

ВПЛИВ ФТОРИДНОГО ЗАБРУДНЕННЯ НА РОСТОВІ ТА БІОХІМІЧНІ ПАРАМЕТРИ *CALENDULA OFFICINALIS L.*, *BORAGO OFFICINALIS L.*, *MENTHA PIPERITA L.*

Л.О. МІКУЛІЧ, О.В. МАШТАЛЕР, В.В. СКІЛЬСЬКА, М.І. РОГОЖУК

Донецький національний університет імені Василя Стуса
проспект Юності, 16, м. Вінниця, Україна, 21021
e-mail: l.mikulich@donnu.edu.ua, m.kozlova@donnu.edu.ua

У роботі наведено результати дослідження впливу фторидного забруднення на ростові та біохімічні параметри деяких лікарських рослин. У межах експерименту проаналізовано вплив різних концентрацій фториду натрію в ґрунті на динаміку ростових показників, вміст фотосинтетичних пігментів (хлорофілів *a* і *b*), а також показників сирової та сухої маси досліджуваних видів. На основі отриманих морфометричних даних розраховано індекс росту кореневої системи та надземної частини рослин. Встановлено видоспецифічні відмінності у реакції досліджуваних видів на фторидне навантаження. Так у *Calendula officinalis L.* зміни були незначними та залишалися близькими до контрольних значень, тоді як у *Borago officinalis L.* спостерігали помірне стимулювання росту як коренів, так і пагонів. Найбільші значення індексу росту коренів та пагонів було зафіксовано у *Mentha piperita L.*

Дослідження вмісту фотосинтетичних пігментів показало вірогідне зниження концентрації хлорофілів *a* та *b* у *Calendula officinalis L.* і *Borago officinalis L.* за всіх досліджуваних концентрацій фториду натрію порівняно з контролем. Натомість у *Mentha piperita L.* виявлено можливу компенсаторну перебудову пігментного апарату: вміст хлорофілу *a* стрімко зростав на тлі двократного зниження рівня хлорофілу *b*, що зумовило різкий зсув їхнього співвідношення у бік переважання форми *a*. Встановлено, що забруднення ґрунту NaF у помірних концентраціях стимулює приріст сирової маси *Calendula officinalis L.* та *Borago officinalis L.*, тоді як суттєвих змін у показниках їхньої сухої маси не виявлено.

Ключові слова: фториди, забруднення, лікарські рослини, концентрація, ростові параметри

Вступ. Фторидне забруднення є серйозною екологічною проблемою, оскільки сполуки фтору здатні чинити негативний вплив на ріст і розвиток рослин, а також спричинювати порушення біохімічних процесів. Фториди здатні акумулюватися в різних органах рослин, найчастіше – у листках. Для лікарських рослин цей аспект має особливе значення, оскільки більшість сировини саме листового або квіткового походження, і при наявності в ній токсичних елементів знижується її якість (Choudhary et al, 2019; Chatterjee et al, 2020; Braga et al, 2021). У зв'язку з цим, вивчення впливу фторидного забруднення на *Calendula officinalis L.*, *Borago officinalis L.* та *Mentha piperita L.* є науково обґрунтованим і практично значущим, з огляду на високу біологічну активність і широке використання цих видів у фармакології. Аналіз реакції рослин на дію фторидів дає змогу оцінити їхню толерантність до забруднення та визначити ступінь придатності для подальшого використання у медичній практиці (Braga et al, 2021; Kumari et al, 2024).

Морфофізіологічний стан листя може виступати індикатором стійкості до дії певних стресових факторів і бути пов'язаним із

загальною біомасою та продуктивністю рослин. Зокрема, зміни забарвлення, структури та тургору листків свідчать про пригнічення фотосинтетичної активності, дисбаланс водного режиму або накопичення токсичних речовин. У випадку фторидного забруднення ці показники є критично важливими, оскільки саме порушення фотосинтезу може призводити до зниження якісних і кількісних характеристик лікарської сировини (ДСТУ 7018:2009; Шевчик, Романюк, 2014, Farhangi-Abriz, & Ghassemi-Golezani, 2022).

