

ВМІСТ ПІГМЕНТІВ У ХВОЇ *PICEA ABIES* І *PICEA PUNGENS* В УМОВАХ ПРОМИСЛОВОГО М. КРИВИЙ РІГ

Федорчак Е.Р.

Криворізький ботанічний сад Національної академії наук України
вул. Маршака, 50, 50089, м. Кривий Ріг
huseinova93@gmail.com

Криворізький регіон із металургійним і гірничо-збагачувальними комбінатами характеризується інтенсивним техногенним навантаженням, виділенням пилу й отруйних газів. Під дією шкідливих викидів: діоксиду сірки, оксиду вуглецю, сірководню, оксиду азоту – відбувається забруднення атмосфери, що негативно впливає на стан рослин. Досліджено фотосинтетичні пігменти хвої *Picea abies* та *P. pungens* в насадженнях, що зазнають різнорівневого аеротехногенного впливу в потужному промисловому центрі Степової зони України – Кривому Розі. Проаналізовано вміст пігментів у хвої другого року життя 30–40-річних дерев обох видів із 8-ти моніторингових ділянок. Показано динаміку вмісту хлорофілів *a*, *b* та каротиноїдів у шпильках протягом п'яти місяців вегетаційного періоду 2017 року. Зазначено, що у хвої *P. abies* та *P. pungens* на всіх ділянках із травня по вересень знижується вміст хлорофілу *a* (до 27,2% та 25,0% відповідно) та хлорофілу *b* (до 17,9% та 20,0% відповідно) порівняно з фоновою територією. Водночас збільшується концентрація каротиноїдів, що виконують захисну функцію в реакціях фотосинтезу – відповідно до 26,1% та 24,0%. Доведено, що найпотужнішого негативного впливу зазнають насадження від промислового забруднення (біля ПРАТ «ПівніГЗК» і ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг») та викидів автомобілів (на вул. Черкасова, на вул. Ватутіна та на проспекті Металургів), у хвої яких спостерігали появу мінімальних і рідше максимальних показників вмісту пігментів. Особливо зниження концентрації пігментів у хвої обох ялин спостерігається на проспекті Металургів порівняно з вул. Черкасова та вул. Ватутіна, де показники знижувались щодо контролю, проте здебільшого різниці не суттєва. Отримані результати свідчать про доцільність використання пігментних комплексів *P. abies* та *P. pungens*, які мають чутливий асиміляційний апарат щодо пошкодження аерополітантами, як біоіндикаторів стану повітряного середовища. *Ключові слова*: хвойні рослини, біоіндикатори, хвоя, хлорофіли *a* і *b*, каротиноїди, аерополітанти.

Content of pigments in needles of *Picea abies* and *Picea pungens* in conditions of industrial Kryvyi Rih city. Fedorchak E.

The Kryvyi Rih region, with its metallurgical and mining-and-processing combines, is characterized by intense technogenic pressure, dust and poisonous gas emissions. Under the influence of harmful emissions (sulfur dioxide, carbon monoxide, hydrogen sulfide, nitrogen oxide), pollution occurs in the atmosphere, which adversely affects the plant health condition. We studied photosynthetic pigments in needles of *Picea abies* and *P. pungens* in plantings exposed to aerotechnogenic influence of various levels in the big industrial center of steppe zone of Ukraine (Kryvyi Rih). We analyzed the pigment content in needles of the second year of life sampled from 30–40-year-old trees of both species in 8 monitoring sites. The paper shows the content changes for chlorophylls *a* and *b* as well as carotenoids in the needles during five months of growing season of year 2017. For the needles of *Picea abies* and *P. pungens* from all the sites, we noticed the decreasing content of chlorophyll *a* (to 27.2% and 25.0% respectively) and chlorophyll *b* (to 17.9% and 20.0% respectively) from May till September, in comparison with background territory. At the same time, content of carotenoids performing the protective function in photosynthetic reactions increased up to 26.1% and 24.0% respectively. It is shown that the most intensive negative influence on plantings is caused by industrial pollution (near Private JSC “Northern Ore Dressing Works” and Public JSC “ArcelorMittal Kryvyi Rih”) and exhaust gases (in the Cherkasov Street, in the Vatutina Street and Metallurgists Avenue): the minimum or, more rarely, the maximum rates of pigment content appeared in needles of the plants exactly from these sites. The most significant decreasing pigment concentrations in needles of both spruce species are noticed in the Metallurgists Avenue in comparison with the Cherkasov Street and the Vatutina Street, where indicators fell relative to control, but, in most cases, the difference is statistically unreliable. Our research results demonstrate the feasibility of using the pigment complexes of *Picea abies* and *P. pungens*, with the assimilative apparatus sensitive to air pollution damage, as indicators of air environmental conditions. *Key words*: coniferous plants, indicators, needles, chlorophylls *a* and *b*, carotenoids, aeropollution.

