

<https://doi.org/10.15407/frg2025.04.316>

УДК 57.04+504

ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ НІТРАТУ НІКЕЛЮ НА РІСТ РОСЛИН ГІРЧИЦІ БІЛОЇ (*SINAPIS ALBA* L.) В УМОВАХ IN VITRO

Н.А. МАТВЄЄВА, В.П. ДУПЛІЙ, Т.А. БОГДАНОВИЧ, М.В. КУЧУК

Інститут клітинної біології та генетичної інженерії Національної академії наук України

03143 Київ, вул. Академіка Заболотного, 148

e-mail: dupliyv@icbge.org.ua

Забруднення ґрунтів токсичними металами є дедалі більшою екологічною загрозою у світовому масштабі. Підвищення концентрації металів у ґрунті порушує природні біогеохімічні цикли, що спричинює погіршення умов для росту рослин. Саме тому аналіз толерантності рослин до різних видів забруднення, визначення особливостей фізіологічних змін і способів адаптації є одним з напрямів сучасної біології. Ми досліджували особливості впливу нітрату нікелю на ріст рослин гірчиці білої (*Sinapis alba* L.) в умовах in vitro, включно етапи проростання насіння та пролонгований період вегетації за наявності Ni(II) у середовищі. Насіння пророщували у чашках Петрі на середовищі Мурасіге та Скуга зі зменшеним удвічі вмістом усіх компонентів, до якого додавали Ni(II) у концентраціях 5 та 10 мг/л. Ріст рослин після проростання насіння аналізували, вирощуючи проростки у пластикових ємностях з перфорованою основою у комірках для контакту коренів з середовищем. Порівнювали масу сирової речовини коренів і пагонів контрольних та експериментальних рослин. Вміст Ni(II) аналізували за реакцією з диметилглюксимом. Стійкість/чутливість рослин визначали за індексом толерантності (TI) для коренів (TI_к) і пагонів (TI_п) окремо та факторами біоконцентрації (mBCF та BCF_г). Маса сирової речовини надземної частини проростків за короткотермінової (7 діб) дії металу була вдвічі меншою, ніж у контролі, маса сирової речовини коренів зменшувалась у 22,78 раз. Експеримент з укорінення пагонів упродовж двох тижнів показав майже повне пригнічення коренеутворення (TI_к становив 0,31±0,10 та 0,05±0,01) і значне зменшення приросту маси сирової речовини пагонів (TI_п становив 0,66±0,14 та 0,23±0,02) для 5 та 10 мг/л Ni(II) відповідно. При вирощуванні пророслого насіння впродовж довшого періоду (два тижні) за наявності у середовищі 5 і 10 мг/л Ni(II) спостерігали зменшення маси сирової речовини пагонів до 144,80±12,38 та 84,33±7,66 мг порівняно з контролем (172,33±8,83), а також значне зменшення маси сирової речовини кореневої системи (32,40±5,89 і 4,33±0,76 мг) порівняно з контролем (54,00±1,73 мг). Індекс толерантності пагонів був значно меншим за використання Ni(II) у концентрації 10 мг/л (TI_п = 0,49±0,05) порівняно з TI_п варіанта з додаванням 5 мг/л Ni(II) у середовище (TI_п = 0,84±0,08). Зменшення індексу толерантності коренів спостерігали за наявності високої концентрації Ni(II) у середовищі (TI_к = 0,08±0,01 порівняно з TI_к = 0,60±0,11 за 5 мг/л Ni(II) у середовищі). Отже, пролонгована дія Ni(II) призводила до пригнічення росту не лише коренів,

Цитування: Матвєєва Н.А., Дуплій В.П., Богданович Т.А., Кучук М.В. Особливості впливу нітрату нікелю на ріст рослин гірчиці білої (*Sinapis alba* L.) в умовах in vitro. *Фізіологія рослин і генетика*. 2025. 57, № 4. С. 316–330. <https://doi.org/10.15407/frg2025.04.316>

а й пагонів рослин. Таким чином, хоча рослини гірчиці білої здатні вилучати нікель з середовища й накопичувати його ($91,05 \pm 8,65$ мкг/г сирової речовини), їх не можна визнати стійкими до дії металу, оскільки модифікований фактор біоконцентрації металу (mBCF) не перевищував одиниці, а BCF_T становив $0,19 \pm 0,03$, тобто коренева система зазнавала значного інгібування. Внаслідок цього рослини *Sinapis alba* L. не можуть бути використані для фіторе mediaції забруднених нікелем ґрунтів як фітоекстрактори.

Ключові слова: *Sinapis alba* L., Ni(II), токсичність, фітоекстракція.

Важкі метали є природними компонентами ґрунту. Однак через роботу промислових підприємств, збільшення використання добрив і пестицидів у сільському господарстві, видобуток корисних копалин та інші чинники їх концентрація може зростати до токсичних рівнів. За наявними даними значні площі сільськогосподарських угідь вже забруднені токсичними металами. Зокрема, близько 20 млн га з економічним впливом у розмірі 10 млрд доларів США на рік є місцями забруднення важкими металами [1]. Результатом такого збільшення вмісту металів у ґрунтах стає порушення природних біогеохімічних циклів, що спричинює погіршення умов для росту рослин.

Нікель є ультрамікроелементом, важливим для функціонування клітин. Він необхідний для підтримання фундаментальних фізіологічних процесів, (газообмін, вміст фотосинтетичних пігментів, ріст, стійкість до патогенів тощо). Крім того, нікель є важливим елементом для активності низки ферментів. Зокрема, у вищих рослин він відіграє роль в активному центрі ферменту уреазу, а також працює в активних центрах ферментів (гідрогеназ, супероксиддисмутази) мікроорганізмів [2–4]. Нікель зустрічається в природних умовах у мінімальних концентраціях. У ґрунті він зазвичай наявний у формі іонів Ni^{2+} та $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ [1]. Його вміст, як повідомлялося, становить від 0,2 до 450 мг/кг [5]. Однак в останні десятиліття спостерігається поступове та часом значне збільшення вмісту нікелю у ґрунтах через антропогенне забруднення [6]. Таке збільшення негативно впливає на ріст рослин, оскільки метал може проникати у клітини прокариотів за наявності специфічних способів транспорту, наприклад, специфічних транспортерів [7, 8], внаслідок активного транспорту протеїнами та іншими метаболітами (гістидин, нікотінамін, органічні кислоти) або пасивним транспортом катіонною транспортною системою [7, 9–11]. Нікель може абсорбуватися та хелатуватися в тканинах коренів рослин, переноситися з кореня до пагона через судинний транспорт, а також розподілятися у тканинах стебла й листків [1]. Ni(II) у клітинах кореня може хелатуватися, зокрема, амінокислотами, пептидами, малатом і цитратом. Нехелатована частина транспортується через судинну систему, потрапляючи у ксилему і далі у клітини листків, де може компартментуватися, наприклад, у вакуолі [5]. Надмірні концентрації нікелю призводять до порушень функціонування клітин рослин, що виражається у пригніченні росту коренів, хлорозі, порушенні метаболізму та навіть загибелі рослин [3, 5, 12–14].