Попри значний обсяг наукових досліджень, присвячених вивченню впливу фторидів на різні види рослин, дані щодо особливостей реакції лікарських рослин на фторидне забруднення залишаються обмеженими та фрагментарними. Лікарські рослини, які часто вирощуються для отримання біологічно активних речовин, можуть бути особливо вразливими до дії фторидів, що проявляється у зниженні їхньої продуктивності, погіршенні якості сировини та зменшенні вмісту цінних фітохімічних компонентів. У зв'язку з цим актуальним завданням є проведення комплексних досліджень фізіолого-біохімічних змін, індукованих фторидами, з урахуванням виду, фази розвитку та умов вирощування

рослин. Результати таких досліджень стануть науковою основою для розроблення ефективних заходів щодо мінімізації негативного впливу фторидного навантаження, що дозволить зберегти як лікарську, так і декоративну цінність цих рослин, а також забезпечити їхнє раціональне використання у фармацевтичній галузі та декоративному садівництві.

Матеріали та методи дослідження. Нами було проаналізовано вплив фторидного забруднення ґрунту на динаміку ростових показників та біохімічних характеристик окремих видів лікарських рослин: календули лікарської (*C. officinalis*), м'яти перцевої (*M. piperita*) та огірочника лікарського (*B. officinalis*). Експериментальні дослідження проводилися за загальноприйнятими методиками на базі лабораторії кафедри ботаніки та екології

Навчально-наукового інституту природничих наук Донецького національного університету імені Василя Стуса протягом 2024 року (ДСТУ 7018:2009; Приседський, 1999, 2005, 2014, 2016).

Як субстрат використовували опідзолений чорнозем який попередньо висушували та просіювали. Вміст гумусу в ґрунті становив 3,5 %. Ґрунт характеризувався значенням рН 6,8, що є близьким до нейтрального. Відміряну кількість фториду натрію рівномірно вносили в підготовлений ґрунт, після чого ретельно перемішували, зважували та розподіляли по горщиках (табл. 1). Кожен горщик маркували відповідно до варіанту дослідження, який проводили в трикратній повторюваності для п'яти варіантів концентрацій фториду натрію для кожного виду. Вибірка для кожного горщика становила п'ять рослин.

Таблиця 1.

Варіанти концентрації фториду натрію (NaF)

Table 1.

Concentration options for sodium fluoride (NaF)

№ варіанту	К	1	2	3	4
Доза йонів фтору у ґрунті, мг/кг	0	25	50	75	100
Наважка NaF, мг/кг	0	74,6	149,2	223,8	298,4

Визначення енергії проростання проводили для *C. officinalis* на сьомий день після початку експерименту, а для *M. piperita* та *B. officinalis* – на десятий день, відповідно до загальноприйнятих методик. Попередньо насіння досліджуваних видів розміщували у чашках Петрі, вистелених фільтрувальним папером, який підтримували у зволоженому стані шляхом регулярного зволоження водою (ДСТУ 7018:2009). Після проростання життєздатні

сіянці переносили у підготовлені горщики з ґрунтом, де вирощували протягом 30 діб за відповідних умов: температура повітря 20-22 °С, вологість ґрунту становила близько 70 %. Показник успішності вкорінення сіянців, після висадки у горщики, становив 100%. Протягом періоду вегетації, з інтервалом у сім днів, фіксували показники росту рослин для кожного варіанта дослідження (рис 1).



Рис. 1. Стан рослин *Calendula officinalis* L. на 30-й день експерименту

Fig. 1. The condition of *Calendula officinalis* L. plants on the 30th day of the experiment



Рис. 2. Стан рослин *Borago officinalis* L. на 30-й день експерименту

Fig. 2. The condition of *Borago officinalis* L. plants on the 30th day of the experiment

Після завершення експерименту здійснювали вимірювання морфометричних параметрів надземних і підземних органів, зокрема визначали довжину стебла та кореневої системи. Крім того, аналізували фізіолого-біохімічні показники, серед яких – вміст фотосинтетичних пігментів (хлорофілу *a* та *b*) у листових пластинках, а також визначали сиру та суху біомасу рослин. Такий комплексний підхід дозволив оцінити не лише динаміку росту, але й функціональний стан досліджуваних видів в умовах фторидного забруднення.

