 65082, Ukraine

²A. V. Bogatsky Physico-Chemical Institute of NAS of Ukraine, Laboratory of Molecular Pharmacology and Medicine, 86 Lustdorfska Rd, Odesa, 65080, Ukraine, e-mail: yuliabonbonka@gmail.com

COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE ANTI-INFLAMMATORY ACTIVITY OF QUERCETIN AND DICLOFENAC SODIUM IN THE CARRAGEENAN INFLAMMATION MODEL IN RATS

Summary

Introduction. Non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs), such as diclofenac, are traditionally used in the treatment of inflammatory reactions, but its long-term use can cause side effects, including gastrointestinal disorders, which limits their use. This prompts the search for alternatives based on natural components, such as quercetin. Given the role of reactive oxygen species in inflammation, the use of quercetin, which is known for its antioxidant properties, may be effective in certain forms of inflammation and promising due to fewer side effects.

Aims. To compare the anti-inflammatory effect of quercetin and diclofenac sodium in a rat model of carrageenan inflammation.

Methods. Rats were used in the experiment, in which 0.1 ml of 1% carrageenan was injected into the hind paw subplantarily to model inflammation. The rats were injected intraperitoneally with diclofenac sodium or quercetin once 1 hour before the inflammation was reproduced. The anti-inflammatory efficacy of the drugs was evaluated by the size of edema, elastase, acid phosphatase activity and malondialdehyde content in the blood serum and inflamed area.

The main results. The study showed that the administration of carrageenan to rats caused the development of inflammation by increasing the paw thickness by 62.5% after 2 hours and by 70.8% after 4 hours. The maximum edema was observed at 4 hours, after which it began to decrease. Quercetin administration reduced edema by

17.9% after 2 hours compared to the control group ($p < 0.05$). Diclofenac sodium was more effective in reducing the thickness of edema compared to quercetin during the entire observation period ($p < 0.05$). The activity of elastase, a marker of inflammation, increased by 54.2% in the blood of animals with inflammation, but pretreatment with quercetin and diclofenac sodium reduced this index by 21.8% and 27.2%, respectively. In blood serum and damaged tissues, carrageenan led to an increase in acid phosphatase activity by 80.0% and 76.2%, respectively. The use of quercetin and diclofenac prevented the activation of acid phosphatase, which decreased by 21.4-30.6%. A more pronounced decrease in the activity of acid phosphatase was recorded after the use of diclofenac sodium. The increase in the content of malondialdehyde, an indicator of oxidative stress, was more significant in the control group (80.6%). The administration of quercetin inhibited the growth of this marker by 35.5%, and diclofenac – by 19.8%.

Conclusions. A comparative study of the anti-inflammatory efficacy of the drugs revealed a higher anti-exudative and anti-inflammatory efficacy of diclofenac sodium in terms of edema size and the activity of elastase and acid phosphatase. At the same time, quercetin exhibited higher antioxidant activity, reducing the level of malondialdehyde in the blood serum and in the area of the injured limb. The results of the study indicate the prospects of using the bioflavonoid quercetin as an anti-inflammatory agent. Given the number of side effects of diclofenac and the absence of such in quercetin, we believe that quercetin can take a worthy place among anti-inflammatory agents.

Keywords: rats, inflammation, carrageenan, diclofenac sodium, quercetin, anti-inflammatory effect.

References

- Hladkykh, F. V. (2022). *Non-steroidal anti-inflammatory drugs: therapeutic and adverse effects, ways to optimize them*. TVORY. 216 p. Vinnytsia [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.46879/2022>.
- Makarenko, O. A., Khromagina, L. M., & Khodakov, I. V. (2022). *Dovidnik. Metody doslidzhennya stanu kyshechnyku ta kistok u laboratornykh shchuriv*. [Directory. Methods of researching the state of intestines and bones in laboratory rats]. Odesa : vydavets' S.L. Nazarchuk, 81 p. [in Ukrainian].
- Kukhtenko, O.S., Zagayko, A.L., Galuzinska, L.V., & Bushin, P.I. (2018). Eksperymental'ne doslidzhennya protyzapal'nykh vlastyvostry ekstraktu «Venosten» [Experimental study of anti-inflammatory properties of «Venosten» extract] *Ukrayins'kyi biofarmatsevtichnyi zhurnal*. 2018 (2), p. 17-20. <https://doi.org/10.24959/ubphj.18.174>. [in Ukrainian].
- Khalimova, O. I. (2016). Anal'hetychni vlastyvostry pokhidnykh 3-zamishchenykh 1,2-dyhydro-3n-1,4-benzodiazepin-2-oniv [Analgesic properties of derivatives of 3-substituted 1,2-dihydro-3h-1,4-benzodiazepin-2-ones] (Dis ... kand. biol. nauk [Candidate's thesis in biological sciences], 158 p., Odesa. [in Ukrainian].
- Ivanova, I.I., Bohatskyi, O.V., & Kuzmin, V. Ye. (2018). Doslidzhennya fizyko-khimichnykh vlastyvostry gidroheliv na osnovi karahhinanu ta yikh vplyv na protsesy zahoyennya ran. *Fizyko-khimichnyi zhurnal*, 92(3), 45–52. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.1007/s00323-018-0145-6>.
- Hendel, N.V. (2013). Rehlamentatsiya provedennya eksperymentiv nad tvarynami : mizhnarodni ta natsional'ni pravovi standarty [Regulation of conducting experiments on animals: international and national legal standards]. *Ukrainian Journal of International Law*, p. 71-76. [in Ukrainian].
- Fard, M. T., Tan, W. S., & Gothai, S. (2016). Role of Antioxidants and Natural Products in Inflammation. *Oxidative medicine and cellular longevity*. 13, p. 527-613. <https://doi.org/10.1155/2016/5276130>.
- Bindu, S., Mazumder, S., & Bandyopadhyay, U. (2020). Non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs) and organ damage: A current perspective. *Biochemical pharmacology*. 180, p. 114-147. <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2020.114147>.
- Chen L., Deng H., & Cui H. (2017). Inflammatory responses and inflammation-associated diseases in organs. *Oncotarget*. 9(6), p. 7204-7218. <https://doi.org/10.18632/oncotarget.23208>.

10. Golovenko, N. Ya., Kabanova, T. A., & Andronati, S. A. (2019). Anti-inflammatory effects of propoxazepam on different model of inflammation. *International Journal of Medicine and Medical Research*. 5(2). з. 105-112 <https://doi.org/10.11603/ijmmr.2413-6077.2019.2.10900>.
11. Harirforoosh, S., Asghar, W., & Jamali, F. (2013). Adverse effects of nonsteroidal antiinflammatory drugs: an update of gastrointestinal, cardiovascular and renal complications. *J Pharm Pharm Sci*. 16(5). p. 821-847. <https://doi.org/10.18433/J3VW2F>.
12. Wongrakpanich, S., Wongrakpanich, A., Melhado, K., & Rangaswami, J. A. (2018). Comprehensive Review of Non-Steroidal Anti-Inflammatory Drug Use in The Elderly. *Aging and disease*. 9(1). p. 143-150. <https://doi.org/10.14336/AD.2017.0306>.
13. Pisoschi, A. M., Iordache, F., & Stanca, L. Comprehensive and critical view on the anti-inflammatory and immunomodulatory role of natural phenolic. *European Journal of Medicinal Chemistry*. 2023, 265. p. 18-23. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2023.116075>.
14. Sadzak, A., Mravljak, J., & Maltar-Strmečki, N. (2020). The Structural Integrity of the Model Lipid Membrane during Induced Lipid Peroxidation: The Role of Flavonols in the Inhibition of Lipid Peroxidation / *Antioxidants (Basel)*. 9(5). P. 430. <https://doi.org/10.3390/antiox9050430>.
15. Stewart, A. G., & Beart, P. M. (2016). Inflammation: maladies, models, mechanisms and molecules. *British Journal Pharmacology*. 173(4), 631-634. <https://doi.org/10.1111/bph.13389>.

УДК 577:378.4(477.74)

[https://doi.org/10.18524/2077-1746.2024.2\(55\).320490](https://doi.org/10.18524/2077-1746.2024.2(55).320490)

С. А. Петров, д.б.н., професор; <https://orcid.org/0000-0001-9390-4006>
С. С. Чернадчук, к.б.н., доцент; <https://orcid.org/0000-0003-3109-7418>
О. К. Будняк, к.б.н., доцент; <https://orcid.org/0000-0002-8256-4664>
А. В. Сорокін, к.б.н., доцент; <https://orcid.org/0000-0002-9151-6488>
Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, кафедра молекулярної біології, біохімії та генетики, вул. Всеволода Змієнка, 2, м. Одеса, 65082, Україна, e-mail: biochem_bio_onu@ukr.net

СТАНОВЛЕННЯ ТА РОЗВИТОК КАФЕДРИ БІОХІМІЇ ОДЕСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ І. І. МЕЧНИКОВА

Розглянуто основні етапи становлення та розвитку кафедри біохімії Одеського національного університету імені І. І. Мечникова: від заснування медичного факультету Імператорського Новоросійського університету (1901) до реорганізації кафедр біологічного факультету Одеського національного університету (2022). Показано внесок видатних вчених, які працювали на кафедрі у різні роки. Охарактеризовано основні здобутки, пріоритети та головні напрямлення діяльності кафедри.

Ключові слова: історія, Одеський університет, кафедра біохімії.

Університет в Одесі відчинив двері для перших студентів 1(13) травня 1865 р. у складі трьох факультетів – історико-філологічного, фізико-математичного та юридичного, а в 1900 р. був заснований медичний факультет [7, 8].

В 1901–1902 н.р. на щойно організованому медичному факультеті Імператорського Новоросійського університету (ІНУ) в м. Одеса була створена кафедра фізіологічної хімії, яку очолив ординарний професор Анатолій Костянтинович Медведєв [3-5, 13-15], цю дату варто вважати як початок розвитку біологічної хімії в ІНУ.

Анатолій Костянтинович Медведєв народився у 1863 р. Навчався на природничому відділенні імператорського університету Санкт-Петербургу, але потім перейшов до військово-медичної академії. Під час навчання в академії брав активну участь в експериментальній роботі. Зокрема, він вивчав вплив стислого повітря, кисню і вугільної кислоти на нервову подразливість організму.

У 1888 р. Медведєв А.К. закінчив військово-медичну академію, отримав диплом з відзнакою та звання військового лікаря. У період з 1893 по 1895 рр. Медведєв А.К. працював у військово-медичній академії під керівництвом професорів Івана Рамазовича Тарханова та Івана Петровича Павлова. В 1893 р. він захистив докторську дисертацію: «Про відношення лейкоцитів до надходження до крові деяких речовин» [9].

В 1895 р. Медведєв А.К. був переведений до ІНУ прозектором при кафедрі фізіології, а з травня 1896 р. – приват-доцентом по кафедрі фізіології тварин.

З моменту організації кафедри фізіологічної хімії (1901), її очільник А.К. Медведєв почав читати курс «Фізіологічна хімія, хімія білкових речовин та їх найближчих похідних, вуглеводів і жирів, вчення про неорганічні ферменти та травні соки хімії травних процесів (кров та лімфа)» [3-5, 12-15]. В рамках вказаного курсу Анатолій Костянтинівич Медведєв започаткував практичні заняття з групами студентів.

В 1902 р. Медведєв А.К. отримав посаду ординарного професора кафедри фізіологічної хімії медичного факультету ІНУ [13-15]. Сфера наукових інтересів його торкалася механізмів утворення аміаку у тваринному організмі. Він показав прямий вплив гормонів щитовидної залози на швидкість дезамінування в крові фенілаланіну, аланіну і аспартату. Крім того, Анатолій Костянтинівич Медведєв був автором понад 10 наукових праць, присвячених вивченню процесів окиснення та був автором підручників: «Записки по физиологической химии», «Курс лекций по физиологической химии».

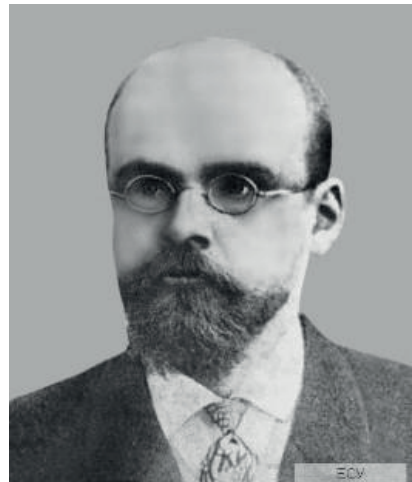
Анатолій Костянтинівич був прогресивною людиною, його глибоко поважали і цінили студенти та колеги, тому саме він був двічі обраний деканом медичного факультету ІНУ і обіймав цю посаду в 1905-1907 та 1916-1920 рр. [13-15].

В 1901 р. на кафедру був зарахований другий викладач – Василь Васильович Зав'ялов [1, 2, 6, 8].

У 1891 р. Василь Васильович закінчив із золотою медаллю костромську гімназію та вступив на медичний факультет. У 1895 р. переїхав до Юр'єва (нині м. Тарту в Естонії) та перейшов на медичний факультет Юр'ївського (Тартуського) університету, де у 1896 р. отримав диплом лікаря, а в 1899 р. захистив дисертацію («К теории белкового



*Анатолій Костянтинівич Медведєв
1863-1921 [9]*



*Василь Васильович Зав'ялов
1873-1930 [6]*



*Юрій Васильович Медведєв
1903-1969 [10]*

пищеварення»), отримав ступінь доктора медицини [13-15].

Період життя в Одесі для лікаря В.В. Зав'ялова розпочався з 1901 р., коли його обрало лаборантом кафедри фізіологічної хімії ІНУ, а згодом – приват-доцентом цієї кафедри. З 1904 по 1908 рр. Зав'ялов В.В. працював екстраординарним професором кафедри зоології, порівняльної анатомії та фізіології, а у 1909–1920 рр. – ординарним професором цієї кафедри.

Наукові інтереси В.В. Зав'ялова були широкими, вони охоплювали як питання суто фізіологічні, так і біохімічні. Крім того, вчений займався проблемами бальнеології та курортології: вивченням ессентукських мінеральних вод, курортних факторів Одеси та ін. Ряд робіт Зав'ялов присвятив біохімії гормонів, насамперед інсуліну. Також розробив органопрепарат «біотонін», який був рекомендований до застосування при симптомах слабкості та розладах нервової системи, серцевої слабкості, розладів обміну речовин.

Головним науковим досягненням В.В. Зав'ялова є отримання пластеїну під час пепсинного перетравлення білків.

Василь Васильович Зав'ялов вільно володів німецькою мовою і перекладав багато учбової та наукової літератури, зокрема, «Керівництво з фізіології хімії» Е. Абдергальдена, «Динаміка живої речовини» Дж. Леба (1910) тощо, є автором підручника «Анатомия и физиология человека» (1907) [13-15].

Після реорганізації в 1922 р. медичного факультету університету в Одеський медичний інститут, кафедра перестала існувати.

Новий етап біохімічних досліджень в Одеському університеті почався в 1944 р., з появою професора Юрія Васильовича Медведєва [10, 12].