Хоча Ni(II) у підвищеній концентрації токсичний, деякі рослини можуть зростати, незважаючи на негативну дію такого стресового фактора. Такі рослини можуть бути використані для очищення забруднених нікелем територій і, таким чином, для зменшення навантаження на навколишнє середовище з метою мінімізації небезпечного впливу токсичної сполуки на природні екосистеми. Використання рослин для ремедіації ґрунтів є економічно ефективним, екологічно чистим та не додає вторинного забруднення. За фіторемердіації уможливорюється процес фітостабілізації металу внаслідок накопичення його в підземних частинах рослин [15], а також фітоекстракції, за якої токсичний метал вилучається з ґрунту, транспортуючись в надземну частину рослини [16]. Відомо про застосування рослин різних видів для фітоекстракції нікелю з ґрунту. Зокрема, такі як *Alyssum*, *Sorghum*, *Peltaria*, *Thlaspi*, *Brassica* та *Bornmuellaria* були визначені як гіперакумулятори Ni(II) [1, 17, 18]. Разом з тим з'ясування особливостей впливу рослин інших видів дає змогу розширити рамки знань стосовно дії Ni(II) на рослини, їхню здатність адаптуватися та вилучати токсичний метал з середовища.

Метою нашого дослідження було порівняльне визначення впливу нітрату нікелю ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) на рослини *Sinapis alba* L. на первинному етапі росту, а саме на стадії проростання насіння та формування проростків як за умови постійної наявності токсичного агента з початку висіву, так і за додавання сполуки лише після проростання насіння. Дослідження було проведено в умовах *in vitro* для уникнення можливої детоксикації металу мікроорганізмами ґрунту та впливу специфічних компонентів ґрунту на процес проростання насіння в умовах наявності токсичного металу.

Методика

Пророщування рослин за наявності нікелю. Визначали чутливість насіння рослин гірчиці білої (*Sinapis alba* L.) до сполуки нікелю у формі $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ в умовах *in vitro*. Для цього поверхню насіння стерилізували з використанням 2 %-го розчину «Полідез» (ТОВ НТЦ «Вербена»), промивали стерильною деіонізованою водою та розміщували на фільтрувальному папері у чашках Петрі з поживним середовищем Мурасіге та Скуга (Duchefa, Netherland) із зменшеним удвічі вмістом усіх компонентів ($\frac{1}{2}\text{МС}$). У дослідних варіантах стерилізований через шприцевий фільтр (Minisart, Sartorius, 0,2 мк) розчин нітрату нікелю додавали у чашки Петрі до кінцевої концентрації 5 та 10 мг/л за Ni(II). За контроль використовували насіння, яке пророщували на тому самому середовищі без нітрату нікелю.

Вплив нікелю на коренеутворення та ріст відокремлених пагонів. Для визначення впливу металу на формування коренів поверхнево стерилізоване насіння пророщували на агаризованому середовищі $\frac{1}{2}\text{МС}$ до формування пагонів заввишки 40—50 мм. Верхівкові частини рослин відокремлювали та переносили у стерильні пластикові ємності з перфорованою підкладкою, розміщуючи таким чином, щоб нижня частина стебла через отвір мала контакт з поживним середовищем у ємності. Використовували рідке середовище $\frac{1}{2}\text{МС}$ з Ni(II) у

концентрації 5 та 10 мг/л (дослідні варіанти) та без металу (контроль). Рослини вирощували за 16-годинного освітлення та температури 24 °C упродовж двох тижнів.

Вплив нікелю на подовжене культивування пророслого насіння. У цьому варіанті експерименту насіння пророщували в умовах *in vitro* на агаризованому середовищі без Ni(II); одразу після проростання проростки переносили у стерильні пластикові ємності з перфорованою підкладкою для подальшого зростання на рідкому середовищі ½МС з Ni(II) у концентрації 5 і 10 мг/л (дослідні варіанти) та без металу (контроль). Пророслі насінини розміщували на підкладках так, щоб корені через отвори мали контакт з середовищем. Рослини вирощували за 16-годинного освітлення та температури 24 °C упродовж двох тижнів.

Визначення маси сирієї речовини пагонів і коренів. Для визначення маси сирієї речовини пагонів і коренів рослини виймали з чашок Петрі, промокали фільтрувальним папером, зважували на аналітичних електронних вагах Sartorius H60.

Визначення вмісту нікелю. Вміст Ni(II) аналізували за реакцією з диметилгліоксимом. Для цього готували водні екстракти з пагонів і коренів. Відповідний матеріал гомогенізували у деіонізованій воді, центрифугували на центрифугі Eppendorf 5415C упродовж 5 хв за 14000 об/хв, надосадову рідину відбирали та використовували для хімічного аналізу. Для проведення реакції до 1 мл деіонізованої води добавляли послідовно 0,320 мл водного екстракту з рослин, 0,05 мл 5 %-го розчину йоду та 0,025 мл 1 %-го розчину диметилгліоксиму у 20 %-му розчині NaOH. Після ретельного перемішування суміші визначали оптичну густину отриманих розчинів на спектрофотокolorиметрі Fluorat-02 Panorama за довжини хвилі 470 нм. Для кількісного розрахунку вмісту Ni(II) використовували калібрувальний графік, отриманий за використання розчину $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ($y = 37,05x$, $R^2=0,92$).

Визначення індексу толерантності та факторів біоконцентрації. Стійкість/чутливість рослин визначали за індексом толерантності (TI) та фактором біоконцентрації (BCF_T та mBCF). Індекс толерантності розраховували як співвідношення маси рослин (пагонів і коренів окремо), які культивували в умовах металіндукованого стресу до відповідної маси контрольних рослин. Фактор біоконцентрації (BCF_T) визначали в умовних одиницях як відношення загального вмісту Ni(II) у всій масі рослин, які вирости у ємності, до початкового загального вмісту Ni(II) в усьому об'ємі (20 мл) середовища ємності для вирощування. Модифікований фактор біоконцентрації (mBCF) визначали як співвідношення концентрації нікелю в пагонах до початкової його концентрації у середовищі помножене на TI.

Статистичний аналіз. Дослідження проводили у шести повтореннях. Дані проаналізовано на статистичну значущість за допомогою однофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA) з наступним тестом Тьюкі. Групи вимірів перевіряли на нормальність розподілу методом Шапіро-Уїлка та на гомогенність дисперсії тестом Левене. Значення вважалися значущими за $p < 0,05$. Метод лінійної регресії

застосовували для побудови калібрувальної кривої залежності концентрації нікелю від оптичної густини. Результати подано як середнє $\pm$ стандартна похибка (*SE*).

