

Anthocyanins and flavonols content in leaves of *Rutaceae* Juss family representatives as markers of stress tolerance

Oleksandr A. Parashchuk, Volodymyr F. Levon

M. M. Hryshko National Botanical Garden, NAS of Ukraine, 01014, Kyiv, Ukraine,

e-mail: parashchyc@gmail.com; ORCID: [0009-0006-1063-7402](https://orcid.org/0009-0006-1063-7402)

e-mail: vflevon@gmail.com; ORCID: [0000-0003-2652-9984](https://orcid.org/0000-0003-2652-9984)

✉ e-mail: parashchyc@gmail.com

Abstract.

Aims. To determine the seasonal dynamics and sex-related patterns of anthocyanins and flavonols accumulation in representatives woody plants of the *Rutaceae* Juss family (♂ + ♀ *Ptelea trifoliata* L., ♂ + ♀ *Phellodendron amurense* Rupr., *Tetradium daniellii* (Benn.) T.G. Hartley) under temperature and drought stress in the conditions of Kyiv. **Methods.** The quantitative content of anthocyanins was determined spectrophotometrically at 530 nm, and that of flavonols at 390 nm, recalculated as cyanidin-3-glucoside and rutin equivalents, respectively. Samples were collected during the summer (July 2024) and winter (February 2025) periods. Statistical analysis was performed using IBM SPSS Statistics 27.0.1, with a significance level of $\alpha = 0.05$. **Results.** Distinct seasonal and sex-related differences in flavonoid content were observed. During the summer period, the highest anthocyanin content was recorded in ♂ *P. trifoliata* (137.14 mg/100 g), and the lowest in ♀ individuals (88.42 mg/100 g). In ♀ *Ph. amurense*, anthocyanin levels remained consistently high (124.44 mg/100 g), while in ♂ trees they were significantly lower. The highest flavonol content was detected in *T. daniellii* (41.30 mg/100 g DW), which is likely associated not only with its response to heat stress but also with increased metabolic activity during the flowering phase and the potential photoprotective function of these compounds. In the winter period, the maximum anthocyanin content was observed in ♀ *P. trifoliata* (97.02 mg/100 g), and the highest flavonol content in ♀ *Ph. amurense* (30.48 mg/100 g). Sexual dimorphism was evident across all species, indicating different levels of metabolic activity under stress conditions. **Conclusions.** Anthocyanins and flavonols serve as indicators of stress responses in woody *Rutaceae* species under temperate climatic

conditions. A high anthocyanin content under extreme temperatures reflects stress intensity rather than enhanced tolerance. *P. trifoliata* exhibits the highest cold and heat tolerance, while *T. daniellii* shows the lowest. The obtained results have confirmed the feasibility of using flavonoid content as a diagnostic indicator of the physiological and biochemical adaptation of introduced Rutaceae species.

Keywords: antioxidant activity, flavonoids, photoprotection, stress conditions, woody plant sexual dimorphism.

Вміст антоціанів і флавонолів у листках представників родини *Rutaceae* Juss як маркерів стресостійкості

Олександр А. Паращук [✉], Володимир Ф. Левон
Національний ботанічний сад імені М.М. Гришка НАН України, м.Київ
e-mail: parashchyc@gmail.com; ORCID: [0009-0006-1063-7402](https://orcid.org/0009-0006-1063-7402)
e-mail: vflevon@gmail.com; ORCID: [0000-0003-2652-9984](https://orcid.org/0000-0003-2652-9984)

[✉]e-mail: parashchyc@gmail.com

Реферат.

Мета. Встановити сезонну динаміку та статеві особливості накопичення антоціанів і флавонолів у представників родини *Rutaceae* Juss (♂ + ♀ *Ptelea trifoliata* L., ♂ + ♀ *Phellodendron amurense* Rupr., *Tetradium daniellii* (Benn.) T. G. Hartley) за дії температурного та посушливого стресу в умовах м. Києва. **Методи.** Кількісний вміст антоціанів визначали спектрофотометрично при 530 нм, флавонолів — при 390 нм у перерахунку на ціанідин-3-глюкозид і рутин відповідно. Зразки відбирали у літній (липень 2024 р.) і зимовий (лютий 2025 р.) періоди. Статистичний аналіз проводили у програмі IBM SPSS Statistics 27.0.1, $\alpha = 0,05$. **Результати.** Виявлено чіткі сезонні та статеві відмінності у вмісті флавоноїдів. У літній період найвищий рівень антоціанів зафіксовано в *P. trifoliata* ♂ (137,14 мг/100 г), найнижчий — у ♀ (88,42 мг/100 г). У *Ph. amurense* ♀ вміст антоціанів був стабільно високим (124,44 мг/100 г), тоді як у ♂ значно нижчим. Найвищий рівень флавонолів виявлено у *T. daniellii* (41,30 мг/100 г СР), що, ймовірно, пов'язано не лише з реакцією на тепловий стрес, а й із підвищеною метаболічною активністю під час квітучання та потенційною фотозахисною функцією цих сполук. У зимовий період максимальні значення антоціанів спостерігалися у *P. trifoliata* ♀ (97,02 мг/100 г), а флавонолів — у *Ph. amurense* ♀ (30,48 мг/100 г). Статевий диморфізм простежується у всіх видів, що свідчить про різний рівень метаболічної активності за умов стресу. **Висновки.** Антоціани та флавоноли є

індикаторами стресових реакцій деревних видів *Rutaceae* у помірному кліматі. Високий вміст антоціанів при екстремальних температурах свідчить про інтенсивність стресу, а не про підвищену стійкість. Найвищу холодо- та теплотолерантність проявляє *P. trifoliata*, найменшу — *T. daniellii*. Отримані результати підтверджують доцільність використання вмісту флавоноїдів як діагностичного показника фізіолого-біохімічної адаптації інтродукованих видів родини *Rutaceae* Juss.