Юрій Васильович Медведєв в 1925 р. закінчив Харківський сільськогосподарський інститут і вступив до аспірантури Одеського сільськогосподарського інституту на кафедру анатомії і фізіології рослин до професора-фізіолога Г.А. Боровикова. Того ж року він виїхав до Ленінграду, де під керівництвом академіка Костичева С.П. спеціалізувався в галузі біохімії рослин та мікробіології. З 1926 по 1932 рр. Юрій Васильович працював у лабораторії біохімії та фізіології рослин АН СРСР. В 1932 р. Юрій Васильович Медведєв перейшов до Ленінградського державного університету на посаду доцента, де першим у СРСР організував курс та практикум, який був присвячений вивченню ферментів. І в цей період він друкує свою монографію «Новые направления в учении о ферментах» [9]. Юрій Васильович Медведєв розробив метод отримання етило-

вого спирту з деревини. У 1933 р. Медведєва Ю.В. призначають начальником біохімічного цеху Череповецького експериментального гідролізного заводу, де протягом двох років він працював над організацією виробництва етилового спирту з деревини. В 1936 р. науковець почав працювати в інституті експериментальної медицини Всесоюзного інституту експериментальної медицини та захистив докторську дисертацію: «Кінетична теорія біохімічних процесів». В 1937 р. Юрій Васильович Медведєв був обраний завідувачем кафедри анатомії та фізіології рослин Харківського університету, а в 1938 р. - отримав звання професора [10, 12].

Після деокупації Одеси (1944) - Юрій Васильович Медведєв очолив кафедру біохімії і мікробіології Одеського державного університету (ОДУ), яка існувала один рік і одночасно зайняв посаду директора ботанічного саду і завідувача кафедри хімії зерна в інституті інженерів борошномельної промисловості [10]. Протягом 1945-1949 рр. - Юрій Васильович Медведєв очолював кафедру біохімії. У 1949 р. під тиском лисенківців кафедру було ліквідовано. До кінця 1949 р. Юрій Васильович Медведєв очолював Секцію біохімії в Зообіні при ОДУ [10].

В 1964 р. була організована самостійна кафедра біохімії, яку очолив доктор медичних наук Анатолій Якович Розанов [12-15].

Анатолій Якович Розанов народився в 1929 р. в Одесі. В 1944 р. в 15-річному віці після дострокового закінчення школи він вступив до Одеського медичного інституту, який закінчив з відзнакою в 1949 р. У тому ж році він вступив до аспірантури Одеського медичного інституту. Під керівництвом професора Д.А. Цуверкалова Анатолій Якович Розанов підготував кандидатську дисертацію «Воздействие длительного медикаментозного сна на потребность организма в витамине С», яку захистив в 1952 р.

В 1952 р. Розанов Анатолій Якович був зарахований на посаду асистента кафедри біохімії Одеського медичного інституту. На цій посаді він працював 10 років. За цей період підготував докторську дисертацію «Метаболізм тіаміну та його фосфорних ефірів і дисульфідів в тваринному організмі». У 1962 р. Анатолій Якович перейшов в Одеський НДІ туберкульозу на посаду керівника біохімічної лабораторії. На цій посаді він працював до 1963 р. У тому ж році Анатолій Якович Розанов був обраний за конкурсом на посаду завідувача лабораторії біохімії Інституту геронтології та експериментальної патології АМН СРСР (м. Київ). В 1964 р. Розанов А.Я. захистив докторську дисертацію і



*Анатолій Якович Розанов
1929-2004 [15]*

був запрошений до Одеського державного університету на посаду завідувача щойно організованої кафедри біохімії.

У штаті кафедри було п'ять викладачів, один старший лаборант і один лаборант. На посаді викладачів, крім професора Розанова А.Я., працювали доцент Голубцева М.В., доцент Тоцький В.М., доцент Коваль В.Т., асистент Карпов Л.М. На посаді старшого лаборанта працювала Монакіна Т.О.

Доцент Голубцева М.В. була однією із аспіранток ще за часів професора Медведєва Ю.В. Її доля складалася досить складно. Довгий час партійне керівництво факультету не давало їй рекомендацію в аспірантуру, тому що вона була донькою так званого «ворогу народу».

З відкриттям в 1964 р. кафедри, Голубцева М.В. обіймала посаду доцента і читала загальний курс «Біофізики» і спецкурс «Біохімія білка».

Доцент Тоцький В.М. читав спецкурс «Біохімія нуклеїнових кислот». На кафедрі біохімії Тоцький Владлен Миколайович підготував докторську дисертацію і перейшов на посаду завідувача кафедри генетики. Доцент Коваль В.Т. читав спецкурс «Біохімія антибіотиків» і «Еволюційна біохімія». В 1975 р. він очолив кафедру ботаніки. Асистент Карпов Л.М. на кафедрі біохімії підготував кандидатську, а потім і докторську дисертації і в 2001 р. очолив кафедру фізіології людини і тварин.

З перших днів існування кафедри завдяки зусиллям Анатолія Яковича Розанова на кафедрі з'явилося сучасне на той період обладнання. На кафедрі також була організована радіоізотопна лабораторія, яка зіграла вирішальну роль в подальших дослідженнях співробітників кафедри. В 1966 р. А. Я. Розанов отримав звання професора [12].

Дослідження кафедри біохімії того часу були присвячені вивченню механізмів взаємодії вітамінів в організмі. Професор Розанов А. Я. організував ці дослідження під впливом академіка АН УРСР Р.В. Чаговця, який працював завідувачем відділу біохімії вітамінів та коферментів Інституту біохімії АН УРСР. Чаговець Р.В. був засновником вітамінологічних досліджень не тільки в Україні. Під його впливом професор Ю.М. Островський розпочав роботу з вивчення метаболізму вітамінів в м. Гродно (Білорусь) в відділі АН БРСР, який потім переріс в Інститут біохімії АН Білорусі.

Завдяки існуванню радіоізотопної лабораторії співробітники кафедри біохімії ОДУ отримали можливість досліджувати динаміку розподілу і метаболізм в організмі ^{14}C -тіаміну, ^{14}C -нікотинової кислоти, ^{35}S -ліпоату, ^{14}C -біотину, ^{14}C -рибофлавіну.

Певне наукове значення мали дослідження впливу екстремальних факторів (гіпоксія, гіпотермія) на динаміку розподілу вітамінів в організмі. На кафедрі біохімії були вперше в СРСР синтезовані нікотиноіл-ГАМК- ^{14}C і пантогам- ^{14}C . Фармакодинаміка цих сполук теж була досліджена. Істотний внесок в теорію механізмів проникнення вітамінів крізь біологічні мембрани дали дослідження накопичення мічених вітамінів та їх метаболітів у мітохондріях.

Особливе місце в дослідженнях кафедри займала проблема взаємодії вітамінів у тваринному організмі. Ці дослідження почалися з вивчення ефектів впливу одного вітаміну на розподіл і фіксацію в тканинах іншого. В значній більшості випадків був отриманий стимулювальний ефект парного введення функціонально пов'язаних вітамінів на фіксацію кожного з них. Ці дослідження дозволили професору Розанову А.Я. сформулювати гіпотезу співдружного протеїдикування вітамінів, що входять у формі коферментів в мультиензимні комплекси. Ця гіпотеза була прийнята вітамінологами як один з можливих механізмів взаємодії вітамінів в організмі.

Отримані результати мали практичне значення. На їх основі вперше в СРСР на кафедрі біохімії були створені ампульовані полівітамініні препарати.

В останні роки свого життя професор Розанов А.Я. займався проблемою впливу екстремальних факторів на біохімічні процеси в організмі та питаннями нейрохімії.

Анатолій Якович Розанов був автором та співавтором таких видатних наукових видань, як: «Обмен витаминов при сердечно-сосудистых заболеваниях» (1975), «Экспериментальная витаминология» (1979), «Ферментативные процессы и их коррекция при экспериментальных состояниях» (1985), «Механизмы регуляции биокатализа» (1989), «Ферментная технология» (1996).

За період завідування кафедрою біохімії (1964–1995 рр.) під керівництвом Розанова А. Я. було захищено більше 40 кандидатських дисертацій. Він був науковим консультантом 6 докторських дисертацій. Анатолій Якович Розанов був автором 10 монографій і більше 200 наукових статей [12, 15].

З 1995 р. завідувачем кафедри став доцент Олександр Вікторович Запорожченко [11].

З 1978 р. Олександр Вікторович Запорожченко працював у Одеському університеті на посадах молодшого наукового співробітника, завідувача ізотопної лабораторії, асистента, старшого викладача, доцента, завідувача кафедри біохімії. З 2002 р. – проректор з науково-педагогічної роботи.

Захистив кандидатську дисертацію «Распределение в животном организме и действие на функционально связанные ферменты некоторых алкил-производных 3-оксипиридина, антиоксидантного и геропротекторного действия» (1990). В 1995 р. Олександр Вікторович отримав вчене звання доцента кафедри біохімії.

Запорожченко О.В. нагороджений нагрудними знаками «Відмінник освіти» (1999),



*Олександр Вікторович Запорожченко
1956 р.н. [11]*

«Антон Макаренко» (2005) Міністерства освіти і науки України; Почесною грамотою Міністерства освіти і науки України (2004); присвоєне почесне звання «Заслужений працівник освіти України» (2015).

Олександр Вікторович є одним із тих, хто стояв біля витоків упровадження тестових технологій оцінювання якості освіти. Упродовж 2002-2005 рр. очолював Одеський регіональний центр тестових технологій, з чого в Україні розпочався пілотний експеримент щодо створення нової прозорої та антикорупційної системи вступу абітурієнтів до вищих навчальних закладів.

Під керівництвом О.В. Запорожченко в ОНУ імені І.І. Мечникова розроблена та впроваджена комп'ютерна програма для здійснення контролю знань студентів за тестовими технологіями.

Олександр Вікторович Запорожченко опублікував понад 100 наукових та навчально-методичних праць.

Одним з наукових напрямків кафедри з 1995 по 2010 рр. були дослідження особливостей функціонування системи протеолізу за онкопроцесу, яку очолювала професор кафедри біохімії, доктор біологічних наук Вовчук Ірина Леонідівна. За цим напрямком опубліковано більше 100 наукових публікацій, захищено 1 докторську та 2 кандидатські дисертації.

З 2015 по 2022 рр. кафедрою біохімії завідував професор, доктор біологічних наук Петров Сергій Анатолійович.

Сергій Анатолійович Петров народився в Одесі в 1951 р. В 1967 р. вступив на біологічний факультет Одеського державного університету імені І. І. Мечникова, під час навчання захоплювався біохімією, вітамінологією та геронтологією. В 1972 р. вступив до аспірантури біологічного факультету, під час



*Петров Сергій Анатолійович
1951 р.н. [14]*

навчання в аспірантурі вивчав філогенетичні особливості взаємодії вітамінів. Після закінчення аспірантури працював асистентом, доцентом, професором кафедри біохімії. В 1980 р. Сергій Анатолійович успішно захистив кандидатську дисертацію за темою «Особенности взаимодействия функционально-связанных витаминов в организме мидий, кефали и крыс». З 1980 року на кафедрі, під керівництвом доцента Петрова С.А. був розпочатий новий науковий напрямок з вивчення некоферментних функцій вітамінів.

Необхідність таких досліджень була продиктована наступними причинами: багато біохімічних ефектів, що спостерігалися після введення фізіологічних доз вітамінів, не вкладалися в рамки уявлень про коферментні функції вітамінів, а іноді були прямо проти-

лежними цим уявленням. Крім того, дослідження біохімічних ефектів, які спостерігалися після введення катаболітів вітамінів, нездатних перетворюватися в коферменти, продемонстрували ефекти впливу цих сполук на ряд біохімічних процесів. На базі цих досліджень, у 1992 р. Петровим С.А. була захищена докторська дисертація «Регуляція тиаміном и его метаболитами процессов образования и обмена аминокислот и кетокислот в организме».

У цих дослідженнях було продемонстровано, що такий катаболіт тіаміну, як тіохром здатний регулювати активність певної групи ферментів. Крім того, був вивчений характер катаболізму в організмі таких вітамінів як тіамін, ліпоева кислота, пантотенова кислота і ніотинова кислота.

Специфічні функції катаболітів цих вітамінів зараз ретельно вивчаються.

За цим напрямком опубліковано більше 200 наукових статей, 2 підручники і 3 монографії.

Під керівництвом професора С.А. Петрова ретельно вивчається біохімічний ефект спільної дії всіх присутніх у клітинах метаболітів того чи іншого вітаміну. Такий комплекс всіх метаболітів окремих вітамінів, що утворюються, професор запропонував назвати Вітаболомом. Дослідження в цьому напрямку, які були проведені з тіаміновим, рибофлавіновим, і пантотеновим Вітаболомом продемонстрували, що в деяких випадках комплекси метаболітів мають регуляторні властивості і принципово відрізняються від таких у відповідних вітамінів і коферментів.

В даний час вітамінологічні дослідження в Україні та за кордоном переживають етап бурхливого розвитку. Це пов'язано, перш за все, з відкриттям нових продуктів метаболізму вітамінів, які в ряді випадків виявляються ефективними модуляторами найважливіших метаболічних систем.

З 2018 р. Петров С.А. очолює Одеське відділення Українського біохімічного товариства (ОВ УБТ).

В 2021 р. кафедра біохімії брала участь в міжнародному науковому проєкті по дослідям біоресурсів Антарктиди.

Під керівництвом професора С.А. Петрова було захищено 1 докторську і 9 кандидатських дисертацій.

Сергій Анатолійович Петров є автором та співавтором таких визначних наукових видань, як: «Ферменти захисту і агресії мікроорганізмів» (2011), «Екологія суспільства» (2012), «Вітамінологія» (2013), «Патологічна біохімія» (2021).

Зараз біохімічні дослідження проводять кандидати біологічних наук, доценти Будняк Олександр Костянтинівич, Сорокін Андрій Вікторович, Федорко Наталія Леонідівна, Чернадчук Сніжана Сергіївна.

Науково-дослідна робота викладачів спрямована на дослідження:

- Біохімії стресу та адаптації.
- Механізмів регуляції обміну речовин у нормі та за дії на організм екстремальних факторів.

- Особливостей функціонування ферментів системи живих організмів за умов експериментальних патологій (зокрема за умов нейропатологій).
- Некоферментних функцій вітамінів в організмі в нормі та під впливом експериментальних факторів.
- Енергетичного статусу живих організмів за дії навколишнього середовища.

В 2022 р. відбулась реорганізація кафедр біологічного факультету ОНУ імені І. І. Мечникова і кафедра біохімії була об'єднана з кафедрою молекулярної біології та генетики (утворилась кафедра молекулярної біології, біохімії та генетики).

Таким чином, кафедра біохімії Одеського національного університету в 2022 р. припинила своє існування, як окрема кафедра.

Надані в роботі факти поглиблюють знання щодо історії біохімічних досліджень в Одеському національному університеті імені І. І. Мечникова.