Постановка проблеми. В Європі та у світі Україна виділяється серед інших країн своїми великими родовищами заліза, запаси яких становлять 54% [4]. Під час видобутку залізної руди в атмосферу потрапляють різні види забруднюючих речовин, серед яких найбільш поширені – це пил, діоксид сірки, оксид вуглецю, сірководень, оксид азоту та інші [4; 13]. Особливо актуальна ця проблема для промислових міст Степової зони України, де в окремих промислових районах екологічний стан характеризується як кризовий. Велику роль у покращенні умов середовища відіграють зелені насадження [1; 5].

Проте вони швидко реагують на наявність у повітрі навіть малих доз токсичних речовин, пошкоджуються твердими частками промислових викидів, які у людей і тварин не спричиняють видимих наслідків. Тому рослини вважають найкращими індикаторами навколишнього середовища [14].

Актуальність дослідження. У Кривому Розі, де річний об'єм викидів підприємств за 2011 рік становив 358,6 тис. тон, дослідження впливу токсичних речовин на рослини мають стати невіддільним складником екологічного моніторингу [3]. Останнім часом саме види родини *Pinaceae* пропонують використовувати

як біоіндикатори аеротехногенного забруднення [1; 14]. На Криворіжжі поширеними в озелененні представниками хвойних є *Picea abies* (L.) Karst. та *Picea pungens* Engelm., які зростають у поодиноких, рядових, групових і куртинних типах насаджень, що робить їх зручними тест-системами для біоіндикації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для оцінки стану міських насаджень необхідна рання діагностика життєдіяльності деревостанів, що в короткі терміни дає змогу отримати повну інформацію про ступінь техногенного впливу на них. Передусім пошкодження хвойних проявляються на фізіолого-біохімічному рівні, потім поширюються на ультраструктурний і клітинний рівні [6]. Така сприйнятливність пояснюється тим, що більшість важливих фізіологічних процесів здійснюється в асиміляційному апараті, який служить центром варіабельності або пластичності організму [10]. Відомо, що одним із біохімічних показників реакції рослин на зміну факторів зовнішнього середовища, ступеня їх адаптації до нових екологічних умов є вміст хлорофілів і каротиноїдів – головних фоторецепторів фотосинтезуючої клітини [13]. Широко вживаним показником для індикації пошкодження хвої, спричиненого дією забруднюючих повітря речовин, є зниження вмісту хлорофілу та збільшення кількості каротиноїдів [12]. У літературі зарубіжних і вітчизняних учених широко обговорюється фізіологія впливу шкідливих викидів промислових підприємств та автотранспорту на пігментний вміст хвойних [1; 11–13].

Слід зазначити, що дослідження пігментного комплексу хвойних рослин в умовах високої загазованості (м. Іжевськ) показали, що *P. pungens* характеризується як більш стійкий вид порівняно з *P. abies* через підвищений вміст хлорофілу *a* [11]. Проте низка дослідників [15] зазначає, що хвоя *P. abies* та *P. pungens* має однаковий ступінь пошкодження у відповідь на забруднення атмосферного повітря, а кількість пігментів у останнього виду, навпаки, була меншою. Тому актуально порівняти пігментний комплекс та його вміст в обох видів ялин протягом вегетаційного періоду, що дасть можливість оцінити реакцію рослин на дію техногенного забруднення.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. В процесі моніторингу атмосферного повітря не досить уваги приділяється використанню хвойних насаджень міста для дослідження змін їхнього пігментного комплексу під впливом техногенного навантаження.

Новизна. Дослідження пігментного комплексу хвої видів роду *Picea* – *P. abies* та *P. pungens*, поширених у насадженнях м. Кривий Ріг, досі не проводилися, тому отримані нами дані започатковують моніторингові спостереження сезонної динаміки вмісту пігментів у хвойних залежно від різних умов зростання.

Методологічне або загальнонаукове значення. Результати наукової роботи дають змогу

виявити особливості сезонної динаміки вмісту фотосинтетичних пігментів і порівняти їхню кількість в асиміляційному апараті видів *P. abies* та *P. pungens* в насадженнях із різним рівнем аеротехногенного впливу в умовах великого промислового міста у межах Степової зони.

Матеріали та методи досліджень. Матеріалом для досліджень слугувала хвоя другого року життя 30–40-річних дерев *P. abies* та *P. pungens*, яка відбиралася протягом вегетаційного періоду 2017 р. Досліджувалася форма з блакитно-зеленою хвоєю (*P. pungens* “Glausa”), оскільки саме вона набула значного поширення в озелененні як Кривого Рогу, так і інших міст України [2].