Ключові слова: антиоксидантна активність, флавоноїди, фотозахист, стресові умови, статевий диморфізм деревних рослин.

Вступ/Introduction. Серед багатьох рослин, що використовуються як джерела цінної сировини для виробництва флавоноїдів досить перспективними можуть бути представники родини *Rutaceae* Juss., зокрема види трьох родів під родини *Zanthoxyloideae* A.Juss. ex Arn.: *Tetradium* Lour. (*T. daniellii* (Benn.) T.G.Hartley), *Ptelea* L. (*P. trifoliata* L.) та *Phellodendron* Rupr. (*Ph. amurense* Rupr.) (Kubitzki et al., 2010).

Природний ареал *T. daniellii* охоплює гірські (до 3200 м н.р.м.) та помірні регіони Східної Азії. В Україні перші спроби акліматизації цього виду здійснено у Никітському ботанічному саду у 1935 р. (Hartley, 1981; Parashchuk, 2025).

P. trifoliata поширений у східній і центральній частині США, заходить на північ до південних провінцій Канади (Онтаріо, Квебек), на південь — до північної та центральної Мексики. Вид охоплює два кліматичні пояси — помірний та субтропічний. В Україні його вперше висаджено у 1809 р. у Харківській області (Ambrose et al, 1985).

Природний ареал *Ph. amurense* належить до помірного кліматичного поясу й охоплює Далекий Схід (басейн Амура, Примор'я), Північний Китай та Корейський півострів (Kubitzki et al., 2010). У 1861 році вид був інтродукований до Тростянецького парку на Чернігівщині. Успішна акліматизація цих видів поза межами природного ареалу зумовлена їх високою фізіолого-біохімічною пластичністю, що, зокрема, пов'язана з активністю систем вторинного метаболізму. Серед вторинних метаболітів особливу роль відіграють фенольні сполуки, які забезпечують адаптивні реакції рослин на дію стресових чинників різної природи.

До найважливіших представників фенольних сполук належать флавоноїди — сполуки, що містять дифенілпропановий фрагмент (C6–C3–C6) і є похідними 2-фенілхроману (флавану) або 2-фенілхромону (флавоу). Ці метаболіти виконують широкий спектр біологічних функцій, зокрема беруть участь у регуляції росту та розвитку, фотозахисті, антиоксидантному захисті й формуванні пігментних властивостей рослин. Основні групи флавоноїдів: катехіни, лейкоантоціанідини, антоціани, флаванони, флаволи, флавоноли,

ізофлавоноїди, халкони, дигідрохалкони, аурони, флаволігнани та біфлавоноїди (Chen et al, 2023). Їх різноманіття налічує понад 10 тис. сполук (Hao et al, 2024).

Флавоноїди виконують функцію фітоалексинів — речовин, що синтезуються у відповідь на інфікування або контакт із метаболітами патогенів, накопичуючись у токсичних для них концентраціях. Вони діють як сигнальні та детоксикаційні агенти, стимулюють проростання насіння, сприяють адаптації до стресових температур і посухи, а також захищають від ультрафіолетового випромінювання. Частина з них проявляє антиоксидантні властивості, зокрема нейтралізує вільні радикали та хелатує метали (Graeber et al, 2012; Guan et al, 2014).

Серед різноманіття флавоноїдних сполук окрему групу становлять флавоноли та антоціани. Флавоноли — один із найпоширеніших і біологічно активних класів цієї метаболічної групи. Вони характеризуються наявністю гідроксильної групи в положенні С-3 хромонової системи, що зумовлює їхні виражені антиоксидантні властивості та здатність взаємодіяти з реактивними формами кисню. Флавоноли беруть участь у реалізації захисних реакцій рослин, зокрема через регуляцію експресії генів, пов'язаних із біосинтезом фенольних сполук, а також через участь у сигнальних процесах, що забезпечують адаптацію до абіотичних і біотичних стресових чинників. (Harborne & Williams, 2000). До таких сполук належать лігнін і суберин — полімери, що формують коркову тканину та забезпечують бар'єрну функцію клітинних стінок (Teixeira, 2022).

Окрім участі у регуляторних і захисних механізмах, флавоноїди відіграють важливу роль у формуванні зовнішніх ознак рослин, зокрема їхнього забарвлення та аромату. Ці сполуки беруть участь у синтезі пігментів, що визначають декоративні та адаптивні властивості квіток і плодів, сприяючи залученню запилювачів і поширювачів насіння. Серед різних підкласів флавоноїдів особливе місце посідають антоціани — водорозчинні пігменти, відповідальні за червоне, пурпурове, синє та фіолетове забарвлення рослинних органів. Вони не лише забезпечують яскраву колірну гаму, але й виконують низку фізіолого-біохімічних функцій, пов'язаних із захистом рослин від ультрафіолетового випромінювання, окисного стресу та екстремальних температур, а також беруть участь у процесах запилення та формування плодів. (Fincher, 1989; Nameed & Adil, 2019). У деяких видів пригнічення синтезу рутину (флавонолу) може викликати партенокарпію, тоді як кверцетин і кемпферол мають протилежний ефект (Gubler et al, 1995).

Флавоноли поглинають ультрафіолет у діапазоні 280–320 нм і забезпечують захист епідермальних клітин, які пропускають більшість видимого світла, але затримують до 95 % УФ-променів. Вони також беруть участь у взаємодії з мікроорганізмами та у формуванні імунітету рослин (Kobyletzka & Terek, 2017).