Результати та обговорення

Короткотерміновий вплив нікелю на проростання насіння. Через 7 діб фіксували значні відмінності у проростках рослин гірчиці білої експериментальних і контрольного варіантів (рис. 1). Так, маса сирої речовини пагонів проростків, що виростили за наявності Ni(II) у концентрації 10 мг/л, була удвічі меншою, ніж у контролі ($73,25 \pm 25,37$ мг проти $150,00 \pm 14,96$ мг); рослини, які росли за наявності токсичної сполуки, мали хлороз з частковим зів'яненням листків (рис. 1, 2 а). Негативний вплив Ni(II) виявлявся в інгібуванні росту коренів рослин гірчиці білої (рис. 2). Зокрема, маса сирої речовини коренів контрольних проростків становила $31,43 \pm 7,38$ мг, а у двох дослідних варіантах — лише $10,38 \pm 1,54$ та $1,38 \pm 0,18$ мг. Маса сирої речовини коренів проростків за наявності 10 мг/л Ni(II) у середовищі зменшувалась у 22,78 рази порівняно з контролем.

Як видно з даних, наведених на рис. 3, пагони та корені гірчиці значно відрізнялись за індексом толерантності (відповідно $TI_{\text{п}}$ та $TI_{\text{к}}$). Зокрема, хоча пагони гірчиці мали високий $TI_{\text{п}}$, коренева система рослин цього виду була значно чутливішою до дії токсичного металу у більшій концентрації. Так, $TI_{\text{к}}$ за пророщування насіння на середовищі з додаванням 10 мг/л Ni(II) становив лише $0,04 \pm 0,01$, а цей показник у пагонах дорівнював $0,49 \pm 0,18$. Таким чином, токсична дія Ni(II) на проростки у короткотерміновому періоді після проростання насіння насамперед проявлялась у пригніченні формування коренів.

Відомо, що підвищений рівень Ni(II) може пригнічувати поділ клітин у кореневій меристемі у чутливих рослин і таким чином сповільнювати їх ріст. Зокрема, у дослідженнях Gupta та співавт. [19] виявлено значне інгібування росту коренів у проростках проса пальчастого та проса перлового навіть за триденного вирощування на середовищі з нікелем. Автори також відзначали дозозалежність впливу токсичної сполуки на ріст пагонів і коренів — нікель у концентрації 40 мг/л практично повністю пригнічував ріст рослин, особливо кореневої системи, тоді як наявність нікелю у концентрації 10 мг/л майже не приводила до зменшення маси пагонів, однак навіть за такої концентрації спостерігали зменшення маси коренів більш ніж удвічі. У дослідженні на рослинах *Allium cepa* нікель у концентрації 0,25 мМ також інгібував ріст рослин [20].

Вплив нікелю на коренеутворення та ріст відокремлених пагонів. Для визначення здатності пагонів гірчиці формувати корені за наявності нікелю у середовищі висаджували відокремлені пагони рослин, які вирощували на контрольному середовищі (без нітрату нікелю), у отвори перфорованої підкладки у пластикових ємностях з середовищем $\frac{1}{2}$ МС, до якого було додано Ni(II) у концентраціях 5 і 10 мг/л. Встановлено, що формування коренів на пагонах майже повністю інгібувалось за наявності Ni(II) у концентрації 10 мг/л; пагони зазна-



a



б



в

Рис. 1. Проростки гірчиці білої через сім днів пророщування у стерильних умовах:
a — контрольні рослини; *б, в* — рослини, отримані на середовищі з 5 та 10 мг/л Ni(II)

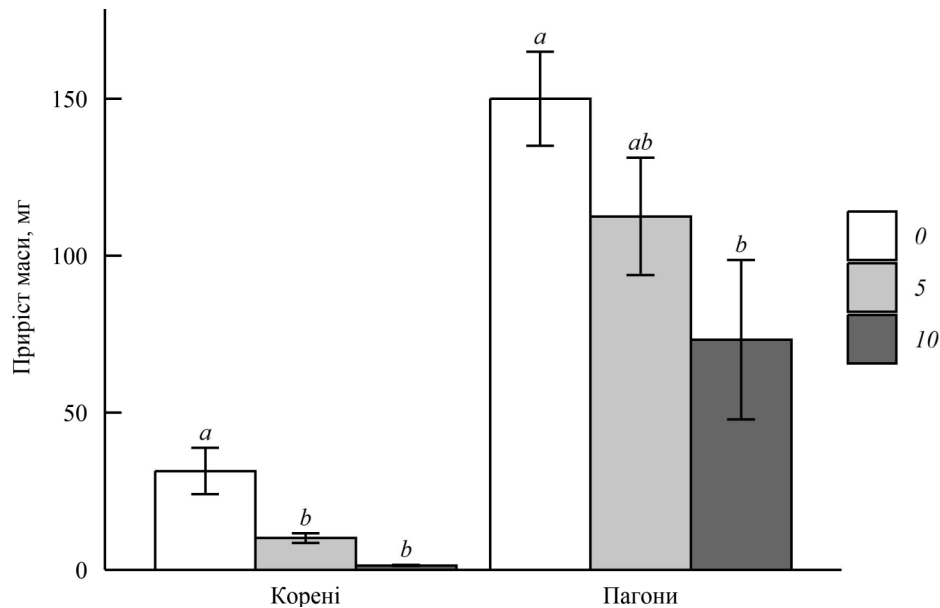


Рис. 2. Приріст маси сирій речовини пагонів і коренів проростків гірчиці білої через сім діб пророщування у стерильних умовах:

0 — контроль; 5, 10 — варіанти вирощування, у яких до середовища додавали відповідно 5 та 10 мг/л Ni(II)