Методично доцільним вважається використання для дослідів хвої саме такого віку, яка, з одного боку, вже повністю розвинена і стабільна, а з іншого – не демонструє жодних симптомів старіння [17]. Особливості початкового періоду розвитку хвої, яка відбиралася для аналізів, визначали погодні умови вегетаційного періоду 2017 року. Температура повітря щодо багаторічних середньомісячних показників фактично була в нормі: 15,5°C (травень) – 24,4°C (серпень). Максимальне відхилення температури від норми перевищувало багаторічні показники на +3,2°C в серпні. Найбільша вологість повітря була в липні та становила 86%, найменша – 42% (у червні) (<http://www.pogodaiklimat.ru>). Посушливі періоди чергувалися з дощовими. Кліматичних аномалій, здатних суттєво змінити вихідні пропорції вмісту окремих компонентів у пігментному комплексі, не спостерігалось.

Основні 8 моніторингових насаджень були розташовані у трьох районах міста: Металургійному, Покровському та Тернівському (рис. 1). Перші три насадження розташовані на відносно малозабруднених аерополітантами ділянках – дендрарію Криворізького ботанічного саду НАН України (КБС) (ділянка 1, контроль), парку «Шахтарський» (ділянка 2) і парку Героїв АТО (ділянка 3). Наступні три – біля проїзної частини з високою інтенсивністю автотранспортного руху на вул. Черкасова (ділянка 4), на вул. Ватутіна (ділянка 5) і, особливо, на проспекті Металургів (ділянка 6), де кількість автомобілів за одну годину утричі більша порівняно з вул. Черкасова та вдвічі – порівняно з вул. Ватутіна. Найвища концентрація аеротехногенних викидів спостерігається на ділянках 7 – поблизу ПрАТ Північного гірничо-збагачувального комбінату («ПівніГЗК») та 8 – біля металургійного гіганта ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Хвою *P. abies* і *P. pungens* збирали по 5 зразків із 10 дерев із кожної ділянки. Для визначення вмісту пігментів брали середню пробу в п'ятикратній повторюваності: до 0,1 г подрібненого рослинного матеріалу додавали 2 мл диметилсульфоксиду (ДМСО), а потім три години витримували на водяній бані за температури 67°C. В отриманому екстракті проводили

вимірювання за допомогою спектрофотометра СФ-2000 за довжини хвилі 665 і 649 нм – для хлорофілів *a* і *b* відповідно, 480 нм – для каротиноїдів. Вміст пігментів обчислювали за такими формулами:

$$C_a = 12,19 \times A_{665} - 3,45 \times A_{649};$$

$$C_b = 21,99 \times A_{649} - 5,32 \times A_{665};$$

$$C_{\text{кар}} = (1000 \times A_{480} - 2,14 \times C_a - 70,16 \times C_b) / 220,$$

де C – концентрація пігментів, мг/мл [16].

Статистичний аналіз проводили за допомогою Microsoft Office Excel 2003. Для порівняння двох незалежних вибірок ми використовували *t*-критерій Стьюдента (за $P < 0,05$).

Виклад основного матеріалу. Для ранніх проявів стресового стану рослин під дією забруднення на фізіолого-біохімічному рівні найчастіше використовують показники вмісту хлорофілу *a* і *b*, які є чутливими до дії аерополітантів.

Максимальний вміст хлорофілу *a* у хвої *P. abies* та *P. pungens* був зазначений у травні (1,04 мг/г сирої речовини та 1,24 мг/г сирої речовини) на відносно «чистій» ділянці (контроль) (рис. 2), що в середньому на 16,3% та 20,6% більше порівняно з насадженнями біля промислових підприємств. Дещо менші виявлено відмінності у рослин *P. abies* та *P. pungens*, що зростали біля автошляхів, які в середньому були на 12,2% та 15,1% нижче, ніж у КБС.

Найбільша кількість хлорофілу *a* у хвої *P. abies* та *P. pungens* в травні спостерігалася й іншими дослідниками [1; 7; 12]. Це пояснюється достатньою кількістю опадів на початку вегетації та оптимальною для розвитку рослин температурою повітря, яка різко підвищується в наступні місяці.

Найменші показники хлорофілу *a* у двох видів *P. abies* та *P. pungens* зафіксовано в насадженнях Металургійного району (на 40 км південніше КБС НАН України). У рослин *P. abies* та *P. pungens* біля «АрселорМіттал Кривий Ріг» в останньому місяці вегетаційного періоду кількість хлорофілу *a* дорівнювала 0,58 мг/г сирої речовини та 0,70 мг/г сирої речовини, що на 21,6% та 29,3% достовірно менше порівняно з деревами ботанічного саду. В насадженнях на проспекті Металургів хвоя обох видів ялин містила на 10,1% та 10,6% менше хлорофілу *a*, порівняно з аналогічними показниками дерев, що зростали на вул. Черкасова та на 7,5% і 8,4% менше порівняно з рослинами на вул. Ватутіна. Така тенденція спостерігалася і в насадженнях парку Героїв АТО, де значення були меншими, порівняно з деревами парку «Шахтарський» та насадженнями ботанічного саду. Очевидно, що негативний вплив на вміст фотосинтезуючих пігментів здійснюють викиди автомобілів і металургійного комбінату «АрселорМіттал Кривий Ріг». Суттєвим є вплив і природних факторів: температури повітря, кількості опадів, що залежить від географічного розташування. Менша кількість атмосферних опадів у південних районах міста спричинює затримку нормального розвитку асиміляційного апарату, що відобра-



Рис. 1. Картошка регіону Кривого Рогу, на якій зображено ділянки, що досліджувалися

жається на кількості пігментів. Такі зміни є відповідною реакцією рослин до комплексного впливу екологічних факторів. В умовах стресу зниження пігментів зазначають й інші дослідники [1; 12].