Антоціани накопичуються у вигляді глікозидів у вакуолях клітин і забезпечують захист від біотичних та абіотичних стресів (Skrypka et al, 2018). Вони виконують антиоксидантну функцію, діють як світлофільтри, беруть участь у регуляції транскрипції генів та фітогормональних каскадах (Gould et al, 2002; Landi et al, 2015; Sadowska-Bartosz & Bartosz, 2024).

Таким чином, флавоноли забезпечують постійну (фонову) захисну функцію, тоді як антоціани реалізують індуковану реакцію на стрес. Їхня взаємодія дає змогу підтримувати функціональну стійкість рослин, фотосинтетичного апарату та фізіологічний гомеостаз. У холодний період накопичення антоціанів часто індукується температурним стресом (Qian et al, 2024).

Проте рівень накопичення цих пігментів у деревних культур в умовах зимового й літнього стресу в помірному кліматі вивчені недостатньо, особливо серед інтродукованих видів. Це набуває актуальності у контексті кліматичних змін, коли стабільність вмісту пігментів може бути критерієм відбору морозо- та посухостійких екземплярів.

Мета роботи: здійснити комплексну оцінку рівня накопичення антоціанів і флавонолів у вегетативних органах деревних представників родини *Rutaceae* Juss. та виявити міжвидові й міжстатеві відмінності їхнього вмісту за дії температурного (зимового) та посушливого (літнього) стресу.

Матеріали і методи/Materials and Methodology. Об'єктами дослідження були представники родини *Rutaceae* Juss.: однодомний вид *Tetradium daniellii* (Benn.) Hartley, T. G. (1981) та чоловічі й жіночі екземпляри дводомних видів *Phellodendron amurense* Rupr. (1857) і *Ptelea trifoliata* L. (1753), що ростуть у Національному ботанічному саду ім. М. М. Гришка, м. Київ.

Мінімальний вік рослини *T. daniellii*, станом на 2025 р., становив від 45 років, рослини *Ph. amurense* висаджені у 1975 р. на ботаніко-географічній ділянці «Далекий Схід» та кущі *P. trifoliata* з колекції «Рутові», висаджені протягом 50–60-х років ХХ ст. Дослідження проводили у літній (липень 2024 р.) та зимовий (лютий 2025 р.) періоди. Дослідні зразки відбирали взимку у фазі ВВСН 00 (стан зимового спокою) для всіх видів, а також улітку в таких фенологічних фазах: ВВСН 61 (початок квітання, відкрито 10% квіток) — для *T. daniellii*; ВВСН 78 (80% плодів досягли фінального розміру) — для *Ph. amurense*; ВВСН 79 (майже всі плоди досягли фінального розміру) — для *P. trifoliata* (Pokhylchenko et al., 2024).

Зразки зберігали в добре провітрюваному приміщенні, захищеному від прямих сонячних променів, при температурі 20–25°C. Сушіння здійснювали при температурі 35–40°C упродовж 24–72 год залежно від типу рослинної сировини та її початкової вологості. Ступінь висушування контролювали шляхом зважування частини зразка — різниця маси не перевищувала 1–2%, що свідчило про рівномірність висушування. Після цього зразки подрібнювали в

електромліні (Vektor HR-200) до отримання частинок розміром близько 200 мкм.

Визначення антоціанів. Вміст антоціанів визначали спектрофотометрично, зважаючи на їхню здатність набувати стійкого забарвлення в кислому середовищі. Це дає змогу кількісно оцінити їх вміст при довжині хвилі 530 нм, де спостерігається максимум поглинання. Для екстракції використовували співвідношення екстрагенту до субстрату 10:1 (Fuleki & Francis, 1968).

Для екстракції гомогенізували 1,0 г подрібненої висушеної рослинної сировини в 10 мл 3,5% соляної кислоти у 96% етанолі. Отриману масу залишали в темному місці на 1–2 години при кімнатній температурі, періодично збовтуючи. Після цього фільтрували, повторювали екстракцію ще один раз і об'єднували екстракти. Для спектрофотометричного аналізу відбирали прозорий надосадовий шар.

Вміст антоціанів у перерахунку на ціанідин-3-глюкозид розраховували за формулою:

$$C_{\text{ant}} = \frac{D \times V \times R \times K}{l \times m}$$

де: D — оптична густина розчину; V — об'єм екстракту, мл; R — коефіцієнт розведення розчину 3,5 % соляної кислоти в етанолі; l — робоча довжина кювети, см; m — наважка, г; K — коефіцієнт перерахунку, базується на каліброваному графіку для ціанідинових глікозидів у підкисленому етанолі.

Визначення флавонолів. Визначали флавоноли спектрофотометрично. Для цього переносили 0,2–0,3 г рослинного матеріалу у колбу, додавали 3 мл 80% етилового спирту і нагрівали зі зворотним холодильником протягом 45 хвилин на водяній бані. Після охолодження до кімнатної температури фільтрували суспензію через паперовий фільтр у мірну колбу об'ємом 100 мл. Отриманий розчин доводили до мітки 80% спиртом (розчин А).

У мірну колбу об'ємом 25 мл переносили 2 мл розчину А, додавали 1 мл 2% розчину алюміній хлориду в 95% етиловому спирті та доводили об'єм до мітки 95% спиртом. Через 20 хвилин вимірювали оптичну густина розчину при довжині хвилі 390 нм у кюветі з товщиною шару 10 мм. Контрольним зразком слугувала суміш розчинів алюміній хлориду та оцтової кислоти (Nurlinda et al., 2021).

Вміст флавонолів у перерахунку на рутин у повітряно-сухій сировині обчислювали за формулою:

$$C_{\text{flav}} = \frac{R \times D \times K \times A}{m}$$

де: R — тангенс кута нахилу прямої на калібрувальному графіку залежності оптичної густини досліджуваного розчину від концентрації

флавонолів; D — оптична густина; K — коефіцієнт перерахунку на повітряно-суху вагу; m — наважка, г; A — аліквота.