Вимірювання ростових параметрів досліджуваних рослин проводили за допомогою вимірювальної лінійки. При цьому фіксували загальну довжину кореневої системи – від основи стебла до найвіддаленіших кінчиків коренів, а також висоту надземної частини, тобто довжину стебла від кореневої шийки до апікальної точки пагону (Приседський, 1999). На основі отриманих значень здійснювали обчислення індексу росту за відповідною формулою:

$$I = l_{\text{досл}} / l_{\text{контр}}, \text{ де}$$

I – індекс росту;

*l*_{досл} – довжина органу рослини у дослідних варіантах, см;

*l*_{контр} – довжина орган рослини у контрольному варіанті, см.

Згідно з формулою, показники індексу росту менші за 1, відповідали пригніченому стану рослини, а більші за 1 – стимулюванню росту кореня та стебла (Приседський, 2005).

Кількісне визначення вмісту хлорофілу здійснювали спектрофотометричним методом за

допомогою спектрофотометра Granum 722 (Приседський, 2016).

Сиру та суху масу рослин визначали за допомогою попередньо підготовлених бюксів. Спочатку кожен бюкс зважували порожнім, після чого в нього поміщали подрібнену рослинну сировину. Далі бюкси розміщували у сушильній шафі на 24 години, підтримуючи сталу температуру висушування. Після завершення процесу їх повторно зважували, що давало можливість розрахувати суху масу дослідних зразків (ДСТУ 7018:2009).

Статистичну обробку експериментальних даних проводили за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення для аналізу результатів біологічних досліджень (Приседський, 2005). Для оцінки достовірності відмінностей між контрольним і дослідними варіантами застосовували дисперсійний аналіз та метод Даннета (Приседський, 2005; 2016; 2017). У роботі використано такі статистичні показники: *M* – середнє значення; *m* – помилка репрезентативності; *D* – різниця між середніми значеннями; *D*^D – мінімальна значуща різниця (допуск Даннета). Отримані висновки вважалися вірогідними за умови перевищення обчисленими значеннями стандартних для $\alpha=0,05$.

Результати та їх обговорення. Згідно з отриманими результатами у *C. officinalis* та *B. officinalis* не було виявлено статистично значущих відмінностей показників розвитку кореневої системи порівняно з контролем (табл. 2).

Таблиця 2.

Вплив ґрунтового забруднення фторидом натрію на морфометричні характеристики коренів деяких лікарських рослин

Table 2.

The effect of soil fluoride pollution on the morphometric characteristics of roots of some medicinal plants

Показники	Номер варіанту				
	К	1	2	3	4
1	2	3	4	5	6
<i>Calendula officinalis</i> L.					
M ± m	8,87 ± 3,96	10,28 ± 3,51	10,51 ± 3,99	10,06 ± 2,69	8,94 ± 4,92
D	-	1,41	1,64	1,18	0,07
D^D	-	3,13	3,13	3,13	3,13
% до контролю	100,0	115,8	118,4	113,4	100,7
<i>Borago officinalis</i> L.					
M ± m	5,80 ± 2,67	6,13 ± 2,86	6,34 ± 1,41	7,27 ± 2,55	6,90 ± 2,57
D	-	0,32	0,53	1,46	1,10
D^D	-	1,99	1,99	1,99	1,99
% до контролю	100,0	105,6	109,3	125,3	118,9
<i>Mentha piperita</i> L.					
M ± m	1,01 ± 1,06	1,34 ± 1,03	1,92 ± 1,34	2,45 ± 1,80*	1,98 ± 1,52
D	-	0,33	0,91	1,44	0,97
D^D	-	1,99	1,99	1,99	1,99
% до контролю	100,0	132,6	190,0	242,5	196,0

Примітка (тут та надалі): *M* – середні значення; *m* – помилка репрезентативності; *D* – різниця між середніми значеннями; *DD* – мінімальна значуща різниця (допуск Даннета)

Note (here and throughout): *M* – mean value; *m* – standard error of the mean (SEM); *D* – difference between means; *DD* – least significant difference (Dunnett's test).