Стаття надійшла до редакції 21.06.2024

Список використаної літератури

1. Богачик Т. А., Єфремова І. В., Рясіков Л. В. Зав'ялов В. В. (1873–1930) – ординарний професор кафедри зоології, порівняльної анатомії та фізіології природничого відділення Імператорського Новоросійського університету // *Тези доповідей науково-практичної конференції з міжнародною участю, присвяченої 175-річчю з дня народження І. М. Сеченова*. Одеса, 2004. С. 3–5.
2. Биографический словарь профессоров и преподавателей императорского Юрьевского бывшего Дерпатского университета. Юрьев, 1903. Т.2. С. 313-314
3. Бабий Т. П., Коханова Л. Л., Костюк Г. Г. и др. *Биологи: биографический справочник* / отв. ред. Ф. И. Серков. Киев: «Наукова думка», 1984. 816 с.
4. Запорожан В. Н., Кресюн В. М., Романова Н. А. Наука в південному регіоні України (1971–2011). Одеський національний медичний університет. Одеса: Фенікс, 2011. С. 249–269.
5. Запорожченко О. В., Рясіков Л. В. Про одеський період в житті доктора медицини, ординарного професора фізіологічної хімії Імператорського Новоросійського університету Анатолія Костянтиновича Медведєва (1863–1921) // *Тези доповідей науково-практичної конференції з міжнародною участю, присвяченої 175-річчю з дня народження І. М. Сеченова*. Одеса, 2004. С. 23–25.
6. Зав'ялов Василь Васильович / К. К. Васильєв // *Енциклопедія Сучасної України* [Електронний ресурс] / Редкол. : І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.] ; НАН України, НТШ. К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2010. – Режим доступу : <https://esu.com.ua/article-15109>
7. Історія Одеського університету за 100 років / Відп. ред. О. І. Юрженко. К.: Вид-во КДУ, 1968. 423 с.
8. Історія Одеського університету (1865-2000) /Л. О. Ануфрієв, С. О. Аппатов, Ю.О. Амброз; гол. ред.: В. А. Сминтина; ОДУ ім. І. І. Мечникова. Одеса: Астропринт, 2000. 225 с.
9. Медведєв Анатолій Костянтинович / К. К. Васильєв // *Енциклопедія Сучасної України* [Електронний ресурс] / Редкол. : І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.] ; НАН України, НТШ. К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2018. – Режим доступу : <https://esu.com.ua/article-67333>
10. Медведєв Юрій (Георгій) Васильович / В. О. Кузнецов // *Енциклопедія Сучасної України* [Електронний ресурс] / Редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.] ; НАН України, НТШ. К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2018. – Режим доступу: <https://esu.com.ua/article-67370>
11. Одеський національний університет імені І. І. Мечникова. Історія та сучасність (1865–2015) / ОНУ ім. І. І. Мечникова; гол. ред.: І. М. Коваль; вступ. слово: І. М. Коваль, В. М. Хмарський. Одеса: Одеський нац. ун-т, 2015. 963 с.
12. Петров С. А. Історія кафедри біохімії Одеського національного університету імені І. І. Мечникова. *Вісник ОНУ*. 2013. Том 18. С. 7–12.
doi: [https://doi.org/10.18524/2077-1746.2013.4\(33\).45543](https://doi.org/10.18524/2077-1746.2013.4(33).45543)

13. Професори Одеського (Новоросійського) університету: біогр. словник / ОНУ ім. І. І. Мечникова, Наукова б-ка; відп. ред. В. А. Сминтина; заст. відп. ред. М. О. Подрезова; авт. вступ. ст. В. М. Хмарський; упоряд. та бібліогр. ред.: В. П. Пружина, В. В. Самодурова. Вид. 2-ге, доп. Одеса: Астропринт, 2005. Том 2. 509 с.
14. Професори Одеського (Новоросійського) університету: біогр. словник / ОНУ ім. І. І. Мечникова, Наукова б-ка; відп. ред. В. А. Сминтина; заст. відп. ред. М. О. Подрезова; авт. вступ. ст. В. М. Хмарський; упоряд. та бібліогр. ред.: В. П. Пружина, В. В. Самодурова. Вид. 2-ге, доп. Одеса: Астропринт, 2005. Том 3. 597 с.
15. Професори Одеського (Новоросійського) університету: біогр. словник / ОНУ ім. І. І. Мечникова, Наукова б-ка; відп. ред. В. А. Сминтина; заст. відп. ред. М. О. Подрезова; авт. вступ. ст. В. М. Хмарський; упоряд. та бібліогр. ред.: В. П. Пружина, В. В. Самодурова. Вид. 2-ге, доп. Одеса: Астропринт, 2005. Том 4. 629 с.

С. А. Петров, С. С. Чернадчук, О. К. Будняк, А. В. Сорокін
Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, кафедра
молекулярної біології, біохімії та генетики, вул. Всеволода Змієнка, 2,
м. Одеса, 65082, Україна

СТАНОВЛЕННЯ ТА РОЗВИТОК КАФЕДРИ БІОХІМІЇ ОДЕСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ І. І. МЕЧНИКОВА

Резюме

Мета. Висвітлення основних біографічних даних і результатів науково-педагогічної діяльності науковців, які працювали в період становлення і розвитку кафедри біохімії.

Основні результати. Описана історія кафедри біохімії Одеського національного університету. Наведені дані щодо її заснування і вчених, які працювали на кафедрі. Охарактеризовані основні напрямки наукових досліджень співробітників кафедри.

Висновки. Надані в роботі факти поглиблюють знання щодо історії біохімічних досліджень в Одеському національному університеті імені І. І. Мечникова.

Ключові слова: історія, Одеський університет, кафедра біохімії.

S. A. Petrov, S. S. Chernadchuk, O. K. Budnyak, A. V. Sorokin
Odesa I. I. Mechnikov National University, 2 Vsevoloda Zmiiienka St, Odesa,
65082, Ukraine

FORMATION AND DEVELOPMENT OF THE DEPARTMENT OF BIOCHEMISTRY OF ODESA I. I. MECHNIKOV NATIONAL UNIVERSITY

Summary

Aim. To highlight the main biographical data and results of scientific and pedagogical activities of scientists who worked during the period of formation and development of the Department of Biochemistry.

Main results. The history of the Department of Biochemistry of Odesa National University is described. Data on its foundation and scientists who worked at the department are presented. The main directions of scientific research of the department's employees are characterized.

Conclusions. The facts presented in the work deepen knowledge about the history of biochemical research of Odesa I. I. Mechnikov National University.

Keywords: history, Odesa University, Department of Biochemistry.

References

1. Bogachyk, T. A., Yefremova, I. V., Rysakiv & L. V. Zavyalov, V. V. (1873–1930) – full professor of the Department of Zoology, Comparative Anatomy and Physiology of the Department of Natural Sciences of the Imperial Novorossiysk University. Abstracts of reports scientific and practical conference with international participation, dedicated to the 175th anniversary of the birth of I. M. Sechenov. Odesa, 2004. P. 3–5. [In Ukrainian].
2. Biographical dictionary of professors and teachers of the Imperial Yurievskogo former Derpatskogo University. Yuryev, 1903. Volume 2. P. 313–314. [In Ukrainian].
3. Babii, T. P., Kokhanova, L. L., & Kostyuk, G. G. i dr. (1984). Biologi: biograficheskii spravochnik [Biologists: biographical guide] / otv. red. F. I. Serkov. Naukova dumka. 816 s. [in Russian].
4. Zaporozhan, V.N., Kresyun, V.M., & Romanova N.A. Science in the Southern Region of Ukraine (1971–2011). Odesa National Medical University. Odesa: Phoenix, 2011. P. 249–269. [In Ukrainian].
5. Zaporozhchenko O. V., Rysakiv L. V. About the Odesa period in the life of Anatoly Kostyantynovich Medvedev (1863–1921), Doctor of Medicine, Full Professor of Physiological Chemistry of the Imperial Novorossiysk University (1863–1921) // Abstracts of reports of a scientific and practical conference with international participation, dedicated to 175 - a speech from I. M. Sechenov's birthday. Odesa, 2004. P. 23–25. [In Ukrainian].
6. Zavyalov Vasil Vasyliovych / K. K. Vasiliev // Encyclopedia of Modern Ukraine [Electronic resource] / Redcol.: I. M. Dzyuba, A. I. Zhukovsky, M. G. Zheleznyak [and others] ; National Academy of Sciences of Ukraine, National Academy of Sciences. K.: Institute of Encyclopedic Research of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2010. Access mode: <https://esu.com.ua/article-15109> [In Ukrainian].
7. History of Odesa University for 100 years. / Yurzhenko O. I. K.: KDU, 1968. 423 p. [In Ukrainian].
8. History of Odesa University (1865–2000) / L. O. Anufriev, S. O. Appatov, Yu.O. Ambrose; Goal. editor: V. A. Smintyna; State University named after I. I. Mechnikova. Odesa: Astroprint, 2000. 225 p. [In Ukrainian].
9. Medvedev Anatoly Kostiantynovich / K. K. Vasiliev // Encyclopaedia of Modern Ukraine [Electronic resource] / Redcol. : I. M. Dzyuba, A. I. Zhukovsky, M. G. Zheleznyak [and others] ; National Academy of Sciences of Ukraine, National Academy of Sciences. K.: Institute of Encyclopedic Research of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2018. – Access mode: <https://esu.com.ua/article-67333> [In Ukrainian].
10. Medvedev Yuriy (Georgiy) Vasyliovych / V. O. Kuznetsov // Encyclopedia of Modern Ukraine [Electronic resource] / Editors: I. M. Dzyuba, A. I. Zhukovsky, M. G. Zheleznyak [and others]; National Academy of Sciences of Ukraine, National Academy of Sciences. K.: Institute of Encyclopedic Research of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2018. – Access mode: <https://esu.com.ua/article-67370> [In Ukrainian].
11. Odesa National University named after I. I. Mechnikov. History and modernity (1865–2015) / ONU named after I. I. Mechnikova; Goal. editor: I. M. Koval; introduction. words: I. M. Koval, V. M. Khmarskyi. Odesa: Odesa National. University, 2015. 963 p. [In Ukrainian].
12. Petrov S. A. History of the Department of Biochemistry of Odesa I. I. Mechnikov National University. ONU Bulletin. 2013. Volume 18. P. 7–12. doi: [https://doi.org/10.18524/2077-1746.2013.4\(33\).45543](https://doi.org/10.18524/2077-1746.2013.4(33).45543) [In Ukrainian].
13. Professors of Odesa (Novorossiysk) University: biographical dictionary / ONU named after I. I. Mechnikov, Scientific journal; deputy editor V. A. Smyntyn; deputy editor M. O. Podrezov; author of the introduction by V. M. Khmarsky; editor and bibliography by V. P. Pruzhina, V. V. Samodurova. 2nd ed., supplement Odesa: Astroprint, 2005. Volume 2. 509 p. [In Ukrainian].
14. Professors of Odesa (Novorossiysk) University: biographical dictionary / ONU named after I. I. Mechnikov, Scientific journal; deputy editor V. A. Smyntyn; deputy editor M. O. Podrezov; author of the introduction by V. M. Khmarsky; editor and bibliography by V. P. Pruzhina, V. V. Samodurova. Ed. 2nd, supplement. Odesa: Astroprint, 2005. Vol. 3. 597 p. [In Ukrainian].
15. Professors of Odesa (Novorossiysk) University: biogr. dictionary / ONU named after I.I. Mechnikov, Scientific b-ka; deputy editor V. A. Smintyna; deputy editor M. O. Podrezova; author of the introduction V. M. Khmarsky; editor and bibliographer: V. P. Pruzhina, V. V. Samodurova. Ed. 2nd, supplement. Odesa: Astroprint, 2005. Vol. 4. 629 p. [In Ukrainian].

З'ЇЗДИ ТА КОНФЕРЕНЦІЇ



[https://doi.org/10.18524/2077-1746.2024.2\(55\).320491](https://doi.org/10.18524/2077-1746.2024.2(55).320491)

**БІОЛОГІЧНА СЕКЦІЯ (23 СЕРПНЯ 2024 р.)
В МЕЖАХ XXIV ГАМОВСЬКОЇ МІЖНАРОДНОЇ
АСТРОНОМІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ «АСТРОНОМІЯ ТА НЕ
ТІЛЬКИ: АСТРОФІЗИКА, КОСМОЛОГІЯ ТА ГРАВІТАЦІЯ,
АСТРОФІЗИКА ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК,
РАДІОАСТРОНОМІЯ, АСТРОБІОЛОГІЯ ТА ГЕНЕТИКА»,
ЯКА ПРОВОДИЛАСЬ 19–23 СЕРПНЯ 2024 р.
В ОНУ ІМЕНІ І. І. МЕЧНИКОВА, ОДЕСА, УКРАЇНА**

23 серпня 2024 року вже вшосте в межах роботи Гамовської міжнародної астрономічної конференції відбулося засідання Біологічної секції. Біологічна секція традиційно проходила під назвою «Важливість ідей Г. Гамова для біології 21 століття». Цього року у роботі секції взяли участь 39 науковців та студентів. Свої наукові доповіді представили вчені з України, Німеччини, Великобританії, Данії, Канади та США. Доповіді охоплювали дослідження, що базуються на вивченні нуклеотидних послідовностей генів та геномів різних біологічних видів.

Ключові слова: Біологічна секція, Гамовська міжнародна астрономічна конференція, нуклеотидні послідовності, ген, геном.

**THE BIOLOGICAL SECTION (23 AUGUST 2024)
WITHIN THE XXIV GAMOW INTERNATIONAL
ASTRONOMICAL CONFERENCE “ASTRONOMY
AND BEYOND: ASTROPHYSICS, COSMOLOGY AND
GRAVITATION, ASTROPARTICLE PHYSICS, RADIO
ASTRONOMY, ASTROBIOLOGY AND GENETICS”, HELD ON
19–23 AUGUST 2024 AT ODESA I. I. MECHNIKOV NATIONAL
UNIVERSITY, ODESA CITY, UKRAINE**

It was the sixth session of the Biological Section within the Gamow International Astronomical Conference that took place on 23 August 2024. The Biological Section was traditionally held under the title “Importance of G. Gamov’s Ideas for the Biology of the 21st Century.” This year, 39 scientists and students participated in the work of the section. Scientists from Ukraine, Germany, Great Britain, Denmark, Canada and the USA presented their scientific reports. Those reports covered research based on the studies of nucleotide sequences of genes and genomes of various biological species.

Keywords: Biological Section, Gamow International Astronomical Conference, nucleotide sequences, gene, genome.

Професор С. Чеботар, керівник секції, відкрила засідання промовою про внесок Георгія Антоновича Гамова у розвиток молекулярної біології. Вона нагадала, що на сьогоднішній день написано низку книг, присвячених Г. А. Гамову та його ролі у розшифруванні генетичного коду. Серед них книга Джеймса Д. Вотсона, лауреата Нобелівської премії та першовідкривача подвійної спіралі ДНК, «Genes, Girls and Gamow» (2001); книга професора Пенсильванського університету Джіно Серге «Ordinary Geniuses: How Two Mavericks Shaped Modern Science» (2011), присвячена Максу Дельбрюку та Георгію Гамову, які в певний час товаришували та обговорювали наукові ідеї визначення генетичного коду (ця книга була перевидана у Києві українською мовою у 2017 році), а також книга Гораса Фріланда Джудсона «The Eighth Day of Creation: Makers of the Revolution in Biology» (1996). Цього року Біологічна секція включала широкий спектр наукових доповідей, що підкреслюють важливість ідей Георгія Гамова для сучасної біології.