Статистичний аналіз даних здійснювали за допомогою програми IBM SPSS Statistics (версія 27.0.1). Результати подаємо у вигляді гістограм, що відображають середні арифметичні значення та відповідні стандартні помилки. Рівень достовірності встановлено на рівні $\alpha = 0,05$.

Кількісні показники виражено в мг/100 г сухої речовини (СР). Оптичну гуστину всіх досліджуваних розчинів вимірювали за допомогою спектрофотометра ULAB 102UV (Китай).

Кліматичні показники отримані з відкритих онлайн-ресурсів Meteopost (2025) та Boris Sresnevsky Central Geophysical (2025).

Результати та обговорення/Results and Discussion. При проведенні дослідження було враховано погодні умови для м. Києва (Meteopost, 2025). Для літнього досліду вміст антоціанів і флавонолів визначали у листках, зібраних після підвищення максимальної температури з $+24,7^{\circ}\text{C}$ до $+34,1^{\circ}\text{C}$ (амплітуда $+9,4^{\circ}\text{C}$), яка утримувалася на цьому рівні протягом двох діб. Для зимового досліду вміст антоціанів визначали у пагонах, зібраних після зниження мінімальної температури з $+3,8^{\circ}\text{C}$ до $-8,5^{\circ}\text{C}$ (амплітуда $-12,3^{\circ}\text{C}$), що зберігалася на подібному рівні протягом трьох діб (рис. 1–2).

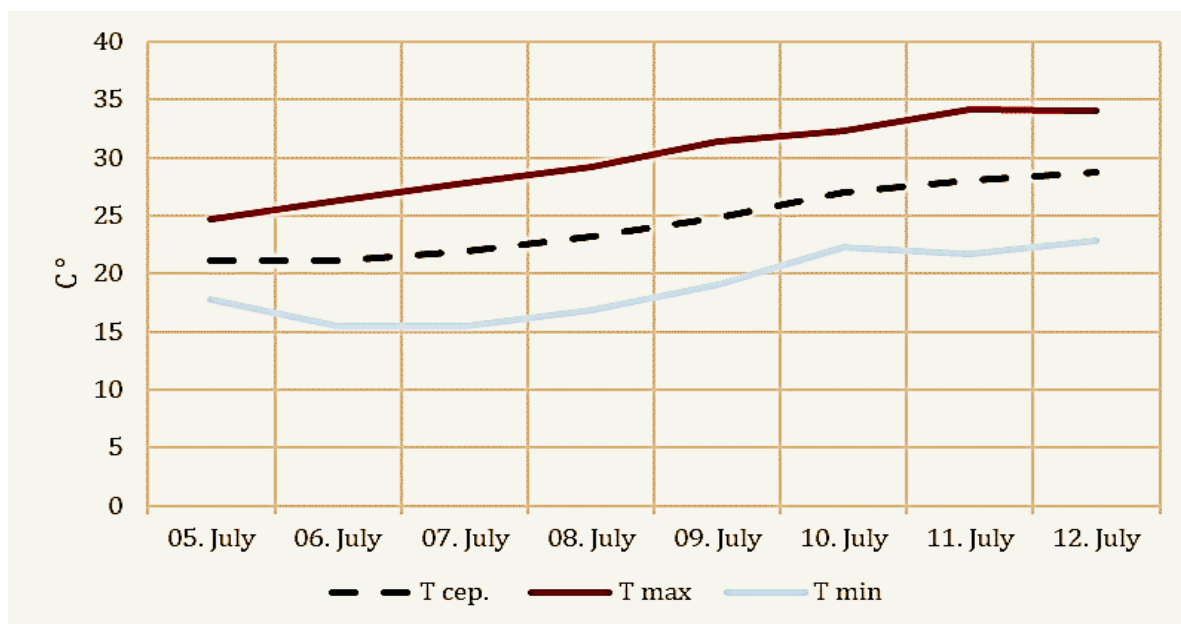


Рисунок 1. Динаміка добових температур у період досліджень у липні 2024 р. (Meteopost, 2025).

Figure 1. Daily Temperature Dynamics During the Study Period on July 2024. (Meteopost, 2025).