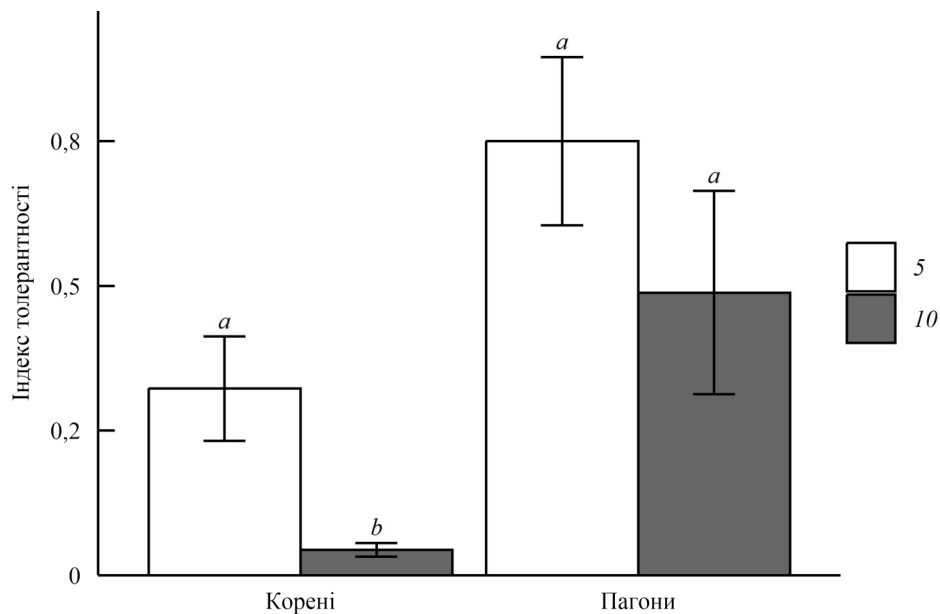


Рис. 3. Індекси толерантності проростків гірчиці, вирощених із сухого насіння:

5, 10 — варіанти вирощування, у яких до середовища додавали відповідно 5 та 10 мг/л Ni(II)

вали також пригнічення росту за наявності Ni(II) у середовищі (рис. 4). Індекси толерантності пагонів дорівнювали $0,66 \pm 0,14$ та $0,23 \pm 0,02$, а цей параметр при рості коренів становив $0,31 \pm 0,10$ і $0,05 \pm 0,01$ відповідно за наявності Ni(II) у середовищі у концентрації 5 та 10 мг/л.

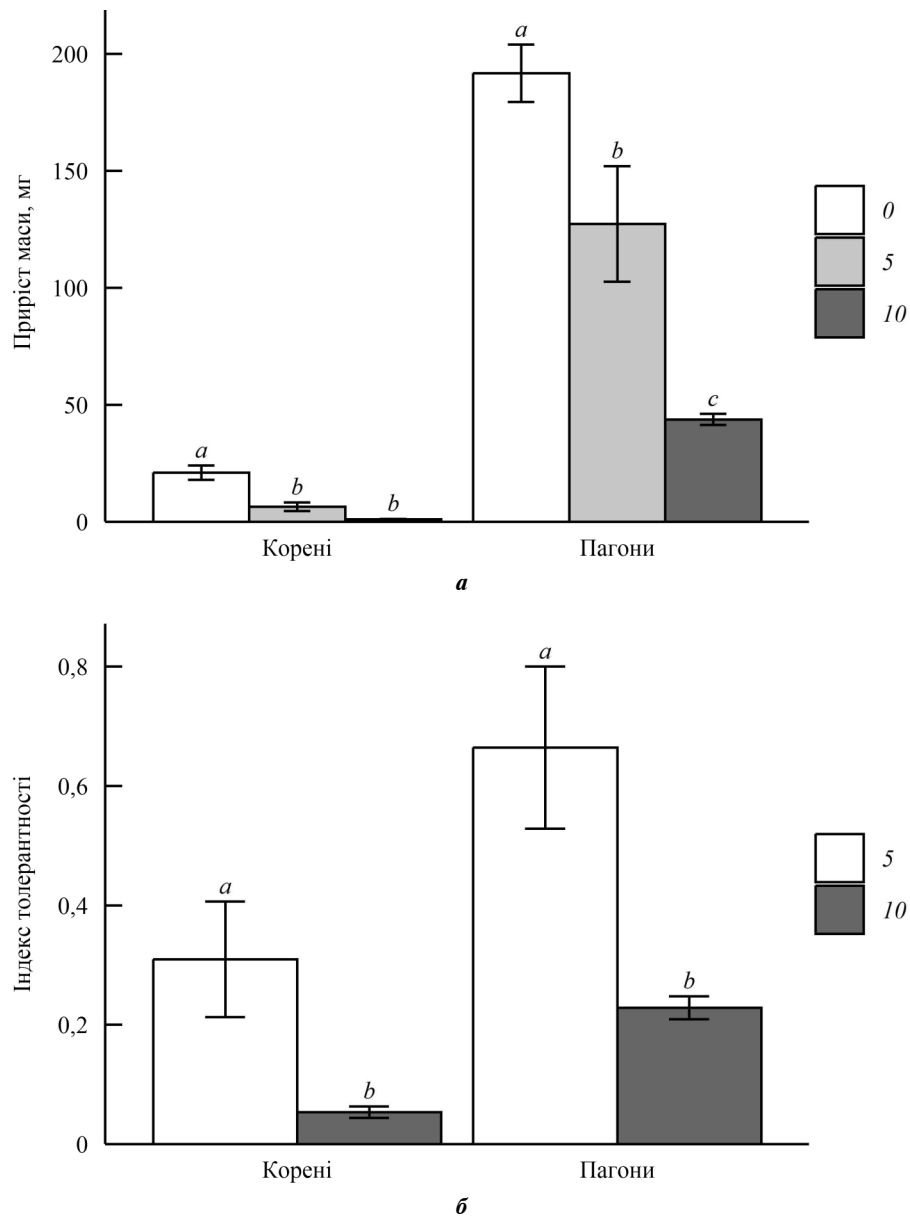


Рис. 4. Приріст маси сирової речовини (а) та індекс толерантності (б) пагонів і коренів рослин гірчиці білої за культивування відокремлених пагонів на середовищі з нітратом нікелю:

0 — контроль; 5, 10 — варіанти вирощування, у яких до середовища додавали відповідно 5 та 10 мг/л Ni(II)

Таким чином, відокремлені пагони рослин гірчиці білої виявилися надзвичайно чутливими до дії сполуки нікелю, що відобразалось у пригніченні росту пагонів та особливо коренів рослин.

Вплив нікелю на подовжене культивування пророслого насіння. Через хлороз з частковим зів'язуванням листків перший варіант експерименту (пророщування сухого насіння) довелося припинити через сім діб. Для подовження терміну вирощування за наявності нітрату нікелю було



Рис. 5. Рослини гірчиці, вирощені з проростків у пластикових ємностях упродовж двох тижнів:

a — контроль; *б, в* — за наявності 5 та 10 мг/л Ni(II) відповідно

змінено схему проведення експерименту. Одразу після проростання насіння (через одну добу) воно було перенесене у пластикові ємності з перфорованою підкладкою, наявність якої давала змогу вирощувати проростки таким чином, щоб тільки корені мали безпосередній контакт із середовищем. Ємності містили по 20 мл середовища $\frac{1}{2}$ МС, до якого також було додано Ni(II) у концентраціях 5 і 10 мг/л. Контрольний варіант середовища не містив нітрату нікелю.