Під час роботи секції було представлено 14 наукових доповідей. Доктор біологічних наук М. Борисюк з Інституту клітинної біології та генетичної інженерії НАН (м. Київ) представив результати досліджень, виконаних спільно з науковцями Huaiyin Normal University (Китай), у доповіді «First nucleotide level structure of 5S and 35S rDNA loci for plants». Дослідження генів, що кодують рибосомні РНК, було висвітлено у доповіді професора Р. Волкова та його співавторів «Conserved sequence elements in the 5S rDNA intergenic spacer are present in the genomes of distantly related Angiosperms»; ці дослідження були виконані на кафедрі біотехнології і генетики Чернівецького університету (м. Чернівці).

Молода науковиця Ю. Попович у доповіді «Application of new molecular markers for detecting genetic polymorphism of Ukrainian cultivars of *Triticum durum* Desf.» представила результати досліджень, проведених під керівництвом професора С. Чеботар на кафедрі молекулярної біології, біохімії та генетики ОНУ імені І. І. Мечникова. Також в доповіді були представлені результати досліджень, проведених у співпраці з науковцями Селекційно-генетичного інституту – Національного центру насіннезнавства та сортовивчення (м. Одеса).

На особливу увагу заслуговувала демонстрація практичного застосування CRISPR-Cas9 технології для створення гаплопродьюсорів у ячменю – цю роботу представила аспірантка Р. Satpathy у доповіді «Generation of haploidy inducers in barley by Cas9-mediated knockout of phospholipase A1». Її робота, виконана під керівництвом професора J. Kumlehn (Leibniz Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research (IPK), Гатерслебен, Німеччина), викликала велику зацікавленість серед вітчизняних біотехнологів, зокрема О. Л. Шестопал і І. С. Замбірборщ, які працюють у Селекційно-генетичному інституті – Національному центрі насіннезнавства та сортовивчення.

Про важливість забезпечення принципів FAIR для дослідницьких даних, а саме доступності та повторного використання накопичених даних у міжнародних проєктах програми Horizon 2020 говорила Г. Чеботар у своїй доповіді

«Ensuring data accessibility and reusability: the FAIR approach to research data management», що висвітлює роботу з даними, які було отримано в межах наукового проекту INCREASE, виконаного у Leibniz Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research (ІПК), Гатерслебен, Німеччина.

Цілу низку надзвичайно цікавих досліджень з генетики бактерій представили науковці Львівського національного університету імені Івана Франка. Серед них варто відзначити доповідь О. Ющука «Developing a genetic toolkit to manipulate the rare actinobacterium *Umezawaea endophytica*» та доповідь аспірантки С. Мельник «Exploring the genomic potential of *Streptomyces roseochromogenes* NRRL 3504 for specialized metabolite production». Також із доповідями виступили аспіранти В.-М. Цедуляк «Effects of mutated ribosomal protein S12 on *Streptomyces Albidoflavus* J1074» та І. Роман «The impact of bioinformatics tools in the classification of prokaryotes: the case of the genus *Actinoplanes*». Науковиця з Копенгагенського університету й Орхуського університету (Данія) Д. Жарікова у своїй доповіді «The unexplored relationship between the epigenome and the root microbiome of *Zea mays*» привернула увагу до необхідності досліджувати взаємодію між кореневим мікробіомом та рослинами.

За напрямом молекулярно-генетичних досліджень людини були висвітлені сучасні підходи до діагностики та лікування. Так, доповідь науковиці із St George's University of London та генетика St George's University Hospitals Dr. K. Snape «Cancer genomics: clinical interrogation of the two genomes of cancer patients» привернула велику увагу і продемонструвала переваги застосування ДНК-технологій у діагностичних цілях. Від української корпорації «Юрія-Фарм» Олександр Губар представив доповідь «Multifactorial engineering of capless mRNAs for enhanced in vitro potencies», присвячену використанню РНК-технологій у лікуванні.

Дослідження із застосуванням молекулярно-генетичних технологій, що проводяться в McGill University Health Center (м. Монреаль, Канада), були висвітлені у доповіді Dr. Yu. Monczak «Measurable residual disease (MRD) in lymphoid malignancies: the haystack, the needle, and how to find it».

Наприкінці роботи Біологічної секції, Dr. X. Li з Вашингтонського державного університету (м. Вашингтон, США) представив доповідь «Graphing large indel-based haplotypes from pan-genome facilitates gene discovery», присвячену застосуванню пангеноміки для вивчення гаплотипів та їхньої ролі у відкритті нових генів.

Попри складні умови воєнного часу, перерви електроживлення та часові відмінності через географічні локації доповідачів, науковці-біологи провели дуже продуктивну сесію й висловили щирі сподівання на перемогу України у війні та настання миру!

UDC 58:577.213/215

**Borisjuk M.^{1,2*}, Stepanenko A.^{1,2,3}, Chen G.², Michael T.⁴, Lam E.⁵,
Schubert V.³, Schubert I.³**

¹ Institute of Cell Biology and Genetic Engineering, National Academy of Sciences, Kyiv, Ukraine

² School of Life Sciences, Huaiyin Normal University, Huai'an, China

³ Leibniz Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research (IPK), Gatersleben, Seeland, Germany

⁴ Salk Institute for Biological Studies, La Jolla, USA

⁵ Rutgers the State University of New Jersey, New Brunswick, USA

* E-mail: nborisjuk@yahoo.com

FIRST NUCLEOTIDE LEVEL STRUCTURE OF 5S AND 35S rDNA LOCI FOR PLANTS

Ribosomal DNA (rDNA) plays an important part in eukaryotes by encoding four ribosomal RNAs necessary for ribosome biogenesis, thus regulating organism's growth and development. Plants typically have two types of rDNA loci: the 5S rDNA loci, containing tandem copies of 5S rRNA genes separated by non-transcribed spacers (NTS), and the 35S rDNA loci, encoding three linked rRNA genes (18S-5.8S-25S) intertwined with intergenic spacers (IGSs) [1]. Taking advantage of low copy number of rDNA repeats in aquatic monocot plant *Spirodela polyrhiza* [2] (about 100 copies of both 5S and 35S rDNA genes, compared to thousands copies in most of plant species), we revealed the detailed molecular organization of the rDNA loci combining molecular cytology, conventional and extra-long Oxford Nanopore (ON) sequencing. First, we show that relatively G/C rich 35S rDNA and 5S rDNA arrays are imbedded in highly A/T-enriched chromosome regions. Cloning and nucleotide sequencing of the 35S rDNA repeats located in a single chromosome locus, demonstrated high conservation of the sequences encoding 18S, 5.8S, and 25S rRNAs and some intra-genomic heterogeneity in IGSs with an unorthodox structure of usually conserved rRNA transcription initiation site (TIS). The latter finding is intriguing, considering that TIS in the related species of *Pistia stratiotes* [3] has a canonic TATAGGGG signature typical for majority of the plants species. Validation of rough ON data by sequencing multiple plasmids with PCR fragments covering individual 5S rDNA units, demonstrated that the 5S rDNA repeat clusters localize on two different chromosomal loci, which was further confirmed by *in situ* hybridization. The loci are correspondingly composed of 40 and 60 repeat units containing the NTSs of different size and demonstrating different rates of sequence variability, further supporting the contrasting evolutionary dynamics of the two types of 5S rDNA units in *S. polyrhiza* [4]. In summary, our findings put duckweeds in the spotlight for research on the molecular evolution of the rDNA, promising new insights into basic principles of organization and regulation of rRNA genes in plants.

References

1. Hemleben, V., Grierson, D., Borisjuk N. et al. (2021). Personal perspectives on plant ribosomal RNA genes research – from precursor-rRNA to molecular evolution. *Frontiers Plant Sci.* 12, 797348. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.797348>
2. Michael, T., Bryant, D., Gutierrez, R., Borisjuk, N. et al. (2017). Comprehensive definitions of genome features in *Spirodela polyrhiza* by high-depth physical mapping and short-read DNA sequencing strategies. *The Plant Journal.* 89, P. 617-637.
3. Stepanenko, A., Chen, G., Hoang, P.T.N. et al. (2022). The ribosomal DNA loci of the ancient monocot *Pistia stratiotes* L. (Araceae) contain different variants of the 35S and 5S ribosomal RNA gene units. *Frontiers Plant Sci.* 13:819750. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.819750>
4. Chen, G., Stepanenko, A., Borisjuk, N. (2024). Contrasting patterns of 5S rDNA repeats in European and Asian ecotypes of greater duckweed, *Spirodela polyrhiza* (Lemnaceae). *Frontiers Plant Sci.* 15, 1378683. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1378683>

UDC 577.113 + 582.5

Tynkevich Yu. O., Panchuk I. I., Volkov R. A.*

Department of Molecular Genetics and Biotechnology, Yuriy Fedkovych

Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine

*E-mail: r.volkov@chnu.edu.ua

CONSERVED SEQUENCE ELEMENTS IN THE IGS 5S rDNA OF ANGIOSPERMS

Tandemly arranged repetitive regions (repeats) that encode 5S rRNA (5S rDNA) are an obligatory component of eukaryotic genomes. It is widely accepted that 5S rDNA repeats within a genome are very similar due to the mechanisms of concerted evolution. Each 5S rDNA repeat consists of a conserved coding sequence (CDS) and a rapidly evolving intergenic spacer (IGS). The high evolutionary stability of the CDS is the result of purifying selection to maintain the function of the 5S rRNA as a component of the ribosome. In contrast, it is thought that the main part of the IGS probably has no function and therefore evolves at a high rate.

In this work, we aim to uncover the patterns of IGS evolution in a broad taxonomic context. We applied cloning, Sanger sequencing, and bioinformatic analysis of whole-genome Illumina sequencing data to describe the molecular organization of 5S rDNA in 31 genera representing 15 families and 12 orders of angiosperms.

It was shown that the short sequence motifs at the 5' and 3' ends of the IGS, which are involved in the initiation and termination of 5S rDNA transcription, evolve relatively slowly and are obviously conserved within a genus/family. Unexpectedly, our analysis also detected conserved sequence elements (CSEs) with a length of 50 to 200 bp in the middle part of the IGS in representatives of eight eudicot genera. These CSEs show significant similarity (70 to 91%) to genomic sequences from taxonomically distant families. For instance, CSEs from the 5S rDNA IGS of *Lens*

spp. (Fabaceae) were found in the genomes of members of the families Malvaceae, Oleaceae and Salicaceae. Similarly, CSEs in the IGS of *Aconitum*, *Delphinium* and *Anemone* species (Ranunculaceae) matched sequences in the genomes of Oleaceae and Amaryllidaceae. Notably, sequence similarities to CSEs were found only in the 5S rDNA IGS of some *Allium* (Amaryllidaceae) species. Finally, CSEs from the IGS of *Lycium*, *Nicotiana* and *Petunia* (Solanaceae) showed similarity to genomic sequences of Fagaceae, Linaceae, and Malvaceae.

We suggest that the presence of similar sequence elements in the genomes of distantly related taxa may be due to putative horizontal DNA transfer. Alternatively, the CSEs could represent ancient sequences conserved in certain phylogenetic lineages. The function of the CSEs and the mechanisms responsible for their maintenance during long-term evolution remain enigmatic and require further investigation.

UDC 606:632]:633.16

**Satpathy P., Mirzakhmedov M., Büchner H., Chamas S., Hoffie I.,
Daghma D. S., Kumlehn J.***

Leibniz Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research (IPK) Gatersleben,
Seeland, Germany

*E-mail: kumlehn@ipk-gatersleben.de

GENERATION OF HAPLOIDY INDUCERS IN BARLEY BY CAS9-MEDIATED KNOCKOUT OF *PHOSPHOLIPASE A1*

The use of doubled haploid (DH) lines is one of the most effective biotechnological measures in modern plant breeding. Individual DH lines are genetically unique results of meiotic recombination, while they are possessing the important characteristic of being entirely true-breeding. This means that once a useful DH line is selected, it can be identically reproduced through selfing. In barley, DH lines can be efficiently obtained via microspore-derived plant regeneration. However, this principle is genotype-dependent to some extent. An alternative means to produce DH lines is to employ haploidy-inducing lines as paternal parents (Satpathy *et al.* 2021). Among the progeny resulting from such crosses, maternal haploids can be found that have lost the paternal genome during early embryogenesis. The phenomenon of uniparental genome elimination was reported to occur in mutants including those for *Centromeric histone 3 (CenH3)*, *Phospholipase (PLA1, PLD3)* as well as *DUF 679 membrane protein (DMP)* genes of various species (Liu *et al.* 2017). Primary barley mutants carrying Cas9-triggered mutations in *PLA1* produced about 6% haploid progeny upon pollination of wild-type plants. The haploidy-inducing capacity of homozygous *pla1* M2 mutants was then validated by pollination of various barley accessions, which resulted in haploid formation from 6% to 16%. In

a further approach, we are employing *cas9*/gRNA-transgenic *plal* mutant barley to deliver these transgenes and their respective products from sperm cells to zygotes via fertilization. Any maternal parents of choice may thus be subjected to genome editing, while the transgene-carrying paternal genome is expected to getting lost in some cases during embryo formation (Budhagatapalli *et al.* 2020). This concept holds great promise for barley genome editing with considerably reduced genotype dependency.

Acknowledgments

We thank Sabine Sommerfeld, Nicole Schäfer, Carola Bollmann and Ingrid Otto for excellent technical support, also the team of Enk Geyer for taking care on the plants in the glasshouse. This work was partially funded by the German Federal Ministry of Education and Research (DELITE project, FKZ 031B0550).

References

1. Budhagatapalli, N., Halbach, T., Hiekel, S., Büchner, H., Müller, A., Kumlehn, J. (2020). Site-directed mutagenesis in bread and durum wheat via pollination by *cas9*/guide RNA-transgenic maize used as haploidy inducer. *Plant Biotechnol.* 18, 2376-2378. <https://dx.doi.org/10.1111/pbi.13415>
2. Liu, C., Li, X., Meng, D., Zhong, Y., Chen, C., Dong, X., Xu, X., Chen, B., Li W., Li, L., Tian, X., Zhao, H., Song, W., Luo, H., Zhang, Q., Lai, J., Jin, W., Yan, J., Chen, S. (2017). A 4-bp Insertion at *ZmPLA1* Encoding a Putative Phospholipase A Generates Haploid Induction in Maize. *Mol Plant.* 10(3):520-522. doi: 10.1016/j.molp.2017.01.011
3. Satpathy, P., Audije de la Fuente, S., Ott, V., Müller, A., Büchner, H., Daghma, D. E. S., Kumlehn, J. (2021). Generation of Doubled Haploid Barley by Interspecific Pollination with *Hordeum bulbosum*. In: Segui-Simarro, J.M. (eds) *Doubled Haploid Technology. Methods in Molecular Biology*, 2287. Humana, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1315-3_10

UDC 575.17:575.113.2:633.34

Popovych Yu. A.¹, Blagodarova O. M.^{1,2}, Shkolina K. S.¹, Chebotar S. V.^{1,2,*}

¹Odesa I. I. Mechnikov National University, Odesa, Ukraine

² Plant Breeding and Genetics Institute – National Center of Seed and Cultivar Investigation, Odesa, Ukraine

* e-mail: s.v.chebotar@onu.edu.ua

APPLICATION OF NEW MOLECULAR MARKERS FOR DETECTING OF GLIADIN LOCI POLIMORPHISM OF *TRITICUM DURUM* DESF.