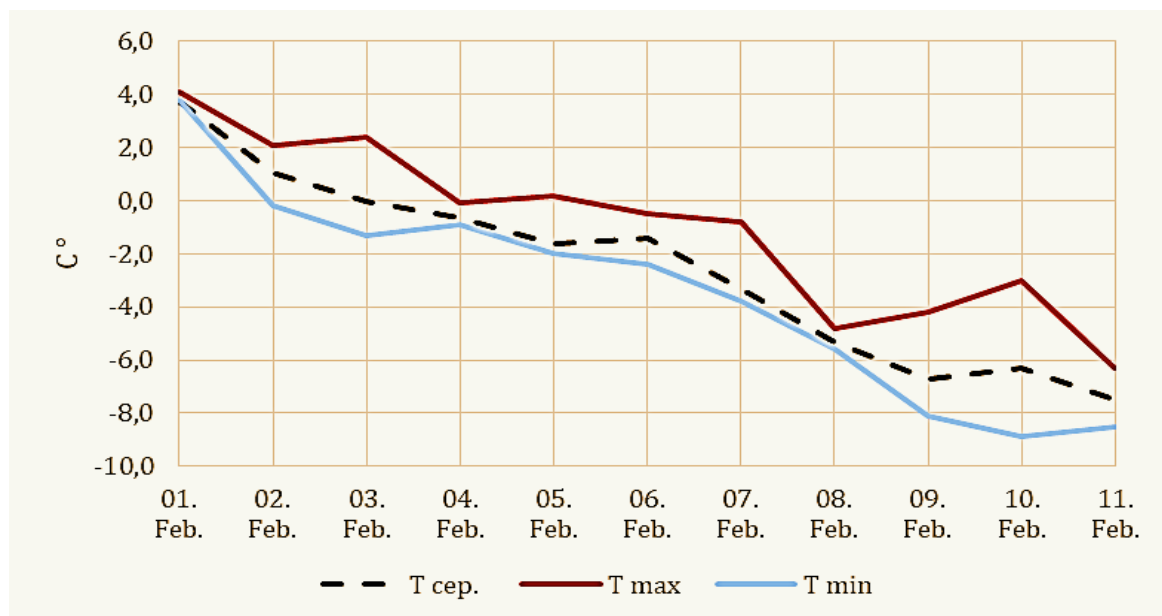


Рисунок 2. Динаміка добових температур у період досліджень у лютому 2025 р. (Meteopost, 2025).

Figure 2. Daily Temperature Dynamics During the Study Period on February 2025. (Meteopost, 2025).

Аналіз кліматичних даних Центральної геофізичної обсерваторії ім. Б. Срезневського показав різний ступінь відповідності температурних умов м. Києва щодо природних ареалів інтродукованих видів (табл. 1).

Таблиця 1. Абсолютні температури повітря у січні та липні в м. Києві за 1881–2012 рр. за даними Центральної геофізичної обсерваторії ім. Б. Срезневського

Table 1. Absolute air temperature in January and July in Kyiv (1881–2012) Based on data from the Borys Sreznevskyi Central Geophysical Observatory

Місяць/ Month	Мін./Min, °C	Дата/ Date	Макс./Max, °C	Дата/ Date	Амплітуда/ Amplitude, °C
Січень / January	–32.9	11.01.1951	+11.1	11.01.1991	44.0
Липень / July	+5.8	23.07.1904	+39.4	30.07.1936	33.6

Оскільки дані щодо максимальних добових температур у природних ареалах досліджуваних видів варіюються залежно від джерела, ми об'єктивно включили найвищі значення, отримані шляхом зіставлення ареалів зростання (за ресурсом POWO) з кліматичними картами сайту en.climate-data.org — для азійських видів, та з ресурсу weather.gov — для *P. trifoliata* (табл. 2).

Таблиця 2. Максимальні та мінімальні температури у природних ареалах досліджуваних видів визначені за кліматичними даними з онлайн-ресурсів en.climate-data.org (період 1991–2020) та weather.gov (період 2000–2025).

Table 2. Maximum and minimum temperatures in the natural ranges of the studied species were determined based on climate data from the online resources en.climate-data.org (1991–2020) and weather.gov (2000–2025).

Вид/Species	Мін./Min, °C	Макс./ Max, °C	Джерело/ Source	Коментар/Notes
<i>Ptelea trifoliata</i>	–37.2	+36.1	weather.gov – Duluth, MN	Дані для регіону Minnesota–Duluth, 2000–2025 / Data for Minnesota, Duluth region
<i>Phellodendron amurense</i>	–33.7	+35.1	en.climate-data.org	Північна межа: Хабаровський край (Новий Ургал); південна — провінція Zhejiang / Northern bounds: Khabarovsk Krai (Novy Urgal); Southern bounds: Zhejiang Province
<i>Tetradium daniellii</i>	–28.1	+35.1	en.climate-data.org	Північна межа: провінція Heilongjiang; південна — провінція Zhejiang / Northern bounds: Heilongjiang Province; southern bounds: Zhejiang Province

Температурний режим м. Києва (1881–2012 pp.) характеризувався амплітудою від –32,9 °C (11.01.1951) до +39,4 °C (30.07.1936).

Для *P. trifoliata* мінімальні температури природного ареалу (–37,2 °C) були нижчими за абсолютні мінімальні температури повітря в Києві, що свідчить про потенціал її високої морозостійкості у межах нового ареалу інтродукції. Однак максимальна температура в Києві (+39,4 °C) перевищує природний максимум цього виду (+36,1 °C), що може спричиняти тепловий стрес у літній період.

Натомість стосовно *Ph. amurense* природні межі температур становили від –33,7 до +35,1 °C. Зимові мінімуми в Києві наближаються до нижньої межі його ареалу, а літні максимуми перевищують природний максимум, що може створювати ризики при дії теплового стресу.

Для *T. daniellii* температурний діапазон ареалу вузький: –28,1...+35,1 °C. Це означає, що зимові температури Києва (до –32,9 °C) перевищували морозостійкість виду, що становить потенційну загрозу для його виживання без захисту. Літні максимуми в Києві (+39,4 °C) також перевищують природну межу, як і у *Ph. amurense*, але *T. daniellii* має нижчу холодостійкість, що робить його менш адаптованим до київського клімату.

Водночас предиктори, пов'язані з температурою, хоч і є основними факторами, що впливають на придатність середовища існування для більшості деревних видів, не є єдиними чинниками, що визначають їх розподіл і виживання (Zhang et al, 2023). А максимальні температури, зафіксовані в природному ареалі, не завжди відповідають фізіологічній межі термостійкості рослин, що підтверджується експериментальними оцінками для *Ptelea* та *Phellodendron* (Stewart et al, 2023; Ma, 2021).

Протягом липня 2024 р., коли денні максимуми протягом 6 днів перевищували +34 °С, спостерігали зміну орієнтації та скручування листків у всіх рослин *Ph. amurense*. Проте, коли у другій декаді серпня того ж року максимальні температури піднялись вище +34 °С протягом 4х днів, у більшій кількості рослин нашої колекції спостерігали пошкодження листків. У *P. trifoliata* спостерігалось часткове згортання листових пластинок у верхній частині крони. А у *T. daniellii* спостерігали втрату тургору та часткове опадання зав'язі та плодів.