Суттєве перевищення показників відносно контрольних зразків може свідчити як про прояв адаптивних механізмів, так і про можливу реакцію рослин на дію стресового фактору. Так, у *M. piperita* за концентрації фторидів 75 мг/кг відзначалося збільшення довжини коренів на 142,5 % відносно контролю. При вмісті фторидів у ґрунті 100 мг/кг цей показник перевищував контрольне значення на 96 %. Найменша довжина коренів спостерігалася за концентрації 25 мг/кг і становила лише 32,6 % від контрольного рівня. Отримані дані свідчать про виражене стимулювання росту кореневої системи *M. piperita* фторидами, особливо у варіантах дослідження з низькими концентраціями, що вказує на прояв ефекту гормезису у відповідь рослин на дію фторидів.

У *C. officinalis* після внесення NaF у перших трьох варіантах дослідження зафіксовано помірне стимулювання росту, тоді як у четвертому варіанті довжина кореневої системи практично не відрізнялася від контрольних значень, що може вказувати на досягнення межі толерантності цього виду до фторидів. Для *B.*

officinalis у всіх дослідних варіантах спостерігалася поступове збільшення довжини коренів, що загалом свідчить про високу чутливість цього виду до стимулюючої дії невеликих доз фторидів, у порівнянні з високими.

У *C. officinalis* істотного впливу NaF на ростові параметри стебла не виявлено. У *B. officinalis* при концентрації фториду натрію 100 мг/кг зафіксовано подовження стебла на 49,2 % у порівнянні з контролем. У *M. piperita* збільшення росту стебла відзначали в усіх варіантах дослідження. Так, при концентрації NaF 100 мг/кг спостерігали аномальне видовження стебла, яке перевищувало контроль майже у 4 рази (табл. 3). Така реакція може бути адаптивною відповіддю рослини на токсичний вплив фторидів, спрямованою на швидке наростання надземної маси для підтримки фотосинтезу та виживання в умовах стресу.

На основі отриманих показників росту було проведено розрахунок індексу росту кореневої системи (рис. 3) та надземної частини – стебла (рис. 4) досліджуваних лікарських рослин.

Таблиця 3.

Вплив ґрунтового забруднення фторидом натрію на морфометричні характеристики стебел деяких лікарських рослин

Table 3.

The effect of NaF on the growth parameters of the aerial part (stem) of certain medicinal plants

Показники	Номер варіанту				
	К	1	2	3	4
1	2	3	4	5	6
<i>Calendula officinalis</i> L.					
M ± m	4,88 ± 1,37	5,18 ± 1,36	5,58 ± 1,47	4,93 ± 1,31	4,86 ± 1,70
D	-	0,30	0,70	0,05	-0,01
D^p	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33
% до контролю	100,0	106,1	114,3	101,0	99,5
<i>Borago officinalis</i> L.					
M ± m	2,66 ± 0,91	2,60 ± 1,05	3,14 ± 1,74	2,88 ± 0,76	3,97 ± 1,78*
D	-	-0,06	0,48	0,21	1,30
D^p	-	1,21	1,21	1,21	1,21
% до контролю	100,0	97,7	118,0	108,2	149,2
<i>Mentha piperita</i> L.					
M ± m	1,12 ± 0,82	2,05 ± 1,91	3,44 ± 2,92*	3,32 ± 1,92*	4,86 ± 4,26*
D	-	0,93	2,32	2,20	3,74
D^p	-	2,12	2,12	2,12	2,12
% до контролю	100,0	183,0	307,1	296,4	433,9