Durum wheat is an important raw material in the food processing industry and the main ingredient in the production of pasta. It is mainly grown in the Mediterranean basin (Italy, Turkey, Algeria and Spain, providing 50% of the world's production).

Usually durum wheat cultivars with extraordinary frost tolerance have unsatisfactory yield and quality. Breeding winter –type cultivars of durum wheat with

frost tolerance and quality on a level of classical quality spring durum varieties and yield is challenging, but not impossible. Flour breadmaking/ pastamaking quality is determined by properties of gluten complex consisting of monomeric gliadins and polymeric glutenins proteins.

Gliadins and glutenins demonstrate high polymorphism and are very important for selection durum wheat especially of winter type cultivars selection, growing in Ukraine. Due to the complexity identification allelic variants of gliadins in durum wheat there is a need for DNA-markers. Therefore, the aim of study was to analyze polymorphism of *Gli-A1* and *Gli-B1* loci of modern Ukrainian winter durum wheat cultivars using a DNA-marker system developed on common wheat.

Eighteen durum wheat cultivars developed by Plant Breeding and Genetics Institute – National Center of Seed and Cultivar Investigations were analyzed by PCR with allele-specific primers to *Gli-A1* and *Gli-B1* loci, developed by Zhang et al (2003). Gliadin protein specters characteristics were revealed by storage proteins electrophoresis in acid PAGE method. Bioinformatic analysis and PCR *in silico* were used for analyzing possibility of applying of primers developed for bread wheat for durum wheat.

By using PCR with allele-specific primers to *Gli-A1* locus *Gli-A1.2* allele was detected in all cultivars studied. For six cultivars two alleles *Gli-A1.1* and *Gli-A1.2* alleles revealed in each grain analyzed. We assume these cultivars could have two copies of amplified in PCR sequence, that was shown by bioinformatic analysis.

Using PCR with allele-specific primers to *Gli-B1* locus developed by Zhang, we revealed two different by length amplification fragments of *Gli-B1.1* allele: 376 bp and 379 bp. Also five different by length amplification fragments were detected for *Gli-B1.2* allele: 397 bp, 400 bp, 403 bp, 409 bp, 424 bp.

DNA-marker system for gliadins developed on common wheat (Popovych et al., 2020) is applicable for durum wheat. Most alleles detected in the study are common for *T. durum* and *T. aestivum* species. Allele frequencies revealed for durum wheat significantly differ from allele frequencies of bread wheat collections studied before.

References

1. Zhang, H., Gianibelli, M., Rampling, M. L., Gale, K. R. (2003). Identification of SNPs and development of allele-specific PCR markers for γ -gliadin alleles in *Triticum aestivum*. *Theoretical and Applied Genetics*, 107, pp 130-138.
2. Popovych, Yu., Chebotar, S., Melnik, V., Rodriguez-Quijano, M., Pascual, L., Rogers, W. J., Metakovsky, E. (2020). Congruity of the polymorphisms in the expressed and noncoding parts of the *Gli-B1* locus in common wheat. *Agronomy*, 10, P. 1510.

UDC 606:631.528:004

Chebotar G.*, Kotni P., Oppermann M.

Leibniz Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Gatersleben,
Seeland, Germany

* E-mail: chebotar@IPK-gatersleben.de

ENSURING DATA ACCESSIBILITY AND REUSABILITY: THE FAIR APPROACH TO RESEARCH DATA MANAGEMENT

The application of multi-omics approaches for crop investigations presents researchers with challenges related to the storage and integration of the obtained data. Over the last few decades, the amount of data generated through various international and collaborative projects has risen dramatically, and this trend is expected to continue in the future. Therefore, clear strategies for data management and reusability are essential. Data may be consistent with FAIR principles: Findable, Accessible, Interoperable and Reusable, but still may be as open as possible and as closed as necessary. Effective research data management strategies include the publication of data in repositories with persistent identifiers, regular backups, detailed descriptions of data formats, and comprehensive metadata documentation.

An example of open science, open innovation and open to the world project handling large volumes of data is the INCREASE project, funded by Horizon 2020. This six-year initiative involves 26 partners from 13 countries, focusing on the food legumes common bean, chickpea, lentil, and lupin (<https://www.pulsesincrease.eu/about>). The project aims to develop efficient conservation tools to enhance agricultural biodiversity in Europe. From a data curation perspective, the goal is to ensure meaningful and enduring access to the generated data.

For approximately 18,000 accessions, single seed descendant lines, around 13,000 persistent identifiers have been created (e.g. <https://doi.org/10.18730/13M-RAB>), making the data findable and accessible online. Standardized templates have been developed for about 50 traits across four crops to gather data from 80 experiments, each with three repetitions. Data quality is evaluated based on metrics such as correctness, completeness, fitness for use, and alignment with project objectives. Passport data provided by project partners are standardized to MCPD (FAO/Bioversity Multi-Crop Passport Descriptors V.2.1 [MCPD V.2.1] <https://www.fao.org/plant-treaty/tools/toolbox-for-sustainable-use/details/en/c/1367915>) and matched with EURISCO and GENESYS. For phenotypic data an ISA-TAB like (<https://www.nature.com/documents/scidata-isatab-specification.pdf>) format is applied. Further data base implementation and web portal development are expected. Information from genotyping and metabolomic experiments and results of data analysis will be published in open repositories, e.g. Zenodo, e!DAL, ENA.

In addition to laboratory research, the project includes a Citizen Science Experiment, allowing volunteers to participate in decentralized seed conservation and agro-biodiversity preservation. Data collected through the Citizen Science App are also integrated into the project's database.

UDC 575+579

Yushchuk O.^{1,2*}, Barkhatova A.¹, Chyzh A.¹, Mast Y.³, Marinelli F.², Fedorenko V.¹

¹ Department of Genetics and Biotechnology, Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine

² Department of Biotechnology and Life Sciences, University of Insubria, Varese, Italy

³ Department Bioresources for Bioeconomy and Health Research, Leibniz Institute DSMZ -German Collection of Microorganisms and Cell Cultures, Braunschweig, Germany

* E-mail: oleksandr.yushchuk.lnu@gmail.com

DEVELOPING A GENETIC TOOLKIT TO MANIPULATE THE RARE ACTINOBACTERIUM *UMEZAWAEA ENDOPHYTICA* DSM 103496

Mycelial actinobacteria – colloquially known as actinomycetes – are soil-dwelling Gram-positive bacteria with a high genomic GC content. Several features of actinomycetes attract scientific attention, both in fundamental and applied contexts. Fundamentally, these organisms are studied as models of bacterial multicellularity due to their complex life cycles involving cellular differentiation. On the applied side, actinomycetes are of interest for their production of various specialized metabolites, including antibiotics, and biotechnologically relevant enzymes. Historically, members of the genus *Streptomyces* have been the most extensively studied actinomycetes, providing the majority of antibiotics of microbial origin. However, members of other genera (often referred to as non-*Streptomyces* actinobacteria or non-common actinomycetes) are equally interesting and prolific sources of specialized metabolites, despite being much more challenging to cultivate, handle, or manipulate genetically.

In our previous research aimed at discovering novel glycopeptide antibiotics (GPAs – a valuable group of compounds that inhibit Gram-positive cell wall biosynthesis by binding to lipid II), we identified a biosynthetic gene cluster (BGC) for a putative new GPA in the genome of the non-common actinomycete *Umezawaea endophytica* DSM 103496 (family *Pseudonocardiaceae*). With the ultimate goal of identifying the production of this novel GPA, we first decided to thoroughly investigate the growth properties of the strain and develop a toolkit for genetic manipulations with DSM 103496.

When the growth and morphology of DSM 103496 were studied on various agar media, we discovered that the culture actually consisted of two distinct morphological types. The first, named Bht (from “barchent,” due to its velvety surface), exhibited typical *Pseudonocardiaceae* morphology, including the development of aerial mycelium that differentiated into spores, as evident from scanning electron

microscopy (SEM) imaging. The second type, named Lth (from “leathery,” due to its smooth surface), did not form aerial mycelium or spores. SEM imaging revealed that the Lth type had a smooth surface composed of vegetative hyphae with short, spike-like, presumably hyphal structures that did not resemble aerial hyphae. These hyphal structures were easily fragmented and dissociated when the lawn surfaces were washed with water.

After analyzing several thousand clones of Bht and Lth, no transitions between the two morphological types were observed, confirming the stability of these forms. Notably, co-cultivation of Lth and Bht induced the formation of typical aerial hyphae in Bht, suggesting that Bht is unable to produce some small-molecule messenger required for proper differentiation (similar to the A-factor of *Streptomyces* spp.).

Next, we tested whether hyphal fragments (Lth) and spores (Bht) could serve as recipients in intergeneric conjugation with *Escherichia coli* donor strains carrying various integrative and replicative plasmids. We found that ϕ C31-, ϕ BT1-, and VWB-actinophage-based plasmids, as well as a pSG5-replicon-based replicative plasmid, could be successfully transferred using hyphal fragments of Lth. However, none of these plasmids could be transferred when spores of Bht were used as recipients.

Overall, the obtained results highlight DSM 103496 as a peculiar example of a non-common actinomycete. We plan to sequence the genomes of both Bht and Lth to identify genetic differences underlying their distinct morphologies and further optimize conjugation protocols for both forms. These findings represent an initial step toward investigating GPA production in DSM 103496.

UDC 575+579

Melnyk S.^{1,2,*}, Stierhof M.³, Bratiichuk D.³, Rebets Yu.², Luzhetskyy A.³, Ostash B.¹

¹ Department of Genetics and Biotechnology, Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine

² Explogen LLC, , Lviv, Ukraine

³ Department of Pharmaceutical Biology, Saarland University, Saarbrücken, Germany

* E-mail: sofiamelnyk@gmail.com

EXPLORING THE GENOMIC POTENTIAL OF *STREPTOMYCES ROSEOCHROMOGENES* NRRL 3504 FOR SPECIALIZED METABOLITE PRODUCTION

The current crisis of antibiotic therapy in Ukraine and the world forces us to look for new approaches to discovering antibiotic compounds. The explosion of bacterial genome data has led to the discovery of myriads of specialized metabolite biosynthetic gene clusters (BGCs) of unknown chemical identity. Developing reliable methods to access the chemical diversity hidden in these predominantly “silent” BGCs will help

discover new biologically active compounds. Here, we report the use of a complex approach combining detailed bioinformatic analysis of the genome of soil bacteria *Streptomyces roseochromogenes* NRRL 3504 with further expression of identified BGCs in suitable host strains.

NRRL 3504 was first described in 1970s as a producer of gyrase inhibitor clo-robiocin and no other specialized metabolites are known to be produced by this strain till this report. We conducted thorough bioinformatic analysis of NRRL 3504 genome to predict chemical identity of small molecules this strain could produce and genetic mechanisms that may limit their production. As a result we managed to express in the heterologous hosts *S. albus* Del14 and *S. lividans* Δ YA9 several BGCs putatively involved in biosynthesis of anti-inflammatory antibiotic colabomycin E, antitumor agent trioxacarcin A and cancer cells inhibitor ulleungdin. In-depth analysis of colabomycin-like BGC (hereafter labeled as *lim*) revealed that the latter in fact directs the production of unusual polyketide limocrocin (LIM) known for its antiviral activities. Bioinformatic analysis of *lim* BGC as well as *lim* gene knockouts led to the initial hypothesis about biosynthetic pathway leading to LIM that remained hidden for the last 70 years.

UDC 575+579

Tseduliak V.-M.^{1*}, Koshla O.¹, Ostash B.¹, Luzhetskyy A.², Matsumoto S.³, Ohtsubo Y.³, Nagata Y.³

¹ Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine

² Saarland University, Saarbrücken, Germany

³ Tohoku University, Miyagi Prefecture, Sendai, Japan

* E-mail: marta13mermaid@gmail.com

EFFECTS OF MUTATED RIBOSOMAL PROTEIN S12 ON *STREPTOMYCES ALBIDOFLAVUS* J1074

The discovery of spontaneous streptomycin-resistance mutations in ribosomal protein S12 gene (*rpsL*) that influence translational speed and accuracy has revealed that the ribosome is more than a just passive platform for protein biosynthesis. Some *rpsL* mutations induce mistranslation, while others promote slow and hyperaccurate protein synthesis. Beyond their direct impact on translation, *rpsL* mutations exert pleiotropic effects on important antibiotic-producing *Streptomyces* bacteria, including upregulation of specialized metabolites production, aberrant protein biosynthesis, and increased expression of ribosome recycling factor.

Previous studies of *rpsL* mutations were performed on spontaneous mutants carrying additional changes in their genomes. In contrast, our study focuses on genetically engineered *S. albidoflavus* mutants K88R, K88E, and R94G which provide valuable insights into *rpsL*-mediated effects due to their ‘clean’ genetic background.

These three strains, differing only in one amino acid residue within S12 protein, exhibit altered morphology features: the wild-type strain SAM2 and R94G show unchanged appearance, while K88E and K88R have a reduced number of sporulating hyphae. Ribosomal protein S12 mutations did not adversely affect total protein content or colony-forming unit counts under the conditions tested, but mutants' dry biomass weight was significantly decreased compared to the wild-type strain. Moreover, the level of c-di-GMP, a second messenger regulating morphological development and antibiotic biosynthesis, was affected in the mutants, particularly in K88R, which was extremely difficult to generate. The highest antibiotic production levels were observed for K88E and R94G strains exhibiting moderately decreased c-di-GMP levels.

To conclude, our data suggest that certain *rpsL* mutations affect c-di-GMP levels, through as-yet unknown mechanism. A better understanding of this phenomenon can shed light on the antibiotic overproduction phenotype commonly associated with *rpsL* mutations. This will guide rational ways of *Streptomyces* strain improvement, urgently needed in times rising of antimicrobial resistance .