Під час досліджень протягом п'яти місяців зазначено в більшості випадків достовірно зниження показників хлорофілу *a* у рослин обох видів біля доріг і промислових підприємств, особливо у *P. abies*. У хвої *P. pungens* в насадженнях міста спостерігалася відносна стабільність вмісту хлорофілу *a*, а також більш висока його концентрація, ніж у *P. abies*, яка чутливіше реагує на техногенний вплив.

До складу хлоропластів рослин також входить хлорофіл *b*, що переносить засвоєну ним енергію на хлорофіл *a* [17]. Максимум накопичення хлорофілу *b* у *P. abies* та *P. pungens* спостерігався у травні в КБС (0,41 мг/г сирої речовини та 0,50 мг/г сирої речовини), що в середньому більше на 9,8% та 18,0% порівняно з деревами, що зростали біля промислових підприємств та вище на 4,9% та 14,0%, ніж у пришляхових насадженнях відповідно (рис. 3). Близькі до отриманих нами показники вмісту хлорофілу *b* у хвої *P. abies* (0,37 мг/г сирої речовини) та у *P. pungens* (0,51 мг/г сирої речовини), отримані М.С. Тіговою (дендрарій м. Уссурійськ) [7; 8].

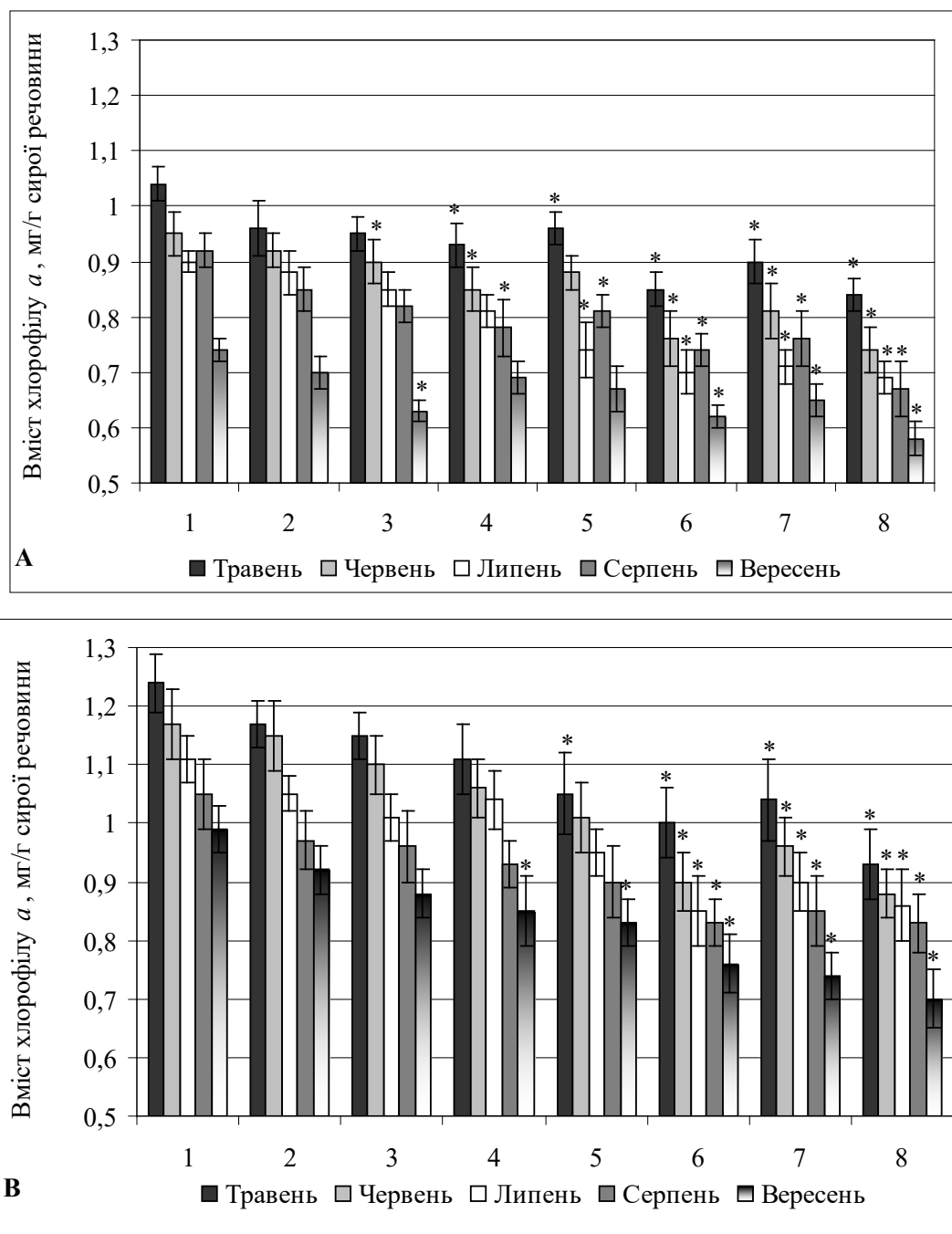


Рис. 2. Кількісний вміст хлорофілу *a*, мг/г сирої речовини у видів *Picea abies* (А) та *Picea pungens* (В) з різних насаджень м. Кривий Ріг (1–8 – ділянки; $n = 5$; * – значення достовірно відрізняються від контролю за $P < 0,05$)

Вміст хлорофілу *b* у мінімальній кількості виявлений у хвої *P. abies* та *P. pungens* у вересні біля комбінату «АрселорМіттал Кривий Ріг» (0,29 мг/г сирої речовини та 0,33 мг/г сирої речовини), що на 14,7% та 21,4% менше порівняно з рослинами ботанічного саду. Протягом п'яти місяців спостерігалось не суттєве збільшення хлорофілу *b* у хвої насаджень обох видів ялин у міру їх віддалення від автомобільних і промислових викидів гірничо-збагачувального та металургійного комбінатів. З окремих публікацій відомо, що забруднюючі речовини послаблюють накопичення

хлорофілу *b* більшою мірою, ніж хлорофілу *a*, що може зменшити активність фотосинтетичного апарату та порушити метаболізм рослин [9; 12]. Проте інші дослідники [5; 11], навпаки, наголошують на переважанні кількісних змін вмісту хлорофілу *a* в пігментному комплексі хвойних на урбанізованих територіях; вміст же хлорофілу *b* залишається відносно стабільним. У нашому випадку підтверджується другий варіант динамічних змін пігментного комплексу: зі збільшенням рівня забруднення міського середовища помітніше знижується кількість хлорофілу *a*, ніж *b*.