У літній період (липень 2024 р.) відмічено найбільший вміст антоціанів у листках *P. trifoliata* ♂ (137,14 мг/100 г СР), а найменший у *P. trifoliata* ♀ (88,421 мг/100 г СР). У жіночих рослин *Ph. amurense* виявлено підвищений рівень антоціанів (124,44мг/100г СР), що свідчить про статеву диференціацію в реакції виду (рис. 3).

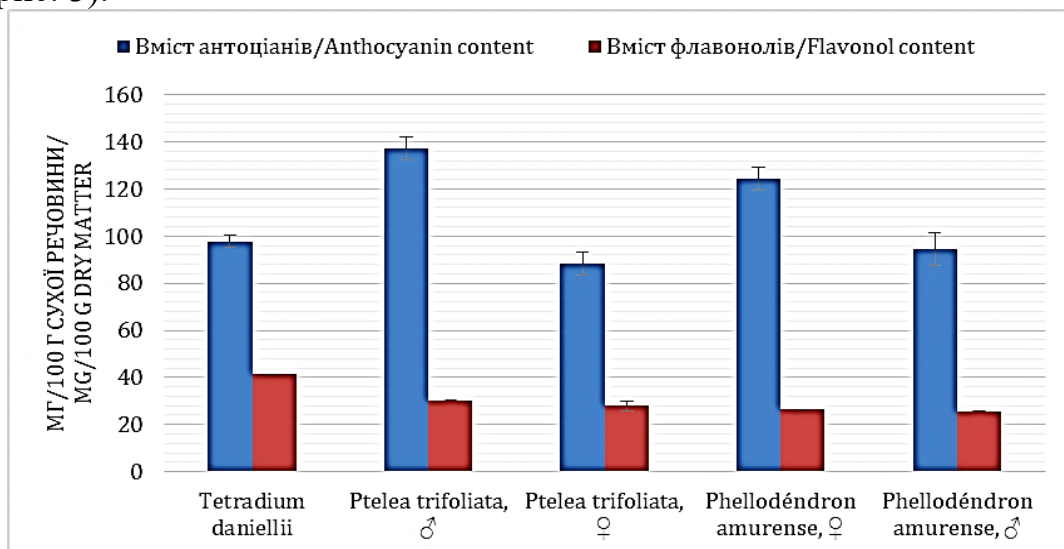


Рисунок 3. Вміст антоціанів та флавонолів у листках представників родини Rutaceae у період літньої посухи (07.2024)

Figure 3. Content of anthocyanins and flavonols in the leaves of Rutaceae representatives during the summer drought period (July 2024)

У літній період найвищий вміст флавонолів зафіксовано у *T. daniellii* (41,30 мг/100 г СР), що, ймовірно, пов'язано не лише з реакцією на тепловий стрес, а й із підвищеною метаболічною активністю під час фази цвітіння та потенційною фотозахисною функцією флавонолів. Найнижчі значення були у чоловічих особин *Ph. amurense* — (25,745 мг/100 г СР) (див. рис. 3).

У зимовий період (лютий 2025 р.) найвищий рівень антоціанів мали жіночі екземпляри *P. trifoliata* (97,02 мг/100 г СР), тоді як у *Ph. amurense* ♂ їхній вміст був значно меншим (24,86 мг/100 г СР), навіть в порівнянні з результатами у рослин жіночої статі (рис. 4).

Вміст флавонолів у зимовий період був найвищим у ♀ рослин *Ph. amurense* (30,483 мг/100 г СР), тоді як найнижчі значення зафіксовано у ♂ рослин *P. trifoliata* — 17,96 мг/100 г СР.

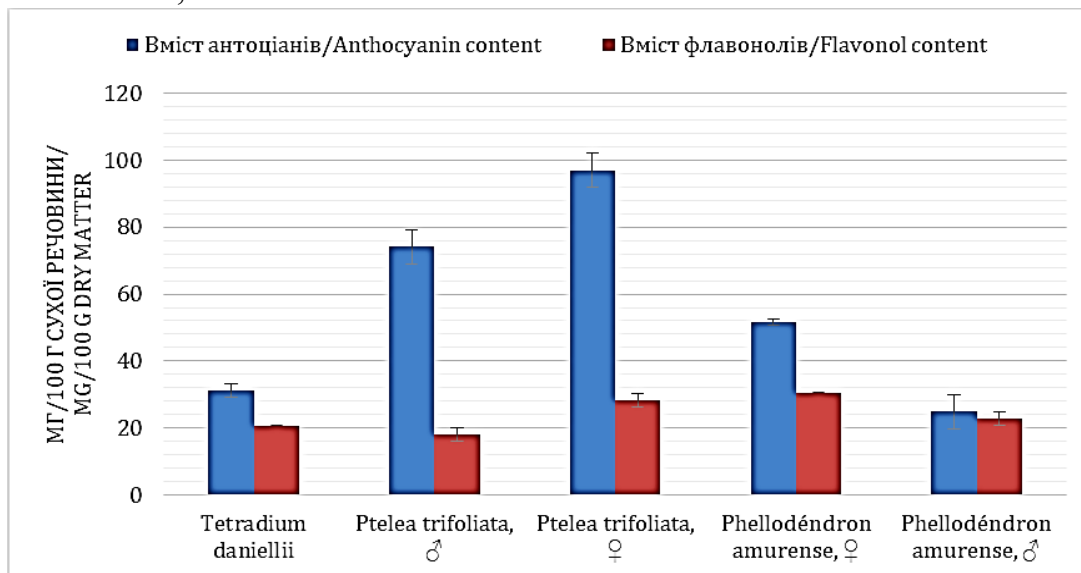


Рисунок 4. Вміст антоціанів та флавонолів у листках представників родини *Rutaceae* у зимовий період (02.2025)