UDK 579.873.8

Roman I.¹, Fedorenko V.¹, Gromyko O.^{2*}

¹ Department of Genetics and Biotechnology, Faculty of Biology, Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine

² Microbial Culture Collection of Antibiotic Producers, Faculty of Biology, Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine

* E-mail: smu62@ukr.net

THE IMPACT OF BIOINFORMATICS TOOLS IN THE CLASSIFICATION OF PROKARYOTES, THE CASE OF THE GENUS *ACTINOPLANES*

During the Antarctic rhizosphere actinobiome research, about 100 isolates were isolated. Based on the results of 16S rRNA gene sequencing, members of nine genera were identified, including four isolates from the genus *Actinoplanes*. Since the members of the genus *Actinoplanes* were isolated from Galindez Island for the first time, we decided to perform a detailed phylogenetic analysis of these isolates. The 16S rRNA gene sequences of 57 validly published species of the genus *Actinoplanes* were selected for this work, with *Pseudosporangium* as an outgroup. However, during the phylogenetic analysis, *Pseudosporangium* was grouped with certain species of the genus *Actinoplanes* and formed a separate clade. Therefore, it was decided to perform a phylogenetic analysis of the entire *Micromonosporaceae* family to better calibrate the phylogenetic tree. However, the obtained results were a bit unexpected; the genus *Actinoplanes* was not only grouped with other genera (*Pseudosporangium*,

Couchioplanes, *Mangrovihabitans*, *Nucisporomicrobium* and *Jidongwangia*), but also formed three almost independent clades. Thus, two hypotheses emerged: 1) the genera *Pseudosporangium*, *Couchioplanes*, *Nucisporomicrobium* and *Jidongwangia* are described incorrectly and should actually belong to the genus *Actinoplanes*; 2) the genus *Actinoplanes* is actually heterogeneous and includes several separate genera that are mistakenly included in *Actinoplanes*. For further work, we divided the genus *Actinoplanes* into 4 clades and studied their properties independently. After performing the ANI analysis, we were able to establish that the members of each studied clade have high similarity within the clade, but outside of it, the similarity drops rapidly and does not significantly differ from the similarity to the members of other genera. In addition, the ANI also allowed us to divide one of clades into two subclades, as their representatives were highly diverse. The results were also confirmed by AAI analysis. As a result, four new genera were described: *Paractinoplanes*, *Winogradskya*, *Symbioplanes* and *Amorphoplanes*.

UDC 575.113:582.3/.99

Zharikova D.^{1,2}, Sawers R.³, Barnes C.J.^{1,2*}

¹Department of Agroecology, Aarhus University, Slagelse, Denmark

²The Globe Institute, Faculty of Health, University of Copenhagen, Denmark

³Department of Plant Science, The Pennsylvania State University, USA

*E-mail: c.barnes@agro.au.dk

THE UNEXPLORED RELATIONSHIP BETWEEN THE EPIGENOME AND THE ROOT MICROBIOME

The relationship between the microbiome and the plant is a complex and dynamic one, with bidirectional interactions that can have significant impacts on the plant's fitness [1, 2]. Mechanisms involved in microbiome regulation through genetic factors of the host plant and the properties of the plant microbiome are well documented [3, 4]. However, the plant genome is vital but may not fully explain plant functions due to environmental influences [5]. In response to the external stresses epigenetic changes can impact gene expression without altering the DNA sequence, via DNA methylation, histone modifications, and small RNA-mediated gene silencing. Aimed to afford a more comprehensive understanding of how the plant responds to environmental cues and how it shapes the composition and activity of its associated microbiome, along with host genome here we propose to contemplate epigenome influence.

Here, performing two experiments in greenhouses, we focused on the influence of the plant epigenome on the root microbiome. Experiment 1 showed that a mutation affecting the epigenome led to changes in the root microbiome, potentially due to alterations in root morphology and exudates. Experiment 2 demonstrated differences in the root microbiome of plants from parents exposed to phosphorus stress,

attributing this variation mainly to inherited epigenetic differences rather than seed endophytes. While epigenome effects were inconsistent in phosphorus samples and absent in nitrogen samples, genomic variation greatly affects the epigenome-microbiome relationship. The findings suggest that variations in the epigenome can have significant effects in real-world scenarios beyond controlled environments. This highlights the need for further research with replicates and clonal plant populations to better understand the complex relationship between the epigenome and the root microbiome.

References

1. Gupta, R., Anand, G., Gaur, R., & Yadav, D. (2021). Plant-microbiome interactions for sustainable agriculture: a review. *Physiol. Mol. Biol. Plants*. 27(1). 165-179. doi: 10.1007/s12298-021-00927-1.
2. Sasse, J., Martinoia, E. & Northen, T. (2018). Feed Your Friends: Do Plant Exudates Shape the Root Microbiome? *Trends Plant Sci*. 23(1). 25-41. doi: 10.1016/j.tplants.2017.09.003.
3. Santoyo G. (2022). How plants recruit their microbiome? New insights into beneficial interactions. *J Adv Res*. 40:45-58. doi: 10.1016/j.jare.2021.11.020.
4. Zhang, J., Liu, W., Bu, J., Lin, Ya. & Bai, Ya. (2023). Host genetics regulate the plant microbiome. *Cur. Op. Microbiol*. 72 102268. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2023.102268>.
5. Zimmermann, S. D. & Gaillard, I. (2023). Epigenetic control is involved in molecular dialogue in plant-microbe symbiosis. *New Phytol*, 238: 2259-2260. <https://doi.org/10.1111/nph.18916>

UDC 575.111:616-006.6

Snape K.^{1,2}

¹South West Thames Centre for Genomics, St George's University Hospitals NHS Foundation Trust, London, UK

²St George's University of London, UK

E-mail: Katie.Snape@stgeorges.nhs.uk

CANCER GENOMICS: CLINICAL INTERROGATION OF THE TWO GENOMES OF CANCER PATIENTS

Cancer patients have two clinically relevant genomes. Firstly, the somatic (acquired) cancer genome which contains genomic variation leading to oncogenesis. This cancer genome can be interrogated for prognostic, diagnostic or therapeutic information to guide cancer management. Secondly, the constitutional (germline) genome. This contains heritable genomic variation which can increase the likelihood of a person developing cancer and can be utilised to identify patients at increased risk of cancer who might benefit from additional screening, prevention or early detection interventions.

In the UK, paired whole genome sequencing in cancer patients took place initially through the 100,000 Genomes research study and is now embedded within the National Health Service (NHS), alongside large cancer gene panel next generation sequencing as part of the routine care of cancer patients.

In this lecture, I will give an overview of the clinically relevant genomic variation which can be identified through analysis of these two genomes in cancer patients, using case exemplars to demonstrate important principles and how our ability to generate large scale genomic data is transforming the care of cancer patients in clinical practice.

UDC 577.213/.216:577.113

Sydor R., Senchenko N., Shenderovska N., Heichenko M., Starenka I., Savinova I., Semeniuk D., Hrubiiian N., Vietrov R., Novosolov S., Panashchuk S., Olkhovska A., Trokoz M., Hubar O.*

¹ Yuria-Pharm LLC, Kyiv, Ukraine

* E-mail; oleksandr.hubar@uf.ua

MULTIFACTORIAL ENGINEERING OF CAP-LESS MRNAS FOR ENHANCED IN VITRO POTENCIES

Cap-less mRNAs represent an emerging platform for therapeutic nucleic acids developed by Yuria-Pharm LLC, seeking to address key limitations of traditional cap-dependent mRNA manufacturing, such as high reagent costs, complex purification steps, and suboptimal product yields. These novel mRNAs incorporate engineered group I-like lariat-capping ribozymes (LCRs) to generate a stable 5'-cap structure and employ an internal ribosome entry site (IRES) for cap-independent translation initiation.

In this study our primary goals were: (I) to identify LCR variants with increased 5'-end capping efficiency and downstream protein expression, and (II) to identify 3'UTR elements that enhance transcript stability in cells. A panel of natural LCR orthologs from protists [1,2], as well as site-directed mutants of the *Didymium iridis* LCR, was generated and tested *in vitro*. We identified variants exhibiting up to a three-fold increase in processing rates and improved capping efficacy (from 45% to 93%), highlighting the importance of rapid lariat product release after the transesterification step. When incorporated into synthetic mRNAs carrying an IRES, these optimized LCRs produced a four-fold increase in luciferase output relative to the IRES-only control, while reaching up to 20% of reporter accumulation, driven by ARCA-capped benchmarks. LCR performance differed significantly depending on the IRES sequence context, underscoring mutual dependence on the sequence/folding context for both elements.

To further improve mRNA stability, we performed functional screening of a 3'UTR library[3] derived from a pool of long-lived transcripts isolated from CHO DG44 cells after prolonged cell culture incubation with Actinomycin D. By subjecting this library to iterative selection (six rounds of transfection, extended

incubation, re-cloning and mRNA library re-synthesis), we identified 194 candidate 3'UTR features showing significant enrichment, with 89 variants displaying over ten-fold enrichment relative to the initial library. Over-representation analysis of enriched features demonstrated enrichment of multiple GO terms including positive regulators of transcription, transcripts associated with rRNA metabolic processes and regulators of translation, typically associated with processes, demanding for long-lived transcripts. 26 putative 3'UTRs were selected for further validation in reporter assays.

Our work demonstrates that rational engineering of LCR in tandem with careful selection of 3'UTRs can substantially improve both capping efficiency and functional stability of cap-less mRNAs, accelerating the clinical translation of cap-less mRNA therapeutics.

References

1. Krogh, N., Pietschmann, M., Schmid, M. et al. (2017). Lariat capping as a tool to manipulate the 5' end of individual yeast mRNA species *in vivo*. *RNA*. 23. 683-695. doi: 10.1261/rna.059337.116
2. Tang, Y., Nielsen, H., Masquida B. et al. (2014). Molecular characterization of a new member of the lariat capping twin-ribozyme introns. *Mobile DNA*. 5. 25. doi: 10.1186/1759-8753-5-25.
3. Orlandini von Niessen, A. G., Poleganov, M. A., Rechner C. et al. (2019). Improving mRNA-based therapeutic gene delivery by expression-augmenting 3' UTRs identified by cellular library screening. *Molecular Therapy*. 27. 824–836. doi: 10.1016/j.ymthe.2018.12.011.

UDC 616-006.04

Monczak Yu.

McGill University Health Center, Montreal, Canada

E-mail: yury.monczak@mcgill.ca

MEASURABLE RESIDUAL DISEASE (MRD) IN LYMPHOID MALIGNANCIES: THE HAYSTACK, THE NEEDLE, AND HOW TO FIND IT

Most B- and T-cell lymphoid malignancies develop from a single cell by acquiring a set of mutations in various genes, each providing a specific growth advantage to that transformed cell. Since the immunoglobulin heavy (IGH) chain genes rearrange very early in lymphoid cell differentiation, most clonal populations of lymphocytes will carry the exact same gene rearrangement as in the original malignant cell. Moreover, the IGH gene rearrangements are very stable throughout clonal expansion, hence they can be used as clonal identity markers. Molecular detection of lymphoid malignancies (B- or T-cell) has quickly become the gold-standard in diagnosis, and regular end-point PCR technology using the BIOMED-2 protocol has been the “gold standard” for over twenty years [1]. It relies on the identification of the specific

IGH gene rearrangement common to the clonal population of cells. More recently, next-generation sequencing (NGS) has established itself as the method of choice for detection of lymphoid clonality, providing higher sensitivity and specificity, and allowing additional downstream evaluation of disease treatment and response [2].

One such evaluation is the detection of the “tumor burden” in the patient following treatment, referred to as Measurable Residual Disease (MRD) [3]. Recent studies suggest that patient progression-free survival can be predicted depending on the number of remaining tumor cells, usually measured by the number of circulating clonal cells divided by the number of polyclonal (normal) cells in a patient’s blood sample [4]. The target value is at least $1:10^4$, and prognosis improves if the MRD value reaches $1:10^5$ or even $1:10^6$ [5]. Although flow-cytometry provides reliable MRD analysis at least up to $1:10^4$, NGS technology allows us to rapidly determine the exact sequence of the clonal IGH gene rearrangement in the malignant cell population at diagnosis, and then use this sequence to calculate the number of times it is found in a pool of the patient’s cells post-therapy, with MRD values up to $1:10^6$. The cornerstone of this methodology is the quantity of lymphocytes that must be sequenced in order to provide the necessary “depth of sensitivity”. In order to achieve a sensitivity of $1:10^4$, a total of 200ng of DNA must be sequenced, which translates to 30,000 cells. If one is to achieve a sensitivity of $1:10^6$, then over 3 million cells need to be sequenced, which poses a challenge for sample sizes and method costs. Here we describe our attempts to achieve such high levels of sensitivity.

References

1. Van Dongen, J. J. M., Langerak, A. W., et al. (2003). Design and standardization of PCR primers and protocols for detection of clonal immunoglobulin and T-cell receptor gene recombinations in suspect lymphoproliferations: report of the BIOMED-2 Concerted Action BMH4-CT98-3936. *Leukemia*. 17. 2257-2317.
2. Arcila, M. E., Yu, W. et al. (2019). Establishment of Immunoglobulin Heavy (IGH) Chain Clonality Testing by Next-Generation Sequencing for Routine Characterization of B-Cell and Plasma Cell Neoplasms. *Journal of Molecular Diagnostics*. 21. 330-342.
3. Jones, C. F., Wieffer, H. M. & Oudard, M. (2017). The application of minimal residual disease in hemato-oncology: a review of its current utility in trials, regulatory decisions and clinical practice. *Blood*. 130(suppl. 1). 5630.
4. Brüggemann, M. & Kotrova, M. (2017). Minimal residual disease in adult ALL: technical aspects and implications for correct clinical interpretation. *Blood Adv*. 28. 1(25). 2456-2466.
5. Liu, Y., Caleb, H. et al. (2024). Quantification of Measurable Residual Disease Detection by Next-Generation Sequencing-Based Clonality Testing in B-Cell and Plasma Cell Neoplasms. *Journal of Molecular Diagnostics*. 26. 168-178.

UDC 575.113

Li X.^{1,2}¹Department of Crop and Soil Sciences, Washington State University, Pullman, WA, USA²USDA-ARS, Wheat Health, Genetics, and Quality Research Unit, Pullman
E-mail: Xianran.li@usda.gov**GRAPHING LARGE INDEL-BASES HAPLOTYPES FROM PAN-GENOME FACILITATES GENE DISCOVERY**

Large insertion and deletion (indel) polymorphisms contribute significantly to phenotypic variations through altering gene structure or expression. Although pan-genome assemblies are available from major crops, identifying and graphing large indels across assemblies for specific genes are challenging and painstaking tasks.

To overcome the challenge, we devised two unsupervised learning algorithms, CHOICE (Clustering HSPs for Ortholog Identification via Coordinates and Equivalence) and CLIPS (Clustering via Large-Indel Permuted Slopes). CHOICE automatically retrieves the segments harbouring the ortholog from each assembly for the desired All-vs-All comparison while CLIPS groups accessions sharing same indels into haplotypes for concisely haplotype graphing.

We then constructed an interactive webapp BRIDGEcereal (<https://bridgecereal.scinet.usda.gov/>) to expedite this process. Over hundred assemblies from 5 major cereal crops (Wheat, Barley, maize, rice, and sorghum), were compiled. The only required input is a gene model ID or a transcript sequence. Two adjustable parameters, up- and down-stream search boundaries, enable to survey the unknown sizes and locations for indels outside of the gene body. We demonstrated that mining pan-genome through BRIDGEcereal could accelerate gene discovery and characterization with multiple wheat genes underlying QTL/GWAS intervals.

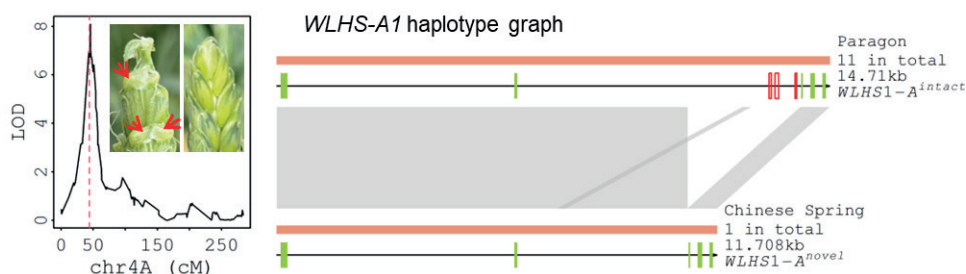


Fig. 1. The haplotype graph generated by BRIDGEcereal suggests *WLHS-A1*, a MADS-box gene segregating a 3-kb indel containing 3 exons (open red boxes), is a promising candidate for the classic Hooded QTL.