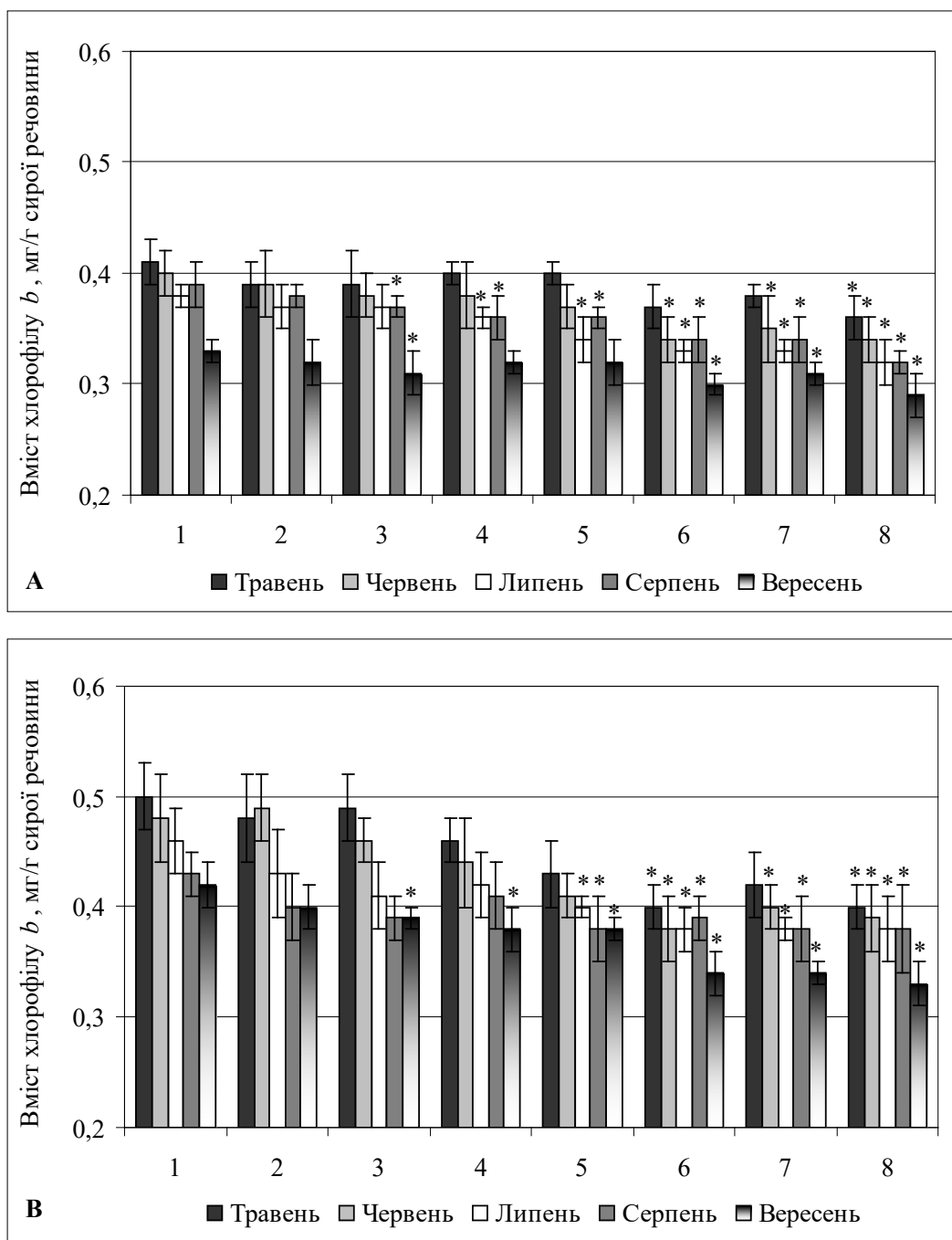


Рис. 3. Кількісний вміст хлорофілу *b*, мг/г сирої речовини у видів *Picea abies* (А) та *Picea pungens* (В) з різних насаджень м. Кривий Ріг (1–8 – ділянки; $n = 5$; * – значення достовірно відрізняються від контролю за $P < 0,05$)

Дискусійними також виявилися дані, які стосуються ступеня стійкості фотосинтетичного апарату різних видів хвойних до впливів несприятливих чинників. Якщо низка дослідників [15] зазначає, що у двох видів ялин (*P. abies* та *P. pungens*) спостерігаються однакові наслідки пригнічення функціонування пігментного комплексу під дією токсикантів, то ми маємо підстави вказувати на кращу адапційну збалансованість вмісту пігментів у *P. pungens*.

Обов'язковим компонентом пігментної системи рослин є каротиноїди. Їх кількість у хвої дерев обох

видів роду *Picea* протягом п'яти місяців змінювалась від 0,20 до 0,34 мг/г сирої речовини; концентрація підвищувалася відповідно до збільшення рівня забруднення (рис. 4). Наприклад, найбільший їх вміст – 0,32 та 0,34 мг/г сирої речовини – спостерігається у хвої *P. abies* та *P. pungens* у вересні біля «АрселорМіттал Кривий Ріг», що на 18,5% та 21,4% більше порівняно з деревами КБС. Близькі значення були у рослин обох видів біля ПрАТ «ПівнГЗК» та біля автошляхів, що свідчить про їхню захисну реакцію на забруднювачі атмосферного повітря.