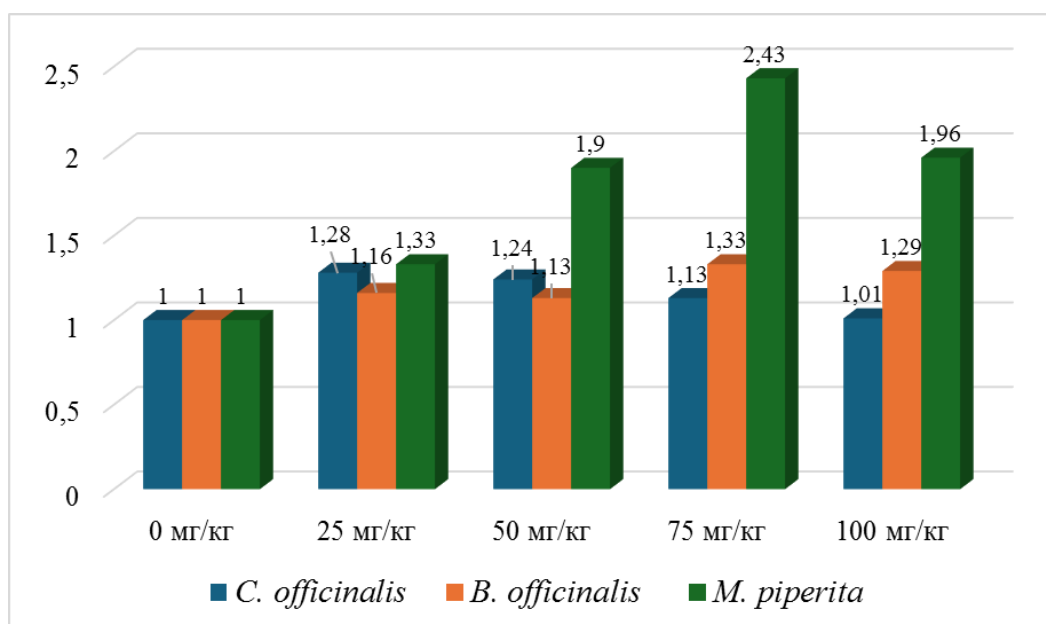


Рис. 3. Індекс росту кореневої системи у досліджуваних видів

Fig. 3. Root system growth index in the species studied

З рисунку 3 видно, що у *C. officinalis* індекс росту кореневої системи за всіх досліджуваних концентрацій залишався близьким до контрольних значень. Найменше значення індексу росту для цього виду фіксували за концентрації NaF 100 мг/кг – 1,01, а найбільше – 1,28 за концентрації 25 мг/кг. Це свідчить про ефект гормезису – стимуляцію росту коренів за низьких концентрацій фториду та поступове зниження показника зі збільшенням його вмісту в ґрунті. Значення індексу росту у *B. officinalis*

змінювались від 1,16 при 25 мг/кг до 1,33 при 50-75 мг/кг, а за концентрації 100 мг/кг становили 1,29.

Найбільш виражений ефект гормезису спостерігали у *M. piperita*. Уже за концентрації 25 мг/кг індекс росту становив 1,33, при 50 мг/кг підвищувався до 1,90, а максимального значення досягав за 75 мг/кг – 2,43. За концентрації 100 мг/кг показник дещо знижувався до 1,96, однак залишався значно вищим за контроль. Це вказує

на виражену стимуляцію росту кореневої системи під впливом фторидного забруднення.

Таким чином, у всіх досліджуваних видів значення індексу росту перевищували 1, що свідчить про стимуляцію розвитку кореневої системи під впливом фториду натрію. Прояв такого ефекту гормезису був найвищим за низьких доз, тоді як із підвищенням концентрації NaF стимуловальна дія дещо послаблювалася.

Найвищу чутливість до дії фторидів виявлено у *M. piperita*, тоді як *C. officinalis* характеризувалася найменшими змінами досліджуваного показника.

Наступним етапом дослідження стало визначення індексу росту стеблової частини досліджуваних лікарських рослин за різних концентрацій фториду натрію (NaF) у ґрунті, що проілюстровано на рисунку 4.