The gene underlying the *BI* locus controlling awn presence/absence had been identified as a novel transcription factor while the functional site remains unknown. BRIDGEcereal identified large deletions of 17-kb in the *BI* upstream contributing to two haplotypes as potential casual polymorphisms. *Hooded* is another QTL controlling awn presence/absence, but the underlying gene had not been identified. Results from BRIDGEcereal suggested that *WLHS-A1* harbouring a 3-kb deletion removing 3-exons as a promising gene. The versatile design enables to seamlessly incorporate newly released assemblies.

Acknowledgments

USDA-ARS In-House Project (2090-21000-033-00D), PDI, SciNet, and Iowa State University Crop Bioengineering Center seed grant.

References

1. Zhang, B. et al. (2023). Streamline unsupervised machine learning to survey and graph indel-based haplotypes from pan-genomes. *Molecular Plant*. 16: 975-8. 10.1016/j.molp.2023.05.005

ІНФОРМАЦІЯ ДЛЯ АВТОРІВ

Під час подання рукопису до журналу автори повинні підтвердити його відповідність всім встановленим вимогам, вказаним нижче. В разі виявлення невідповідності поданої роботи пунктам цих вимог редакція повертатиме авторам матеріали на доопрацювання. Внутрішнє рецензування здійснюється членами редакційної колегії, які мають найбільш близьку до тематики роботи наукову спеціалізацію. Рецензент визначає наукову цінність авторського оригіналу, відповідність матеріалу тематиці журналу.

Зовнішнє рецензування здійснюється висококваліфікованими фахівцями, які мають наукові праці з проблематики статті. Зовнішній рецензент обирається з урахуванням його поточного навантаження та з його згоди.

Рецензування проводиться конфіденційно за принципами подвійного сліпого рецензування, коли ні автор, ні рецензент не знають один про одного.

1. Правила подання рукопису до журналу «Вісник Одеського національного університету. Біологія»

1.1. «Вісник Одеського національного університету. Біологія» здійснює такі публікації:

- Наукові статті, зокрема оглядового характеру.
- Короткі повідомлення.
- Бібліографія.
- Матеріали конференцій.
- Рецензії.
- Матеріали з історії науки та університету.

1.2. У певному випуску один автор має право надрукувати тільки одну самостійну статтю.

1.3. Мови видання – українська, англійська.

1.4. До редакції «Вісника...» подається відредагований і погоджений з редколегією текст статті у форматі *.doc (гарнітура Times New Roman (Сур), кегль 14, відстань між рядками 1,5 інтервали; поля: ліве – 2,5 см, праве – 1,5 см, верхнє – 2 см, нижнє – 2 см), набраний без застосування функції «Розстановка переносів» та два підписаних екземпляри «роздруківки» з неї. Резюме двома мовами (зразок оформлення публікації наведено наприкінці Керівництва). Рекомендація кафедри або наукової установи до друку.

2. Підготовка статті – обов'язкові складові

Оригінальна стаття має включати:

- 2.1. Коротку анотацію мовою оригіналу публікації і ключові слова.
- 2.2. Вступ, у якому обговорюють актуальність проблеми, формулюють мету та основні завдання дослідження.
- 2.3. Матеріали і методи дослідження.

2.4. Результати дослідження та їх обговорення.

2.5. Аналіз результатів (може бути об'єднаний з попереднім пунктом).

2.6. Висновки.

2.7. «Список використаної літератури» – перелік усіх використаних джерел, який наводиться мовою оригіналу (всі джерела подаються тією мовою, якою їх опубліковано, тобто і кирилицею, і латиницею).

2.8. “References” – транслітерований перелік усіх використаних джерел, який наводиться латиницею і повністю дублює «Список використаної літератури»: джерела кирилицею транслітеруються відповідно до правил транслітерації; джерела латиницею дублюються зі «Списку використаної літератури».

2.9. Розширені резюме українською та англійською мовою із зазначенням ключових слів.

3. Оформлення рукопису, обсяг, послідовність та розташування обов'язкових складових статті

3.1. Обсяг рукопису наукової статті (з урахуванням малюнків, таблиць і підписів до них, анотацій, резюме, списку літератури) – 8–15 сторінок друкованого тексту, оглядів – до 20 сторінок, рецензій – до 3 сторінок, коротких повідомлень – до 2 сторінок. Рукописи більшого обсягу приймаються до журналу тільки після попереднього узгодження з редколегією.

3.2. Послідовність друкування окремих складових наукової статті має бути такою:

1. УДК – у лівому верхньому куті першого аркуша.
2. Прізвище та ініціали автора (авторів), а також відповідний вчений ступінь та посада, мовою оригіналу.
3. Ідентифікатор ORCID автора (авторів).
4. Назва наукової установи (зокрема відділу, кафедри, де виконано наукову працю).
5. Повна поштова адреса (за міжнародним стандартом), телефон та електронна адреса (e-mail) для співпраці з авторами.
6. Назва статті. Вона повинна точно відбивати зміст праці, бути короткою (в межах 9 повнозначних слів), містити ключові слова.
7. Анотація мовою оригіналу наводиться як окремий абзац перед початком основного тексту статті з відступом 20 мм від лівого поля і має містити не більше 50 повнозначних слів. Слово «Анотація» (“Abstract”) не наводиться.
8. Під анотацією наводяться ключові слова, кожне з яких відокремлюється комою.
9. Далі йде основний текст статті, що включає основні змістові розділи, «Список використаної літератури» та “References”. Аналіз проблеми має базуватися на сучасній науковій літературі (за останні 10 років).

10. Таблиці та малюнки разом з підписами та необхідними поясненнями до них розміщуються у тексті статті, після першого згадування про них.
 11. На окремому аркуші надаються резюме статті українською та англійською мовами, оформлені таким чином: прізвище та ініціали автора (авторів), назва наукової установи, повна поштова адреса установи, назва статті, слово «Резюме» (“Summary”), текст резюме і ключові слова (відповідно українською та англійською), а також “References”. Резюме має бути зрозумілим без звертання до самої публікації; у резюме має бути зазначена актуальність проблеми, мета, методи дослідження, основні результати дослідження, висновки та конкретні пропозиції автора. Обсяг резюме 250–280 слів.
- 3.3. Стаття має бути підписана автором (авторами).

4. Мовне оформлення тексту: термінологія. Умовні скорочення, посилання, таблиці, схеми, малюнки

4.1 Автори несуть повну відповідальність за бездоганне мовне оформлення тексту, за правильну українську наукову термінологію (її слід звіряти за фаховими термінологічними словниками).

4.2 Латинські біологічні терміни (назви видів, родів) подаються обов’язково латиницею і курсивом. За першого вживання латинської назви у дужках слід обов’язково надати український відповідник назви.

4.3 Якщо автор вважає за потрібне скоротити словосполучення, що часто повторюються у тексті статті, то такі аббревіатури наводять у дужках за першого вживання відповідного словосполучення. Наприклад: Селекційно-генетичний інститут – Національний центр насіннезнавства та сортовивчення (далі СГІ – НЦНС).

4.4 Посилання на літературу надаються у тексті статті, обов’язково у квадратних дужках, цифрами. Цифра в дужках позначає номер праці у «Списку використаної літератури». Назви праць у списку літератури розташовуються у алфавітному порядку і оформлюються за ДСТУ 8302:2015.

4.5 Цифровий матеріал, за можливості, слід зводити у таблиці і не дублювати у тексті. Таблиці мають бути компактними з призначеним порядковим номером; графі, колонки мають бути точно визначеними логічно і графічно. Цифровий матеріал таблиць слід обробити статистично. Матеріал таблиць (як і малюнків) має бути зрозумілим незалежно від тексту статті. За об’єднання декількох рисунків, малюнків або фотографій в один рисунок рекомендується позначати кожен з них прописними літерами знизу. Наприклад:

a

б

Рис. Видове багатство (а) та чисельність (б) трофічних груп в угрупованнях підстилкових нематод лісів МНПП

4.6 Рисунки виконуються із застосуванням відповідного програмного забезпечення та вставляються у текст. Кожна крива на рисунку має бути позначена відповідним номером, зміст кривих пояснюється у підписах під рисунком. На осях абсцис і ординат рисунка зазначається лише величина, що вимірюється, і розмірність в одиницях СІ (% , мм, г і т.п.).

4.7 У розділі «Результати досліджень та їх обговорення» (якщо цей розділ не поєднаний з «Аналізом результатів», див. 2.4) необхідно викласти лише виявлені ефекти без коментарів – всі коментарі та пояснення надаються у розділі «Аналіз результатів». При викладенні результатів слід уникати повторення змісту таблиць та рисунків, і звертати увагу на найважливіші факти та певні закономірності, що з них випливають. Математичні (хімічні) формули виконуються із застосуванням засобів відповідного програмного забезпечення і, за потреби, нумеруються.

4.8 У розділі «Аналіз результатів» необхідно показати причинно-наслідкові зв'язки між встановленими ефектами, порівняти отриману інформацію з даними літератури і наголосити на виявлених нових даних. При аналізі слід посилатися на ілюстративний матеріал статті. Аналіз має закінчуватися відповіддю на питання, які були поставлені у вступі.

4.9 Редколегія має право редагувати текст статей, рисунків та підписів до них, погоджуючи відредагований варіант з автором, а також відхиляти рукописи, якщо вони не відповідають вимогам «Вісника ОНУ. Біологія». За появи сумнівів щодо правомірності використання статистичних методів, з метою допомоги авторам, рецензенти мають право запросити доступ до первинних матеріалів. Рукописи статей, що прийняті до публікування, авторам не повертаються.

5. Вимоги до оформлення «Списку використаної літератури» та «References»

5.1. «Список використаної літератури» наводиться мовою оригіналу джерел. Назви джерел у «Списку використаної літератури» розташовуються за абеткою; бібліографічні описи оформлюються згідно з ДСТУ 8302:2015. За наявності, обов'язково зазначати цифровий ідентифікатор об'єкта (Digital Object Identifier – DOI) для відповідного джерела.

Приклади бібліографічних описів за ДСТУ 8302:2015

Книги, монографії, атласи, словники

Сегре Дж. Звичайні генії: як два диваки творили сучасну науку. Київ : К.І.С., 2017. 392 с.

Vaiserman A. M. *Early Life Origins of Ageing and Longevity*. Springer, Cham, 2019. 310 p.

Lewin's cells / G. Plopper, D. Sharp, E. Sikorski, B. Lewin. 3rd ed. USA : Courier Companies, 2015. 1056 p.

Анатомія пам'яті: атлас схем і рисунків провідних шляхів і структур нервової системи, що беруть участь у процесах пам'яті : посіб. для студентів та лікарів / О. Л. Дроздов, Л. А. Дзяк, В. О. Козлов, В. Д. Маковецький. 2-ге вид, розшир. та допов. Дніпропетровськ : Пороги, 2005. 218 с.

Мікробіологічні дослідження Чорного моря / за ред. д.б.н., проф. Іваниці В.О. Одеса : ОНУ, 2021. 282 с.

Українсько-німецький тематичний словник / [уклад.: Н. Яцко та ін.]. Київ : Карпенко, 2007. 219 с.

Статті у періодичних виданнях

Wolbachia in natural *Drosophila simulans* (Diptera: Drosophilidae) populations in Ukraine / S. Serga et al. *Symbiosis*. 2023. Vol. 89. P. 187–196. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13199-023-00899-8>

Січняк О. Л. Регулярність мейозу в ранніх генераціях гібридів м'якої пшениці зі штучною спельтою. Вісник Одеського національного університету. *Біологія*. 2018. Т. 23, вип. 1(42). С. 23–32. DOI: [https://doi.org/10.18524/2077-1746.2018.1\(42\).129125](https://doi.org/10.18524/2077-1746.2018.1(42).129125)

Levitsky A., Maikova A., Makarenko O. Some indicators in rat blood samples taken from the portal vein and the inferior vena cava after consumption of different edible fats. *Journal of Education, Health and Sport*. 2018. Vol. 8(5). P. 299–308. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1320448>

Збірки конференцій, глави книг, розділи монографій

Zinchenko O. Yu., Shmatkova N. V., Seyfullina I. Y. Evaluation of antiviral activity 4-dimethylaminobenzaldehyde 2-hydroxybenzoyl-, nicotinoyl- and isonicotinoylhydrazones and their chelates with SnCl₄ on "phage-host" model. *Modern aspects of science* : 21th volume of the international collective monograph. Czech Republic : Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o., 2022. P. 62–73.

De Man J. C., Rogosa M., Sharpe M. E. Cell transfer and interferon studies. *Abstracts of the V International symposium of immunopharmacology* (Quebec, 17–21 May 2004). Quebec, 2004. P. 31.

Дисертації, автореферати дисертацій

Бакума А. О. Генетичний поліморфізм по локусам *Ppd* та фотоперіодична чутливість сучасних українських сортів м'якої пшениці : автореф. дис... канд. біол. наук : 03.00.22. Київ, 2021. 24 с.

Чернадчук С. С. Активність протеолітичних ферментів в тканинах тіла матки жінок без новоутворень та з онко-захворюваннями : дис... канд. біол. наук : 03.00.04. Харків, 2006. 189 с.

Депоновані наукові роботи, патенти, авторські свідоцтва

Спосіб фармакологічної корекції закритої черепно-мозкової травми комплексною сполукою на основі германію і діетилентриамінопентаоцтової кислоти з натрієм : пат. 83323 Україна : А61Р 43/00 на корисну модель ; заявл. 03.09.2012 ; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 17. 6 с.

5.2 “References” – це транслітерований латиницею «Список використаної літератури». Назви джерел у “References” розташовуються за абеткою відповідно тому, як вони розміщені у “Списку використаної літератури”; бібліографічні описи оформлюються відповідно до міжнародного стандарту Американської психологічної асоціації (American Psychological Association – APA). За наявності, обов’язково зазначати цифровий ідентифікатор об’єкта (Digital Object Identifier – DOI) для відповідного джерела.

Транслітерація здійснюється відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України № 55 від 27 січня 2010 р. «Про впорядкування транслітерації українського алфавіту латиницею»:

- Стандартна українська транслітерація («паспортна»):
<http://ukrlit.org/transliterations>

Ім'я (ініціали) та прізвище автора (авторів) і назва видавництва транслітеруються (слово «видавництво» не зазначається). Місце видання (місто, країна) перекладається англійською.

Назви періодичних видань наводяться відповідно до офіційного написання латиницею за номером реєстрації ISSN (транслітерована назва або офіційна назва англійською). Під час транслітерації доцільно використовувати офіційні аббревіатури назв періодичних видань відповідно до ISSN (Abbreviated key title).