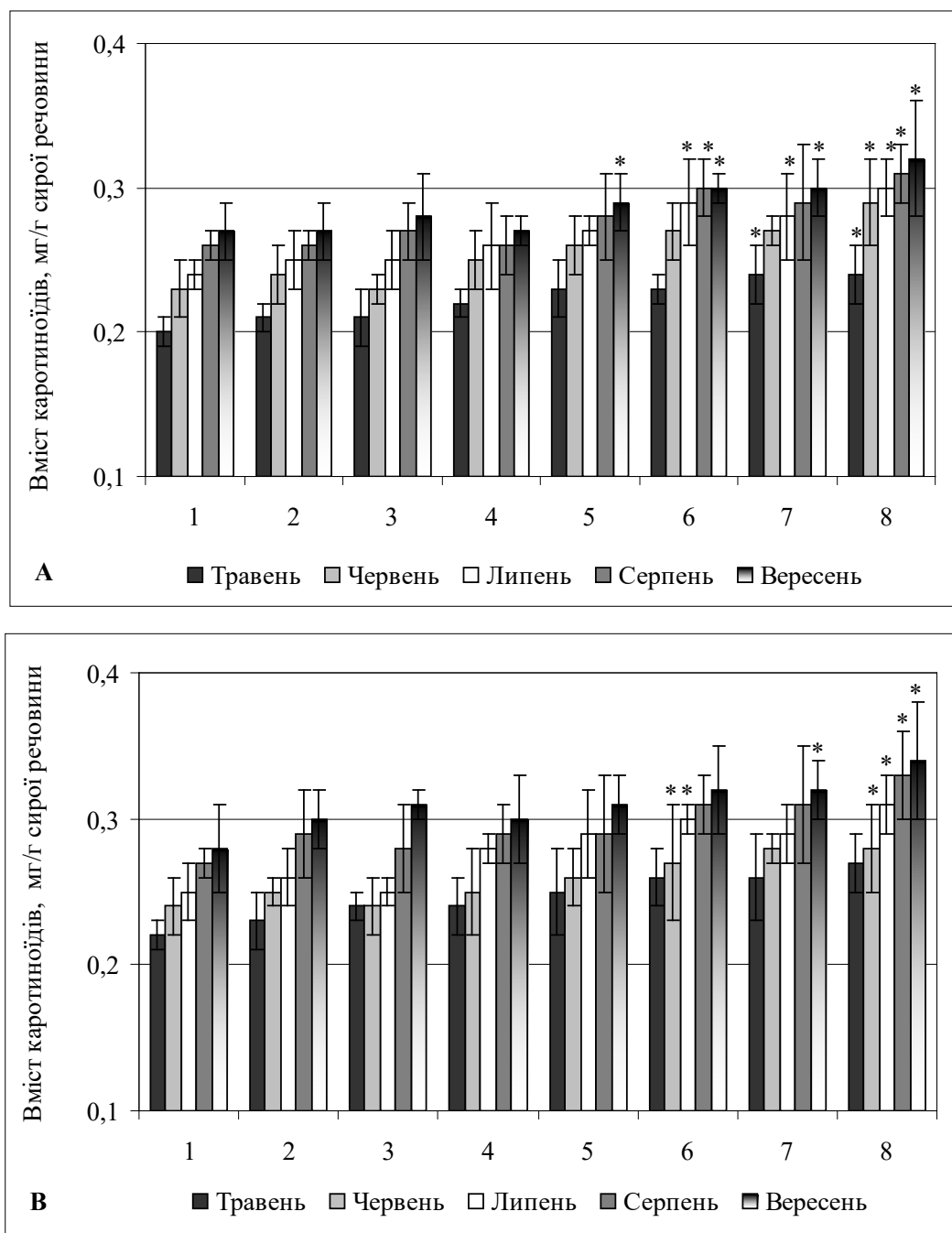


Рис. 4. Кількість каротиноїдів у хвої *Picea abies* (A) та *Picea pungens* (B) із різних насаджень м. Кривий Ріг (1–8 – ділянки; n = 5; * – значення достовірно відрізняються від контролю за $P < 0,05$)

Найменша кількість каротиноїдів у хвої дерев *P. abies* та *P. pungens* зафіксована на всіх ділянках у травні, особливо у рослин із насаджень КБС (0,20 мг/г сирової речовини та 0,22 мг/г сирової речовини). Протягом п'яти місяців зазначено несуттєву різницю вмісту каротиноїдів у видів роду *Picea* між дослідженими ділянками.

Вміст каротиноїдів у хвої інтродуцента *P. abies* з дендрарію м. Уссурійськ, де повітря можна вважати відносно «чистим», становив 0,19–0,22 мг/г сирової речовини [8]. У хвої дерев цього ж виду з насаджень

м. Осік в умовах атмосферного забруднення цементним пилом цей показник становив 0,21–0,25 мг/г сирової речовини [12]. Суттєво більших величин цей показник досягав біля автошляхів м. Дніпро у хвої *P. pungens*: 0,20–0,37 мг/г сирової речовини [1]. Такі дані, загалом, збігаються з нашими, які отримано під час досліджень на Криворіжжі. Ми вважаємо, що в нашому випадку збільшення вмісту каротиноїдів у пігментних комплексах дерев біля промислових підприємств та автошляхів, порівняно з об'єктами на малозабруднених ділянках, є їхньою захисною реакцією на техногенний вплив.

Діапазон умісту пігментів у фотосинтетичному апараті хвойних протягом року залежить від кліматичних умов і екологічних факторів урботехногенного середовища, а також від географічного положення. Наприклад, зменшення показників пігментів спостерігалось у Металургійному районі, що розташований у південній частині міста, де до того ж розташований металургійний комбінат – «рекордсмен» серед джерел забруднення повітряного басейну.