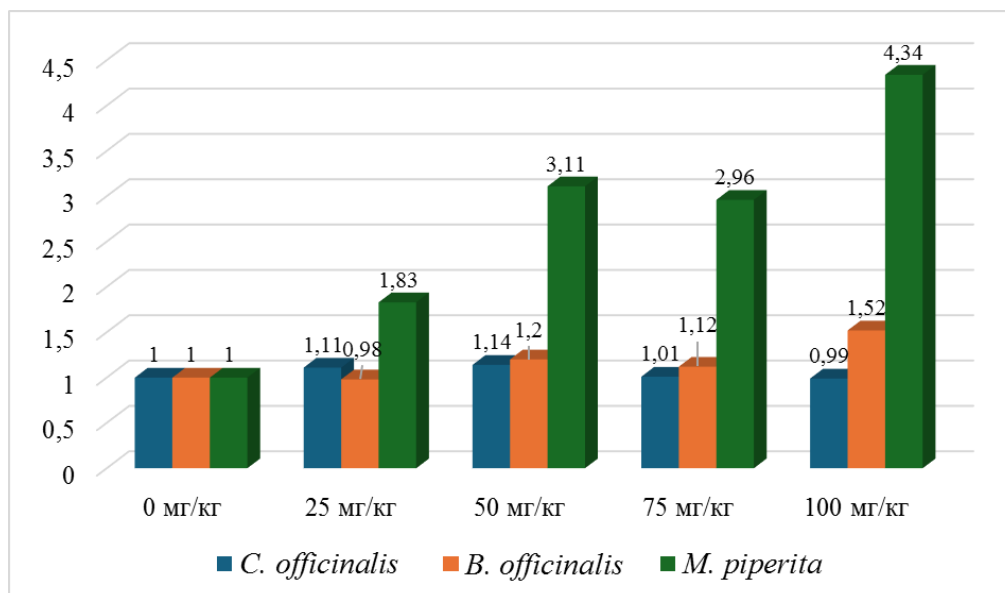


Рис. 4. Індекс росту стебла у досліджуваних видів

Fig. 4. Stem growth index in the species studied

Аналіз отриманих даних показав, що у *C. officinalis* зміни були незначними порівняно з контролем. За концентрації 25 мг/кг індекс росту становив 1,11, при 50 мг/кг – 1,14. За подальшого підвищення концентрації до 75 мг/кг значення знижувалося до 1,01, а за 100 мг/кг – до 0,99, що практично відповідало контрольному рівню. Це свідчить про наявність дозозалежної горметичної реакції, коли низькі концентрації фторидів викликають стимуляцію росту, а вищі не забезпечують додаткового позитивного ефекту.

У *B. officinalis* за концентрації 25 мг/кг спостерігали незначне зниження показника до 0,98. Проте зі збільшенням концентрації фториду натрію відмічали стимуляцію росту стеблової частини. Відповідно показники зростали до 1,20 при 50 мг/кг, 1,12 при 75 мг/кг та досягав максимального значення 1,52 за 100 мг/кг.

Найбільш виражену реакцію виявлено у *M. piperita*. Індекс росту стеблової частини зростав від 1,83 за концентрації 25 мг/кг до 3,11 при 50 мг/кг. За 75 мг/кг спостерігалася незначне зниження до 2,96, однак за максимальної концентрації 100 мг/кг показник досягав найвищого значення – 4,34. Це свідчить про

значний стимулюючий вплив фториду натрію на ріст пагонів цього виду.

Таким чином, отримані дані свідчать, що досліджувані концентрації фториду натрію у ґрунті не виявили токсичного впливу на надземну частину рослин.

Забруднення ґрунтів фторидами негативно впливає на кількість, вміст і функціональний стан хлорофілів *a* та *b*, що зумовлює зниження фотосинтетичної активності рослин і призводить до пригнічення росту, підвищення чутливості до інших стресових факторів. Саме тому в рамках проведеного експерименту було досліджено вплив фторидного забруднення на концентрацію хлорофілів *a* та *b* у листових пластинках досліджуваних рослин (табл. 4).