Вихідні дані для книг, частин/розділів книг, збірок, тез доповідей – місце видання, том, частина, сторінки тощо – наводяться у перекладі англійською (наприклад: Odesa; Vol., Part., pp.). Назва джерела або транслітерується (із обов’язковим зазначенням перекладу англійською у квадратних дужках), або одразу наводиться у перекладі англійською (лише за наявності авторського варіанту назви англійською).

В описах україно- чи російськомовних джерел тип видання (наприклад: монографія, наук.-практ. посіб.) не вказують! Для усіх описів, що їх було транслітеровано з української або російської, обов’язково зазначається мова оригіналу у квадратних дужках (наприклад: [in Ukrainian]). Для джерел іншими мовами (англійською, німецькою, польською тощо) мова оригіналу не зазначається.

Онлайн-керівництво з прикладами опису усіх видів публікацій за стандартом APA можна знайти за таким посиланням:

<https://apastyle.apa.org/style-grammar-guidelines/references/examples>

Приклади бібліографічних описів згідно зі стандартом APA**Книги**

- Jackson, L. M. (2019). *The psychology of prejudice: From attitudes to social action* (2nd ed.). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/0000168-000>
- Sapolsky, R. M. (2017). *Behave: The biology of humans at our best and worst*. Penguin Books. https://www.sackett.net/sapolsky_behave.pdf
- Shnayder, S. A., & Levitskiy, A. P. (2017). *Eksperimentalnaya stomatologiya: Chast 1. Eksperimentalnye modeli stomatologicheskikh zbolevaniy* [Experimental dentistry: Part 1. Experimental models of dental diseases]. Odessa: KP OGT. [in Russian].
- Kucheriavyi, V. P., Dudyn, R. B., Kovalchuk, N. P., & Pylat, O. S. (2004). *Dereva, chaharnyky i liany v landshaftnii arkhitekturi* [Trees, shrubs and vines in landscape architecture]. Lviv: Kvart. [in Ukrainian].
- Andreiuk, K. I., Iutynska, G. O., & Antypchuk, A. F. (2001). *Funktsionuvannia mikrobykh tsenoziv gruntu v umovakh antropohennoho navantazhennia* [The functioning of microbial communities in soil under anthropogenic load]. Kyiv: Naukova dumka. [in Ukrainian].
- Takhtajan, A. (2009). *Flowering Plants*. Berlin: Springer Verlag.

Статті у періодичних виданнях

- Tkachenko, V. O., Sytnik, Yu. M., Solyanik, J. V., Saliy, S. M., & Borbat, M. O. (2008). Suchasnyi stan ikhtiofauny r. Desna v mezhakh Ukrainy [Modern state of ichthyofauna of river Desna in limits of Ukraine]. *Fisheries Science of Ukraine*, (3), 46–52. [in Ukrainian].
- Rodier, F., & Campisi, J. (2011). Four faces of cellular senescence. *J Cell Biol*, 192(4), 547–556. <https://doi.org/10.1083/jcb.201009094>
- Torp K. (2023). Bookshelf: A biomedical database of books and documents. *Medical Reference Services Quarterly*, 42(2), 175–180. <https://doi.org/10.1080/02763869.2023.2194145>

Дисертації, автореферати

- Oliarnyk, O. D. (1998). *Doslidzhennia protsessiv perekysnoho okyslennia lipidiv ta aktyvnosti fermentiv antyoksydantnoho zakhystu pry tsukrovomu diabeti* [The study of lipid peroxidation and activity of antioxidant enzymes in diabetes] [Candidate's dissertation, Ivan Franko State University of Lviv; 133 p.]. Lviv. [in Ukrainian].
- Zambrano-Vazquez, L. (2016). *The interaction of state and trait worry on response monitoring in those with worry and obsessive-compulsive symptoms* [Doctoral dissertation, University of Arizona]. UA Campus Repository. <https://repository.arizona.edu/handle/10150/620615>

6. Зразок оформлення публікації

УДК 575.17:575.113.2:633.34

Ю. А. Попович¹, аспірантка;

ORCID iD <https://orcid.org/0000-0001-6576-7606>

О. М. Благодарова², наукова співробітниця;

ORCID iD <https://orcid.org/0009-0000-4505-6313>

С. В. Чеботар^{1,2}, д. б. н., професорка;

ORCID iD <https://orcid.org/0000-0002-9130-7272>

¹ Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, кафедра молекулярної біології, біохімії та генетики; Шампанський пров., 2, м. Одеса, 65015, Україна

² Селекційно-генетичний інститут – Національний центр насіннєзнавства та сортовивчення, Овідіопольська дор., 3, м. Одеса, 65036, Україна

ПОЛІМОРФІЗМ МІКРОСАТЕЛІТНОГО ЛОКУСУ *TAGL GAP* ТА ЙОГО ЗВ'ЯЗОК З АЛЕЛЬНИМИ ВАРІАНТАМИ ГЛІАДИНІВ ПШЕНИЦІ М'ЯКОЇ

Досліджено поліморфізм мікросателітного локусу *Taglgap* в українських та зарубіжних сортах та лініях пшениці м'якої (*Triticum aestivum* L.). Знайдено 11 алелів мікросателіту *Taglgap*, з яких сім алелів у сортів, створених в Україні та десять алелів у сортів, створених в зарубіжних селекційних установах. Показано як асоціюються алелі мікросателітного локусу *Taglgap* з алельними варіантами гліадинів за локусом *Gli-B1*. Проведено аналіз нуклеотидних послідовностей у базі даних NCBI, та показано присутність й можливі алелі *Taglgap* у низки видів родів *Triticum* L. та *Aegolops* L.

Ключові слова: *Triticum aestivum* L., алельні варіанти гліадинів, *Taglgap*, мікросателіт, поліморфізм, *Gli-B1* локус.

Текст вступу до статті

Матеріали та методи досліджень

Текст матеріалів та методів роботи

Результати та їх обговорення

Викладення результатів та їх аналіз

Висновки...

Список використаної літератури

Розширене резюме українською та англійською мовами:**Ю. А. Попович¹, О. М. Благодарова², С. В. Чеботар^{1,2}**¹ Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, кафедра молекулярної біології, біохімії та генетики; Шампанський пров., 2, м. Одеса, 65015, Україна² Селекційно-генетичний інститут – Національний центр насіннезнавства та сортовивчення, Овідіопольська дор., 3, м. Одеса, 65036, Україна**ПОЛІМОРФІЗМ МІКРОСАТЕЛІТНОГО ЛОКУСУ *TAGLGP* ТА ЙОГО ЗВ'ЯЗОК З АЛЕЛЬНИМИ ВАРІАНТАМИ ГЛІАДИНІВ ПШЕНИЦІ М'ЯКОЇ****Резюме****Проблема.** Гліадини – мономерні та високополіморфні запасні білки ендосперму пшениці, які разом зглютенінами формують глютенний комплекс, що визначає хлібопекарські властивості. Алеельні варіанти гліадинів є важливою ознакою при відборі матеріалу для селекції, проте визначення їх методом електрофорезу вкислому ПААГ є досить складним.**Мета.** Метою даної роботи було дослідити поліморфізм мікросателітного локусу *Taglgap* та проаналізувати його зв'язок з поліморфізмом алеельних варіантів гліадинів визначених методом електрофорезу вкислому ПААГ.**Методика.** У роботі досліджували 140 сортів та ліній пшениці м'якої української та зарубіжної селекції. Електрофорез запасних білків проводили вкислому ПААГ за методикою Ф. О. Поперелі [1989], алеельні варіанти позначали за міжнародною номенклатурою [Metakovsky et al., 2018]. ДНК виділяли з використанням СТАВ буферута проводили ПЛР зпраймерами до мікросателіту *Taglgap* (Devos et al., 1995). Продукти ПЛР фракціонували в 7% ПААГ та фарбували за допомогою аргентум нітрату. Нуклеотидні послідовності аналізували за допомогою BLAST та вирівнювали MAFT методами.**Основні результати.** Виявлено 19 алеельних варіантів гліадинів та 11 алелів локусу *Taglgap*. В колекції українських сортів зустрічалися *Gli-B1b*, *Gli-B1c*, *Gli-B1d*, *GliB1e*, *GliB1f*, *GliB1g*, *GliB1h*, *GliB1i* та *Gli-B1o* алеельні варіанти і алелі *Taglgap* 216 п.н, 237 п. н., 246 п.н, 248 п.н, 252 п.н, 267 п.н, 270 п. н. та null. У зарубіжній колекції сортів – *GliB1a*, *GliB1b*, *GliB1c*, *GliB1d*, *GliB1e*, *GliB1f*, *GliB1g*, *GliB1h*, *GliB1i*, *GliB1j*, *GliB1k*, *GliB1l*, *GliB1m*, *GliB1n*, *Gli-B1o*, *Gli-B1p*, *Gli-B1q*, *Gli-B1r*, *Gli-B1s* та 213 п. н., 216 п.н, 237 п. н., 246 п.н, 248 п.н, 250 п.н, 252 п.н, 270 п. н., 285 п. н. та null. Аналіз нуклеотидних послідовностей в базі даних NCBI показав наявність ряду інших алелів мікросателіту *Taglgap* не тільки у пшениці м'якої, але й в деяких видів родів *Triticum* L. та *Aegilops* L.**Висновки.** Виявлений поліморфізм корелює з поліморфізмом алеельних варіантів гліадинів *Gli-B1* локусу та дозволяє розділити *GliB1a*, *GliB1d*, *GliB1h* та *Gli-B1l* алеельні варіанти, а для українських сортів з високою імовірністю ще й *Gli-B1b* алеельний варіант. Проте, даний маркер не дозволяє ідентифікувати *GliB1c*, що є важливим для селекції.**Ключові слова:** *Triticum aestivum* L., алеельні варіанти гліадинів, *Taglgap*, мікросателіт, поліморфізм, *Gli-B1* локус.

Yu. A. Popovych¹, O. M. Blagodarova², S. V. Chebotar^{1,2}

¹ Odesa I. I. Mechnikov National University, Department of Molecular Biology, Biochemistry and Genetics; 2 Shampanskyi Ln, Odesa, 65015, Ukraine

² Plant Breeding and Genetics Institute – National Center of Seed and Cultivar Investigation, National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine; 3 Ovidiopolska Rd, Odesa, 65036, Ukraine

POLYMORPHISM OF *TAGLGAP* MICROSATELLITE LOCUS AND ITS ASSOCIATION WITH ALLELELIC VARIETIES OF GLIADINS OF BREAD WHEAT

Summary

Introduction. Gliadins are monomeric and highly polymorphic storage proteins of wheat endosperm, which together with glutenins form a gluten complex that determines the breadmaking properties of wheat. Allelic variants of gliadins are an important feature in the selection for breeding material, but their detection by electrophoresis in acid PAGE is quite difficult.

Aim. The aim of this study was to investigate the polymorphism of the *Taglgap* microsatellite locus and to analyze its correspondence to the polymorphism of allelic variants of gliadins that have been revealed by acid PAGE electrophoresis.

Methods. 140 cultivars and lines of bread wheat of Ukrainian and foreign selection were analyzed. Electrophoresis of storage proteins was performed in an acid PAGE according to the method of F.O. Poperellia (1989), allelic variants were designated according to the international nomenclature [Metakovsky et al., 2018]. DNA was isolated by CTAB method and PCR was performed with primers to the *Taglgap* microsatellite [Devos et al., 1995]. PCR products were fractionated in 7% PAGE and stained with silver staining method. Nucleotide sequences were searched by BLAST and aligned by MAFT methods.

The main results. 19 allelic variants of gliadins and 11 alleles of the *Taglgap* locus were identified. In the collection of Ukrainian varieties there were *Gli-B1b*, *Gli-B1c*, *Gli-B1d*, *Gli-B1e*, *Gli-B1f*, *Gli-B1g*, *Gli-B1h*, *Gli-B1i* and *Gli-B1o* allelic variants and alleles of *Taglgap* 216 bp, 237 bp, 246 bp, 248 bp, 252 bp, 267 bp, 270 bp and *null*. In the foreign collection of varieties – *Gli-B1a*, *Gli-B1b*, *Gli-B1c*, *Gli-B1d*, *Gli-B1e*, *Gli-B1f*, *Gli-B1g*, *Gli-B1h*, *Gli-B1i*, *Gli-B1j*, *Gli-B1k*, *Gli-B1l*, *Gli-B1m*, *Gli-B1n*, *Gli-B1o*, *Gli-B1p*, *Gli-B1q*, *Gli-B1r*, *Gli-B1s* and 213 bp, 216 bp, 237 bp, 246 bp, 248 bp, 250 bp, 252 bp, 270 bp, 285 bp and *null*. Nucleotide sequence analysis in the NCBI database showed the presence of a number of other alleles of the *Taglgap* microsatellite not only in bread wheat but also in some species of the *Triticum* L. and *Aegilops* L. genus.

Conclusions. The detected polymorphism correlates with the polymorphism of allelic variants of gliadins of *Gli-B1* locus and makes it possible to identify *Gli-B1a*, *Gli-B1d*, *Gli-B1h* and *Gli-B1i* allelic variants, and for Ukrainian varieties with high probability also *Gli-B1b* allelic variant. However, this marker does not allow identifying *Gli-B1c*, which is important for breeding.

Key words: *Triticum aestivum* L., allelic variants of gliadins, *Taglgap*, microsatellite, polymorphism, *Gli-B1* locus.

References ...

7. Положення про авторські права

Автори, які публікуються у цьому журналі, погоджуються з такими умовами:

1. Автори залишають за собою право на авторство своєї роботи та передають журналу право першої публікації цієї роботи на умовах ліцензії [Attribution-NonCommercial 4.0 International \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).
2. Автори мають право укладати самостійні додаткові угоди щодо неексклюзивного розповсюдження роботи у тому вигляді, в якому вона була опублікована у цьому журналі (наприклад, депонувати роботу в електронному сховищі установи або публікувати у складі монографії), за умови збереження посилання на першу публікацію роботи у цьому журналі.
3. Політика журналу дозволяє і заохочує розміщення авторами праці в мережі Інтернет (наприклад, в електронних архівах-репозитаріях установ або на особистих веб-сайтах), оскільки це сприяє виникненню продуктивної наукової дискусії та позитивно позначається на оперативності та динаміці цитування опублікованої роботи.

Публікація праць в журналі здійснюється на некомерційній основі. Комісійна плата за оформлення статті не стягується.

Положення про конфіденційність

Імена та електронні адреси, які вказуються користувачами сайту цього журналу, будуть використовуватись виключно для виконання внутрішніх технічних завдань цього журналу; вони не будуть поширюватись та передаватись стороннім особам.

Макет В. Г. Вітвицька

Підписано до друку 27.12.2024 р. Формат 70×108/16. Ум. друк. арк. 12,6.
Тираж 50 прим. Зам. № 2896.

Видавець

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4215 від 22.11.2011 р.
вул. Університетська, 12, м. Одеса, 65082, Україна

Тел.: +38 (048) 723 28 39

e-mail: druk@onu.edu.ua

Надруковано з готового оригінал-макета

у видавництві ФОП Назарчук С. Л.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7024 від 23.12.2019 р.
Фонтанська дорога, 10, м. Одеса, 65009, Україна

Тел.: +38 (050) 905 23 77

e-mail: selen_odessa@ukr.net