Отже, результати проведених нами досліджень впливу забруднення атмосфери викидами автомобілів і техногенними токсикантами промислових підприємств на пігментний комплекс хлорофілу хвойних рослин у насадженнях м. Кривий Ріг показали, що зі збільшенням рівня концентрації аерополітантів відбуваються суттєві зміни в кількості пігментів.

Головні висновки. Результати проведених досліджень показали, що промислові та автотранспортні викиди аерополітантів у м. Кривий Ріг значно впливають на пігментний комплекс хвої *P. abies* та *P. pungens*. Зазначено зниження вмісту хлорофілів *a* та *b* у хвої обох досліджених видів роду *Picea* протягом п'яти місяців порівняно з контрольною «чистою» територією. При цьому біль-

шою мірою зменшується кількість хлорофілу *a*, ніж хлорофілу *b*. Виявлено, що вміст хлорофілів *a* та *b* у хвої *P. abies* та *P. pungens* протягом вегетаційного періоду збільшувався за віддалення насаджень від промислових підприємств та автошляхів, досягаючи максимумів показників у травні, а мінімальних – у вересні, що пояснюється зниженням інтенсивності роботи фотосинтетичного апарату та несприятливим зниженням температури повітря. Встановлено, що зі збільшенням рівня забруднення вміст каротиноїдів зростає, що пов'язано з їхньою захисною функцією. Виявлено, що у *P. abies* вміст усіх пігментів має менші величини, ніж у *P. pungens*, що свідчить про більш стійкий асиміляційний апарат останньої.