Figure 4. Content of anthocyanins and flavonols in the leaves of *Rutaceae* representatives during the winter period (February 2025)

Порівняльний аналіз вмісту антоціанів і флавонолів у літньому та зимовому періодах показав, що у *P. trifoliata* різниця була більш вираженою у ♂ рослин влітку, тоді як узимку вищі концентрації цих сполук спостерігалися у ♀ рослин. Загалом жіночі екземпляри демонстрували стабільніші показники антоціанів і флавонолів протягом дослідження. *Ph. amurense* проявляє чіткий статевий диморфізм: рівень антоціанів у ♀ рослин істотно перевищує показники ♂ особин як у літній, так і в зимовий періоди. Вміст флавонолів також був вищим у ♀ рослин, хоча влітку ця різниця була незначною. Це узгоджується з літературними даними щодо статевих відмінностей у стресостійкості (He et al., 2022). *T. daniellii* у літній період характеризувався найвищим рівнем флавонолів, що, ймовірно, виконує захисну функцію проти ультрафіолетового випромінювання. Водночас узимку спостерігалось суттєве зниження вмісту антоціанів.

У дослідженні (Levon et al, 2020) автор повідомляє, що менш зимостійкі рослини характеризуються більшим вмістом антоціанів. Це, ймовірно, відображає їхню компенсаторну реакцію на дію низьких температур. Підвищений рівень антоціанів у таких видів може слугувати механізмом фотозахисту та антиоксидантного захисту клітин під час холодового стресу, зменшуючи інтенсивність окисних процесів і пошкодження мембран.

Отже, визначені літні та зимові температурні максимуми в Києві виявилися дуже близькими до крайніх значень із природних ареалів досліджуваних видів. Тому підвищений вміст антоціанів у *P. trifoliata* ♂ влітку (137,14 мг/100 г СР) і у *P. trifoliata* ♀ узимку (97,02 мг/100 г СР), а також статеві контрасти в *Ph. amurense* (♀: 124,44 мг/100 г СР влітку; ♂: 24,86 мг/100 г СР узимку) слід розглядати не як ознаку підвищеної стійкості, а як індикатор інтенсивності температурного стресу при наближенні до термічних меж ареалу.

Висновки/Conclusions. Вміст антоціанів і флавонолів у вегетативних органах представників родини Rutaceae виявив чіткі сезонні, видові та статеві відмінності. Так, у *T. daniellii* літній рівень флавонолів досягав максимуму (41,30 мг/100 г СР), що свідчить про їхню постійну захисну роль проти ультрафіолету, тоді як антоціани в цього виду суттєво знижувалися взимку. Водночас у *P. trifoliata* ♂ спостерігався пік накопичення антоціанів у літній період (137,14 мг/100 г СР), тоді як у ♀ рослин — у зимовий (97,02 мг/100 г СР). Така сезонна асиметрія між статями може свідчити про статеву-специфічну регуляцію антиоксидантного метаболізму. Аналогічний статевий диморфізм простежується в *Ph. amurense*, де жіночі особини накопичують антоціани вищими концентраціями як у літній, так і в зимовий періоди (124,44 мг/100 г СР і 51,56 мг/100 г СР відповідно) порівняно з чоловічими.

Оскільки літні та зимові температурні екстремуми Києва є близькими до таких показників у природних ареалах досліджуваних видів, підвищений вміст антоціанів слід розглядати не як прямий маркер стійкості, а як індикатор інтенсивності температурного стресу. Таким чином, антоціани в цьому випадку виступають стрес-індикаторами, а не показниками адаптаційної стійкості — їх накопичення відображає ступінь дії стресу, а не рівень толерантності до нього.

Подяка/Acknowledgement. Автори висловлюють подяку к.б.н. Ользі Похильченко за цінні коментарі та сприяння у виконанні роботи.

Список посилань/References

Ambrose, J. D., Kevan, P. G., & Gadawski, R. M. (1985). Hop tree (*Ptelea trifoliata*) in Canada: population and reproductive biology of a rare species. *Canadian Journal of Botany*, 63(11), 1928–1935. <https://doi.org/10.1139/b85-272>

Catalogue of Life. (2025). *Catalogue of Life: Checklist of species*. Retrieved October 14, 2025, from <https://www.catalogueoflife.org/>

Climate-Data.org. (n.d.). *Climate data for cities worldwide*. Retrieved October 9, 2025, from <https://en.climate-data.org>

Fincher, G. B. (1989). Molecular and cellular biology associated with endosperm mobilization in germinating cereal grains. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 40, 305–346. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.40.060189.001513>

Fuleki, T., & Francis, F. (1968). Quantitative methods for anthocyanins. Extraction and determination of total anthocyanin in cranberries. *Journal of Food Science*, 33(1), 72–77. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1968.tb00887.x>

Gould, K. S., McKelvie, J. & Markham, K. R. (2002), Do anthocyanins function as antioxidants in leaves? Imaging of H₂O₂ in red and green leaves after mechanical injury. *Plant, Cell & Environment*, 25: 1261–1269. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2002.00905.x>

Graeber, K., Nakabayashi, K., Miatton, E., Leubner-Metzger, G., & Soppe, W. J. (2012). Molecular mechanisms of seed dormancy. *Plant, cell & environment*, 35(10), 1769–1786. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2012.02542.x>

Guan, C., Wang, X., Feng, J., Hong, S., Liang, Y., Ren, B., & Zuo, J. (2014). Cytokinin antagonizes abscisic acid-mediated inhibition of cotyledon greening by promoting the degradation of abscisic acid insensitive5 protein in Arabidopsis. *Plant Physiology*, 164(3), 1515–1526. <https://doi.org/10.1104/pp.113.234740>