Через два тижні у контролі спостерігали формування сім'ядольних листків та 2—3 справжніх листків. У той самий час, за наявності 5 мг/л Ni(II) рослини мали менші розміри та часткове пожовтіння листків. За наявності Ni(II) у більшій концентрації справжні листки не формувались. Виявлено значний ріст кореневої системи рослин гірчиці у контрольному варіанті (рис. 5, *a*). Разом з тим, як і в попередньому варіанті експерименту, коренева система проростків зазнавала значного інгібування нікелем (рис. 5, *б, в*). За таких умов середня маса сирої речовини пагонів у контролі становила $172,33 \pm 8,83$ мг, за наявності 5 та 10 мг/л Ni(II) — $144,80 \pm 12,38$ та $84,33 \pm 7,66$ мг відповідно (рис. 6, *a*). Маса сирої речовини коренів у експериментальних варіантах дорівнювала $32,40 \pm 5,89$ та $4,33 \pm 0,76$ мг, хоча у контролі становила $54,00 \pm 1,73$ мг (рис. 6). Як видно з цих даних, за тривалого вирощування рослин індекс толерантності пагонів був значно меншим при використанні Ni(II) у концентрації 10 мг/л

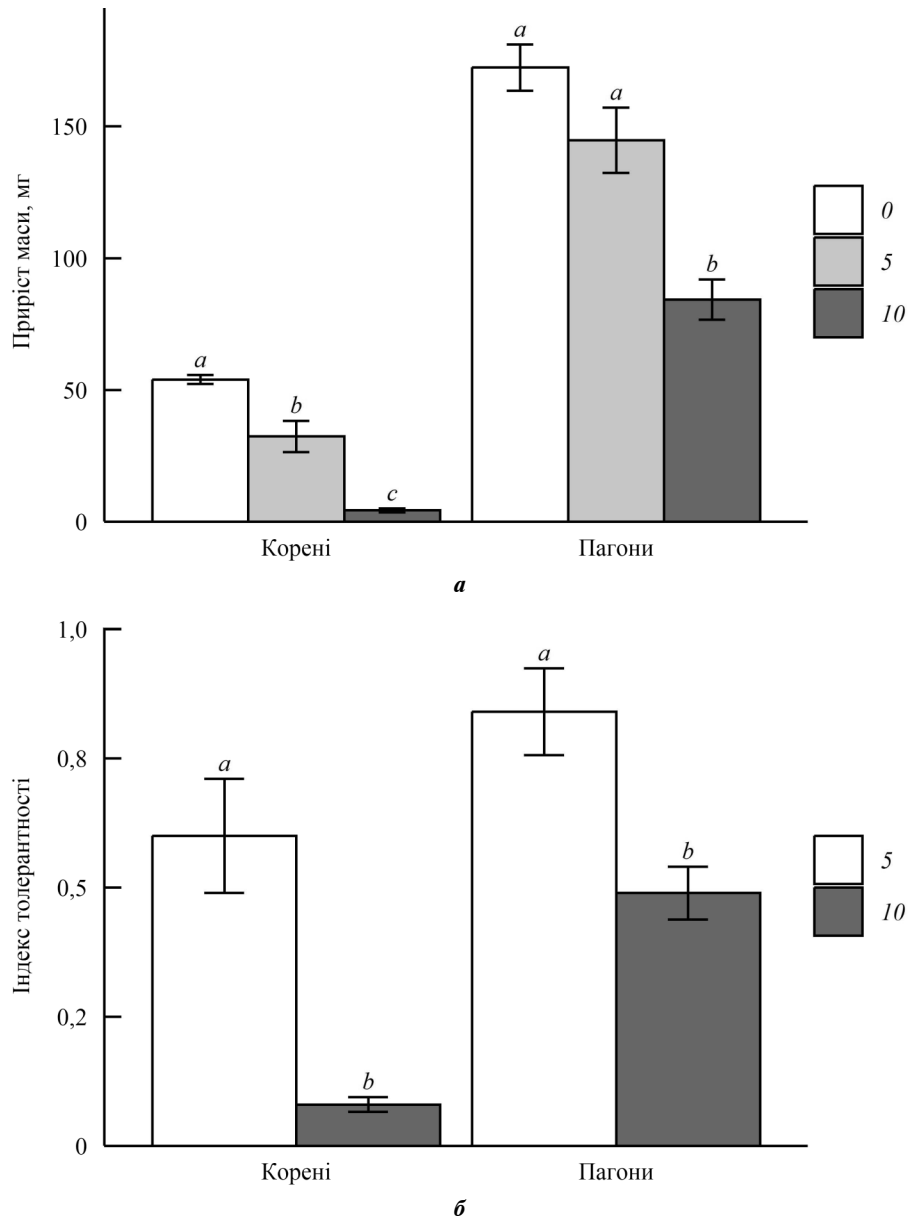


Рис. 6. Приріст маси сирової речовини (а) та індекси толерантності (б) пагонів і коренів, розраховані з урахування впливу на ріст пагонів та коренів проростків гірчиці білої через два тижні вирощування у стерильних умовах у пластикових ємностях на рідкому середовищі:

0 — контроль; 5, 10 — варіанти вирощування з додаванням 5 та 10 мг/л Ni(II) відповідно

($TI_{\text{п}} = 0,49 \pm 0,05$) порівняно з TI варіанта з додаванням 5 мг/л Ni(II) у середовище ($TI_{\text{п}} = 0,84 \pm 0,08$). Критичне зменшення індексу толерантності коренів спостерігали за наявності високої концентрації Ni(II) у середовищі ($TI_{\text{к}} = 0,08 \pm 0,01$) порівняно з цим показником ($TI_{\text{к}} = 0,60 \pm 0,11$) за наявності 5 мг/л Ni(II) у середовищі. Отже, пролонгована дія Ni(II) призводила до пригнічення росту не тільки коренів, а й пагонів рослин.