Перспективи використання результатів дослідження. Оперативна реакція рослин на стрес, яка відбувається на фізіолого-біохімічному рівні, в короткі терміни дає змогу отримати повну інформацію про ступінь техногенного впливу на них. У зв'язку з вищенаведеним пропонується використовувати пігментні комплекси *P. abies* та *P. pungens* для оцінки стану забруднення повітряного середовища як цілорічно доступних біоіндикаторів.

Література

1. Бессонова В.П., Пономарьова О.А. Морфометричні показники та вміст пластидних пігментів хвої *Picea pungens* Engelm. залежно від відстані до автошляху. *Biosystems Diversity*. 2017. № 25 (2). С. 96–101. DOI: 10.15421/01171.
2. Білик О.В. Ялина колюча (*Picea pungens* Engelm.) у насадженнях Національного дендропарку «Софіївка» НАН України (інтродукція, розмноження, культивування). *Науковий вісник НЛТУ України*. 2006. № 16 (1). С. 44–48.
3. Гришко В.М., Шишиков Д.В., Пісковата О.М., Данильчук О.В., Mashtaler N.V. Важкі метали: надходження в ґрунти, переміщення в рослинах та екологічна небезпека. Донецьк: «Донбас», 2012. 304 с.
4. Кучеров К.І., Овчиннікова Н.Б. Сучасні проблеми екологічної безпеки гірничо-збагачувальних комбінованих робіт з навколишнього середовища. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна*. 2009. № 849. С. 90–96.
5. Сергейчик С.А. Эколого-физиологический мониторинг устойчивости сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в техногенной среде. *Биосфера*. 2015. Т. 7. № 4. С. 384–391.
6. Старикова Е.А., Воскресенская О.Л., Сарбаева Е.В. Изменение пигментного комплекса ели колючей в условиях городской среды. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2016. № 10 (52). С. 45–48. DOI: 10.18454/IRJ.2016.52.044.
7. Титова М.С. Особенности фотосинтезирующей активности хвои интродуцированных видов *Picea* A. Dietr. в дендрарии горнотаежной станции. *Фундаментальные исследования*. 2013. № 11. С. 128–132.
8. Титова М.С. Содержание фотосинтетических пигментов в хвое *Picea abies* и *Picea koraiensis*. *Вестник ОГУ*. 2010. № 12 (118). С. 9–12.
9. Тужилкина В.В., Ладанова Н.В., Плюснина С.Н. Влияние техногенного загрязнения на фотосинтетический аппарат сосны. *Экология*. 1998. № 2. С. 89–93.
10. Шуберт Р. Биоиндикация загрязнений наземных экосистем. Москва: «Мир», 1988. 348 с.
11. Bukharina I.L., Vedernikova K.E., Pashkova A.S. Morphophysiological traits of spruce trees in conditions of Izhevsk. *Forest Studies*. 2016. № 2. P. 96–106. DOI: 10.1134/S1995425516070027.
12. Lepedus H., Cesar V., Suver M. (2003). The annual changes of chloroplast pigments content in current- and previous-year needles of Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) exposed to cement dust pollution. *Acta Botanica Croatica*. 2003. № 62 (1). P. 27–35.
13. Mikhailova T.A., Afanasieva L.V., Kalugina O.V., Shergina O.V., Taranenko E.N. Changes in nutrition and pigment complex in pine (*Pinus sylvestris* L.) needles under technogenic pollution in Irkutsk region, Russia. *Journal of Forest Research*. 2017. № 22. P. 386–392. DOI: 10.1080/13416979.2017.1386020.
14. Mosseler A., Major J.E., Simpson J.D., Daigle B., Lange K., Park Y.S., Johnsen K.H., Rajora O.P. Indicators of population viability in red spruce, *Picea rubens*. I. Reproductive traits and fecundity. *Canadian Journal of Botany*. 2001. № 78 (7). P. 928–940. DOI: 10.1139/b00-065.
15. Soukupova J., Rock B.N., Albrechtova J. Comparative study of two spruce species in a polluted mountainous region. *New Phytologist*. 2001. № 150 (1). P. 133–145. DOI: 10.1046/j.1469-8137.2001.00066.x.
16. Wellburn A.R. The spectral determination of chlorophyll *a* and *b*, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *Journal of Plant Physiology*. 1994. № 144. P. 307–313. DOI: 10.1016/S0176-1617(11)81192-2.
17. Zarek M. Seasonal fluctuations of photosynthetic pigments content in *Taxus baccata* needles. *Dendrobiology*. 2016. № 76. P. 13–24. DOI: 10.12657/denbio.076.002.