Gubler, F., Kalla, R., Roberts, J. K., & Jacobsen, J. V. (1995). Gibberellin-regulated expression of a myb gene in barley aleurone cells: evidence for Myb transactivation of a high-pI alpha-amylase gene promoter. *The Plant Cell*, 7(11), 1879-1891. <https://doi.org/10.1105/tpc.7.11.1879>

Hameed, R. L., & Adil, A. M. (2019). Effect of wounding, auxins and cinnamon extract on the rooting and vegetative growth characteristics of bottle brush plant (*Melaleuca viminalis* L.) cuttings. *Scientific Journal of Flowers and Ornamental Plants*, 6(2), 105–111. <https://doi.org/10.21608/sjfop.2020.70777>

Hao, B., Yang, Z., Liu, H., Liu, Y., & Wang, S. (2024). Advances in flavonoid research: Sources, biological activities, and developmental perspectives. *Current issues in molecular biology*, 46(4), 2884–2925. <https://doi.org/10.3390/cimb46040181>

Harborne, J. B., & Williams, C. A. (2000). Advances in flavonoid research since 1992. *Phytochemistry*, 55(6), 481–504. [https://doi.org/10.1016/s0031-9422\(00\)00235-1](https://doi.org/10.1016/s0031-9422(00)00235-1)

Hartley T. G. (1981). A revision of the genus *Tetradium* (Rutaceae). *Gardens' Bulletin Singapore*, 34: 91–131.

He, F., Wu, Z., Zhao, Z., Chen, G., Wang, X., Cui, X., ... & Lin, T. (2022). Drought stress drives sex-specific differences in plant resistance against herbivores between male and female poplars through changes in transcriptional and metabolic profiles. *Science of the Total Environment*, 845, 157171. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157171>

Kobyletzka, M. N., & Terek, O. I. (2017). *Plant biochemistry*. Lviv: IFNUL, 269 p. (in Ukrainian).

Kubitzki, K., Kallunki, J. A., Duretto, M., & Wilson, P. G. (2010). *Rutaceae. Flowering Plants. Eudicots*. [Eds: Klaus Kubitzki]. Berlin, Heidelberg: Springer. Series: The Families and Genera of Vascular Plants. Vol. 10. 276–356. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14397-7_16

Landi, M., Tattini, M., & Gould, K. S. (2015). Multiple functional roles of anthocyanins in plant–environment interactions. *Environmental and Experimental Botany*, 119, 4–17. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.05.012>

Levon, V. F., Skrypchenko, N. V., & Horbenko, N. Y. (2020). The seasonal dynamics of the anthocyanins content in the woody fruit vines. *Scientific Bulletin of UNFU*, 30(5), 15–19. <https://doi.org/10.36930/40300502>

Ma, H. M. (2021). Distribution, protection and utilization of wild plant resources in the primitive forest area in the north of the Great Khingan Mountains. *Special Economic Animal and Plants*, 83–84.

Meteopost. (2025). *Weather archive*. Retrieved September 25, 2025, from <https://meteopost.com/weather/archive>.

National Weather Service. (n.d.). *U.S. weather forecasts and climate data*. Retrieved October 9, 2025, from <https://www.weather.gov>

Nurlinda N., Handayani V., Rasyid F. A. (2021). Spectrophotometric determination of total flavonoid content in *Biancaea sappan* (*Caesalpinia sappan* L.) leaves. *Jurnal Fitofarmaka Indonesia*, 8(3), 1–4. <https://doi.org/10.33096/jffi.v8i3.712>

Parashchuk, O. (2025). *Tetradium Lour. (Rutaceae Juss.) in dendrological collections and genus potential for cultivation*. *Biodiversity, ecology and experimental biology*, 27(1), 6–21. <https://doi.org/10.34142/2708-5848.2025.27.1.01>

Pokhylchenko, O., Gorelov, O., Dovhalyuk, N., Kozubenko, T., Kruglyak, Y., & Parashchuk, O. (2024). Phenological observations in dendrological collections: motivation for the use of the universal coding “BBCH scale”. *Journal of Native and Alien Plant Studies*, (20), 176–197. <https://doi.org/10.37555/2707-3114.20.2024.318688>

POWO. (2025). *Plants of the World Online*. Facilitated by the Royal Botanic Gardens, Kew. Published on the Internet; <https://powo.science.kew.org/>. Retrieved October 9, 2025.

Qian, Z., He, L., & Li, F. (2024). Understanding cold stress response mechanisms in plants: an overview. *Frontiers in plant science*, 15, 1443317. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1443317>

Sadowska-Bartosz, I., & Bartosz, G. (2024). Antioxidant activity of anthocyanins and anthocyanidins: a critical review. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(22), 12001. <https://doi.org/10.3390/ijms252212001>

Skrypka, G., Levchyk, N., & Levon, V. (2018). The content of anthocyanins in the aboveground organs of *Phlox paniculata* L. plants in the conditions of the Forest-Steppe of Ukraine. *Proceedings of the III International Scientific-Practical Conference*, 60–61. (in Ukrainian).

Stewart, A. J. T., Arora, R., & Graves, W. R. (2023). Cold acclimation and deacclimation of *Ptelea* and *Zanthoxylum* (Rutaceae). *Native Plants Journal*, 24(3), 215–224. <https://muse.jhu.edu/article/920035>

Teixeira, R. T. (2022). Cork development: What lies within. *Plants*, 11(20), 2671. <https://doi.org/10.3390/plants11202671>

Zhang, B., Zou, H., Chen, B., Zhang, X., Kang, X., Wang, C., & Zhang, X. (2023). Optimizing the distribution pattern of species under climate change: The protection and management of *Phellodendron amurense* in China. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11, 1186627. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1186627>