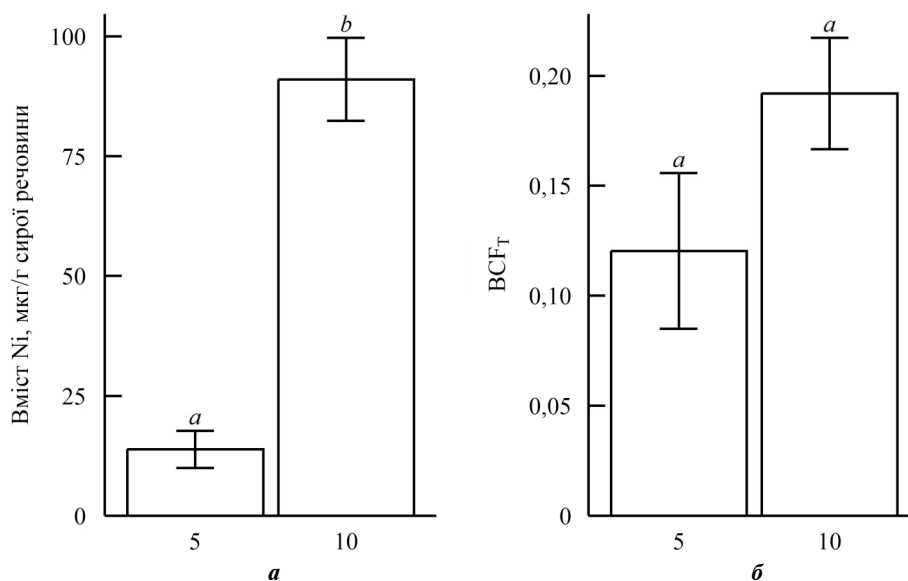


Рис. 7. Вміст Ni(II) у пагонах після вирощування проростків гірчиці білої на середовищі з 5 і 10 мг/л Ni(II) упродовж двох тижнів (а) та фактор біоконцентрації (б)

Подібний негативний ефект нікелю на рослини спостерігали і раніше. Так, при вирощуванні рослин *Zea mays* у гідропонній культурі за наявності 5 та 10,0 мг нікелю зменшувались маса листків відповідно у 2,3 і 4,3 раза та маса коренів — у 2,6 і 3,9 раза відповідно. Аналогічні показники при вирощуванні *Vicia faba* становили відповідно 2,2 та 3,0 рази (листки) і 2,7 і 3,1 раза (корені), а індекси толерантності коливались від 0,2 до 0,4 [21].

Накопичення нікелю у рослинах. Можливою причиною негативного впливу можна визнати транспортування Ni(II) з середовища до рослин з подальшим накопиченням у клітинах та чутливістю рослин до цього металу. У наших дослідженнях проведені аналізи підтвердили наявність Ni(II) у рослинах гірчиці білої. Пагони містили Ni(II) (рис. 7, а), що свідчить про транспортування металу з середовища до надземної частини (незважаючи на невеликий розмір самих коренів). Це й може бути причиною значного інгібування росту рослин через накопичення токсичної сполуки та чутливість рослин до неї. Як видно з наведеної діаграми (див. рис. 7, а), вміст Ni(II) становив $13,85 \pm 3,88$ та $91,05 \pm 8,65$ мкг/г сирої речовини за додавання до середовища Ni(II) у концентраціях відповідно 5 і 10 мг/л.

Розрахунок фактора біоконцентрації (BCF_T) як відношення вмісту нікелю у всій масі рослин, які вирости, до загальної початкової вмісту нікелю у комірках пластикових ємностей (20 мл об'єм, Ni(II) 5 або 10 мг/л) виявив досить низьку здатність рослин вилучати нікель з середовища (рис. 7). Зокрема, BCF_T при початковій концентрації Ni(II) 5 або 10 мг/л становив $0,12 \pm 0,04$ і $0,19 \pm 0,03$ відповідно. Модифіковані фактори біоконцентрації виявилися менше одиниці й становили 0,84 для 5 мг/л та 0,73 для 5 і 10 мг/л Ni(II).

У багатьох дослідженнях вивчали особливості негативної дії підвищених концентрацій солей нікелю на рослини. Зокрема, вияв-

лено значні фізіологічні зміни, такі як дисбаланс поживних речовин, зниження водного потенціалу та транспірації, некроз і порушення функцій клітинної мембрани [5]. Негативний вплив на рослини автори пояснювали прямою дією нікелю на фотосинтетичну систему й обмеженням поглинання CO_2 [22, 23] або опосередковано через конкуренцію з катіонами таких металів, як Fe, Mg, Cu, Zn та перешкоджанню їх транспорту до рослин. Саме через останній механізм, як припускають, з'являються ознаки хлорозу у рослинах за наявності нікелю у середовищі. Встановлено, що Ni(II) може переміщуватися через флоемні та ксилемні судини від кореня до верхніх частин рослини [24]. Зазначається, що індукований нікелем негативний вплив на рослини залежить від низки чинників, зокрема, від концентрації (збільшення вмісту призводить до активізації прояву негативних симптомів), часу контакту з рослинами, стадії розвитку рослин, рівня толерантності тощо [25].

Відомо, що рослини низки видів та сортів родини *Brassicaceae* є досить стійкими до дії нікелю. Зокрема, накопичення нікелю в пагонах чутливих до Ni(II) сортів ріпаку було нижчим, ніж у толерантних [26]. У цьому дослідженні стійкі до нікелю сорти мали вищі рівні гістидину, серину та цистеїну, причому таке збільшення вмісту вказаних сполук корелювало з толерантністю рослин до Ni(II). Автори пов'язують толерантність до нікелю з частковою детоксикацією Ni(II) шляхом створення комплексів з гістидином, серином і цистеїном. Рослини *Alyssum murale* та *Alyssum corsicum* виявились гіперакумуляторами нікелю, причому поглинання Ni(II) знижувалося при нижчому рН ґрунту та збільшувалося при вищому рН ґрунту [27]. Такі рослини родини *Brassicaceae* як *Alyssum murale*, *Alyssum markgrafii*, *Bornmuellera baldacii* subsp. *markgrafii*, *Leptoplax emarginata* також були визнані акумуляторами нікелю [28].

Проведені нами дослідження виявили значне пригнічення росту кореневої системи рослин редьки білої на середовищі, яке містило Ni(II) у концентраціях 5 та 10 мг/л, причому збільшення вмісту Ni(II) у середовищі призводило до більшого інгібування росту. Пагони рослин були здатні накопичувати Ni(II), однак фактор біоконцентрації металу залишався невисоким.

Рослини, які можуть бути використані як фіторемедіатори, повинні мати розвинену кореневу систему, швидкий ріст, велику біомасу, характеризуватись толерантністю до певної сполуки [29]. Вважають, що для визнання рослин такими, які можуть бути використані для фіторемедіації, мають виконуватися певні вимоги, зокрема, модифікований фактор біоконцентрації має бути більше одиниці; концентрації таких металів як мідь, свинець, нікель, хром — перевищувати 1 г/кг [5, 30–32]. Досліджувані нами рослини, хоча і виживали навіть за наявності Ni(II) у початковій концентрації 10 мг/л та накопичували Ni(II), не відповідають вказаним параметрам через значне інгібування формування коренів при проростанні насіння, відсутність росту коренів на відокремлених пагонах та низький рівень фактора біоконцентрації. Тому рослини цього виду не можна вважати акумуляторами Ni(II) та такими, що можуть бути використані для фіторемедіації ґрунтів, забруднених сполуками нікелю.

Фінансування. Робота була виконана за підтримки гранту № 0125U000980 «Біотехнологічні рослини для боротьби з інфекційними бактеріальними захворюваннями та фітодеструкції речовин-забруднювачів мілітарного походження».

REFERENCES

1. Kumar, A., Jigyasu, D.K., Kumar, A., Subrahmanyam, G., Mondal, R., Shabnam, A.A., Cabral-Pinto, M.M.S., Malyan, S.K., Chaturvedi, A.K., Gupta, D.K., Fagodiya, R.K., Khan, S.A. & Bhatia, A. (2021). Nickel in terrestrial biota: Comprehensive review on contamination, toxicity, tolerance and its remediation approaches. *Chemosphere*, 275, p. 129996. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129996>
2. Kaluarachchi, H., Chan Chung, K.C. & Zamble, D.B. (2010). Microbial nickel proteins. *Nat. Prod. Rep.* 27, pp. 681-694. <https://doi.org/10.1039/b906688h>
3. Küpper, H. & Kroneck, P.M.H. (2007). Nickel in the Environment and Its Role in the Metabolism of Plants and Cyanobacteria, pp. 31-61. In: *Nickel and Its Surprising Impact in Nature*. Editor(s): Astrid Sigel, Helmut Sigel, Roland K. O. Sigel, Online ISBN:9780470028131. <https://doi.org/10.1002/9780470028131.ch2>
4. Awasthi, S., Chauhan, R. & Srivastava, S. (2022). Chapter 2 — The importance of beneficial and essential trace and ultratrace elements in plant nutrition, growth, and stress tolerance. Editor(s): Vinay Kumar, Ashish Kumar Srivastava, Penna Suprasanna, *Plant Nutrition and Food Security in the Era of Climate Change*, Academic Press, 2022, pp. 27-46. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822916-3.00001-9>
5. Ahmad, M.S.A. & Ashraf, M. (2011). Essential roles and hazardous effects of nickel in plants. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 214, pp. 125-167. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0668-6_6
6. Papadopoulos, A., Prochaska, C., Papadopoulos, F., Gantidis, N. & Metaxa, E. (2007). Determination and evaluation of cadmium, copper, nickel, and zinc in agricultural soils of western Macedonia, Greece. *Environ. Manag.*, 40, pp. 719-726. <https://doi.org/10.1007/s00267-007-0073-0>
7. Zhang, Y., Rodionov, D.A., Gelfand, M.S. & Gladyshev, V.N. (2009). Comparative genomic analyses of nickel, cobalt and vitamin B12 utilization. *BMC Genomics*, 10, pp. 78. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-10-78>
8. Van der Pas, L. & Ingle, R.A. (2019). Towards an understanding of the molecular basis of nickel hyperaccumulation in plants. *Plants*, 8, p. 11. <https://doi.org/10.3390/plants8010011>
9. Chen, C., Huang, D. & Liu, J. (2009). Functions and toxicity of nickel in plants: recent advances and future prospects. *Clean*, 37, pp. 304-313. <https://doi.org/10.1002/clen.200800199>
10. Eitinger, T., Suhr, J., Moore, L. & Smith, J.A.C. (2005). Secondary transporters for nickel and cobalt ions: theme and variations. *Biometals*, 18, pp. 399-405. <https://doi.org/10.1007/s10534-005-3714-x>
11. Haydon, M.J. & Cobbett, C.S. (2007). Transporters of ligands for essential metal ions in plants: research review. *New Phytol.*, 174, pp. 499-506. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02051.x>
12. Rahman, H., Sabreen, S., Alam, S. & Kawai, S. (2005). Effects of nickel on growth and composition of metal micronutrients in barley plants grown in nutrient solution. *J. Plant Nutr.*, 28, pp. 393-404. <https://doi.org/10.1081/PLN-200049149>
13. Gajewska, E., Skłodowska, M., Slaba, M. & Mazur, J. (2006). Effect of nickel on antioxidative enzyme activities, proline and chlorophyll contents in wheat shoots. *Biol. Plant.*, 50, pp. 653-659. <https://doi.org/10.1007/s10535-006-0102-5>
14. Maheshwari, R. & Dubey, R.S. (2007). Nickel toxicity inhibits ribonuclease and protease activities in rice seedlings: protective effects of proline. *Plant Growth Regul.*, 51, pp. 231-243. <https://doi.org/10.1007/s10725-006-9163-x>
15. Bolan, N.S., Park, J.H., Robinson, B., Naidu, R. & Huh, K.Y. (2011). Phytostabilization. A green approach to contaminant containment. *Adv. Agron.*, 112, pp. 145-204. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385538-1.00004-4>

16. Li, Y.M., Chaney, R.L., Brewer, E.P., Angle, J.S. & Nelkin, J. (2003). Phytoextraction of nickel and cobalt by hyperaccumulator *Alyssum* species grown on nickel-contaminated soils. *Environ. Sci. Technol.*, 37, pp. 1463-1468. <https://doi.org/10.1021/es0208963>
17. Giordani, C., Cecchi, S. & Zanchi, C. (2005). Phytoremediation of soil polluted by nickel using agricultural crops. *Environ. Manag.*, 36, pp. 675-681. <https://doi.org/10.1007/s00267-004-0171-1>
18. Al Chami, Z., Amer, N., Al Bitar, L. & Cavoski, I. (2015). Potential use of *Sorghum bicolor* and *Carthamus tinctorius* in phytoremediation of nickel, lead and zinc. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 12, pp. 3957-3970. <https://doi.org/10.1007/s13762-015-0823-0>
19. Gupta, V., Jatav, P., Verma, R. & Kachhwaha, S. (2017). Nickel accumulation and its effect on growth, physiological and biochemical parameters in millets and oats. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 24, pp. 23915-23925. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0057-4>
20. Akbas, H., Dane, F. & Kartal, C. (2009). Effect of nickel on root growth and the kinetics of metal ions transport in onion (*Allium cepa*) root. *Ind. J. Biochem. Biophys.*, 46, pp. 332-336.
21. Antonkiewicz, J., Jasiewicz, C., Koncewicz-Baran, M. & Sendor, R. (2016). Nickel bioaccumulation by the chosen plant species. *Acta Physiol. Plant.*, 38, p. 40. <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2062-5>
22. Sreekanth, T., Nagajyothi, P., Leem, K. & Prasad, T. (2013). Occurrence, physiological responses and toxicity of nickel in plants. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 10, pp. 1129-1140. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0245-9>
23. Gajewska, E. & Skłodowska, M. (2007). Relations between tocopherol, chlorophyll and lipid peroxides contents in shoots of Ni-treated wheat. *J. Plant Physiol.*, 164, pp. 364-368. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2006.05.021>
24. Ishtiaq, S. & Mahmood, S. (2012). Phytotoxicity of nickel and its accumulation in tissues of three *Vigna* species at their early growth stages. *J. Appl. Bot. Food Qual.*, 84, pp. 223-228. <https://doi.org/10.5073/JABFQ.2011.084.033>
25. Khellaf, N. & Zerdaoui, M. (2010). Growth response of the duckweed *Lemna gibba* L. to copper and nickel phytoaccumulation. *Ecotoxicology*, 19, pp. 1363-1368. <https://doi.org/10.1007/s10646-010-0522-z>
26. Ali, M.A., Ashraf, M. & Athar, H.R. (2009). Influence of nickel stress on growth and some important physiological/biochemical attributes in some diverse canola (*Brassica napus* L.) cultivars. *J. Hazardous Materials*, 172, pp. 964-969. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.077>
27. Li, Yin-M., Chaney, R.L., Brewer, E., Angle, J.S. & Nelkin, J. (2003). Phytoextraction of Nickel and Cobalt by Hyperaccumulator *Alyssum* Species Grown on Nickel-Contaminated Soils. *Environ. Sci. Technol.*, 37, pp. 1463-1468. <https://doi.org/10.1021/es0208963>
28. Bani, A., Echevarria, G., Mullaj, A., Reeves, R., Morel, J.L. & Sulce, S. (2009). Nickel Hyperaccumulation by Brassicaceae in Serpentine Soils of Albania and Northwestern Greece. *Northeastern Naturalist*, 16, pp. 385-404. <https://doi.org/10.1656/045.016.0528>
29. Jabeen, R., Ahmad, A. & Iqbal, M. (2009). Phytoremediation of heavy metals: physiological and molecular mechanisms. *Bot. Rev.*, 75, pp. 339-364. <https://doi.org/10.1007/s12229-009-9036-x>
30. Subhashini, V. & Swamy, A.V.V.S. (2013). Phytoremediation of Pb and Ni contaminated soils using *Catharanthus roseus* (L.). *Univers. J. Environ. Res. Technol.*, 3, pp. 465-472.
31. Marchiol, L., Sacco, P., Assolari, S. & Zerbi, G. (2004.) Reclamation of polluted soil: phytoremediation potential of crop-related Brassica Species. *Water Air Soil Pollut.*, 158, pp. 345-356. <https://doi.org/10.1023/B:WATE.0000044862.51031.fb>
32. Boularbah, A., Schwartz, C., Bitton, G., Aboudrar, W., Ouhammou, A. & Morel, J.L. (2006). Heavy metal contamination from mining sites in South Morocco: 2. Assessment of metal accumulation and toxicity in plants. *Chemosphere*, 63, pp. 811-817. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.07.076>

Received 18.08.2025

FEATURES OF THE INFLUENCE OF NICKEL NITRATE ON IN VITRO GROWTH OF WHITE MUSTARD PLANTS (*SINAPIS ALBA* L.)

N.A. Matvieieva, V.P. Duplij, T.A. Bohdanovych, M.V. Kuchuk

Institute of Cell Biology and Genetic Engineering, National Academy of Sciences of Ukraine
148 Akademika Zabolotnoho St., Kyiv, 03143, Ukraine
e-mail: duplijv@icbge.org.ua

Soil contamination with toxic metals poses an increasingly serious environmental threat worldwide. Elevated concentrations of metals in soil disrupt natural biogeochemical cycles, leading to deteriorated conditions for plant growth. Therefore, analyzing plant tolerance to various pollutants, identifying physiological changes, and understanding the mechanisms of adaptation are key areas of modern biology. In this work, the features of the effect of nickel nitrate on the growth of white mustard plants (*Sinapis alba* L.) *in vitro* were characterized, including the stages of seed germination and the extended cultivation period in the presence of Ni(II) in the medium. The seeds were germinated in Petri dishes on Murashige and Skoog medium with a halved content of components, to which Ni(II) was added at concentrations of 5 mg/L and 10 mg/L. Plant growth after seed germination was analyzed by growing seedlings in plastic containers with a perforated base in cells for root contact with the medium. The weight of roots and shoots of control and treated plants was compared. Analysis of Ni(II) content was carried out by reaction with dimethylglyoxime. Plant resistance/sensitivity was assessed by tolerance index (TI) for roots (TI_r) and shoots (TI_{sh}) separately and bioconcentration factors (mBCF and BCF_r). The weight of the aboveground part of seedlings under short-term exposure (7 days) to the metal was half that of the control; the root weight decreased in 22.78 times. The experiment on root induction in isolated shoots for two weeks showed almost complete inhibition of root formation (TI_r was 0.31±0.10 and 0.05±0.01) and a significant decrease in the weight of shoots (TI_{sh} was 0.66±0.14 and 0.23±0.02) for 5 mg/L and 10 mg/L Ni(II), respectively. In case of growing germinated seeds for a longer period (two weeks) in the presence of 5 mg/L and 10 mg/L Ni(II) in the medium, a decrease in shoot weight was observed (172.33±8.83 mg in the control, and 144.80±12.38 mg and 84.33±7.66 mg in the presence of 5 mg/L and 10 mg/L Ni(II), respectively), as well as a significant decrease in the weight of the roots (32.40±5.89 mg and 4.33±0.76 mg) which was 54.00±1.73 mg in the control. The shoot tolerance index was significantly lower when using Ni(II) at a concentration of 10 mg/L (TI_{sh} = 0.49±0.05 units) compared to the TI_{sh} variant with the addition of 5 mg/L Ni(II) in the medium (TI_{sh} = 0.84±0.08 units). A decrease in the root tolerance index was observed at the presence of a high concentration of Ni(II) in the medium (TI_r = 0.08±0.01 units compared to TI_r = 0.60±0.11 units at 5 mg/L Ni(II) in the medium). Therefore, the prolonged action of Ni(II) has led to the inhibition of the growth of not only roots, but also plant shoots. Thus, despite the fact that white mustard plants were able to extract nickel from the medium and accumulate it (91.05±8.65 µg/g of raw material), these findings indicate that these plants are not resistant to the action of the metal, since the metal bioconcentration factor (BCF_r) did not exceed 0.19±0.03 and mBCF<1, and the root system underwent significant growth inhibition. Accordingly, *Sinapis alba* L. plants cannot be used for phytoremediation of nickel-contaminated soils as phytoextractors.

Key words: *Sinapis alba* L., Ni(II), toxicity, phytoextraction.

ORCID

H.A. МАТВЄЄВА — N.A. Matvieieva <https://orcid.org/0000-0002-4877-5222>

В.П. ДУПЛІЙ — V.P. Duplij <https://orcid.org/0000-0002-7479-7257>

Т.А. БОГДАНОВИЧ — T.A. Bohdanovych <https://orcid.org/0000-0002-1834-523X>

М.В. КУЧУК — M.V. Kuchuk <https://orcid.org/0000-0001-7365-7474>