З даних таблиці 4, видно, що у *C. officinalis* під впливом фторидного забруднення ґрунту вміст хлорофілу *a* у листових пластинках знижувався за всіх досліджуваних концентрацій порівняно з контролем. Найбільше зниження вмісту хлорофілу *a* зафіксовано за концентрації 75 мг/кг і він був на 38 % меншим за контрольні показники.

Таблиця 4.

Вплив фторидного забруднення ґрунту на вміст хлорофілу *a* у листових пластинках деяких видів лікарських рослин

Table 4.

The effect of soil fluoride pollution on the content of chlorophyll *a* in the leaf plates of some species of medicinal plants

Показники	Номер варіанту				
	К	1	2	3	4
1	2	3	4	5	6
<i>Calendula officinalis</i> L.					
M ± m	0,50 ± 0,07	0,32 ± 0,08*	0,39 ± 0,06*	0,31 ± 0,13*	0,35 ± 0,04*
D	-	-0,18	-0,10	-0,19	-0,14
D^p	-	0,08	0,08	0,08	0,08
% до контролю	100,0	64,0	78,0	62,0	70,0
<i>Borago officinalis</i> L.					
M ± m	0,54 ± 0,21	0,29 ± 0,14*	0,29 ± 0,09*	0,25 ± 0,12*	0,35 ± 0,09*
D	-	-0,25	-0,25	-0,28	-0,19
D^p	-	0,15	0,15	0,15	0,15
% до контролю	100,0	53,7	53,7	46,3	64,8
<i>Mentha piperita</i> L.					
M ± m	0,71 ± 0,32	0,79 ± 0,06	1,02 ± 0,32	0,96 ± 0,34	1,40 ± 0,51*
D	-	0,08	0,31	0,25	0,69
D^p	-	0,36	0,36	0,36	0,36
% до контролю	100,0	111,2	143,6	135,2	197,1

Мінімальне зниження зафіксовано за концентрації 50 мг/кг, яке на 22 % нижче за контроль. Отримані результати вказують на незначне зниження фотосинтетичної активності рослин що може свідчити про пригнічувальний вплив фторидів на пігментний апарат *C. officinalis*.

Вміст хлорофілу *a* у *B. officinalis* за концентрацій фторидів 25 і 50 мг/кг був меншим за контроль на 46,3 %. Найбільше зниження відзначено за концентрації 75 мг/кг, що на 53,7 % менше порівняно з контрольним варіантом. За концентрації 100 мг/кг вміст хлорофілу *a* був нижчим за контроль на 35,2 %. За концентрації фториду натрію 25 мг/кг у *M. piperita* вміст хлорофілу *a* був більший на 11,2% у порівнянні з контролем, що може свідчити про слабко виражену стимуляцію фотосинтетичної активності в межах адаптивної відповіді на стресовий чинник. Найбільш виражені зміни зафіксовано при концентрації NaF 100 мг/кг, де вміст хлорофілу *a* майже подвоював контрольні значення і перевищував їх на 97,7 %. Така реакція може бути пов'язана з активацією захисних механізмів рослини, зокрема зі збільшенням синтезу фотосинтетичних пігментів у відповідь на дію фторидів

Як видно з таблиці 5, найбільш виражене зниження вмісту хлорофілу *b* зафіксовано у *C. officinalis* – його рівень був на 71,1 % меншим порівняно з контролем при концентрації NaF 75 мг/кг. У *B. officinalis* спостерігалось зменшення

вмісту хлорофілу *b* у всіх досліджуваних варіантах відносно контрольних зразків приблизно у два рази. Щодо *M. piperita*, то максимальний вміст хлорофілу *b*, що становив 53,8 %, і був зафіксований при найвищій концентрації NaF – 100 мг/кг.

Дані щодо впливу забруднення ґрунту NaF на співвідношення хлорофілів *a* і *b* у листових пластинках наведені у таблиці 6. Зміни у вмісті хлорофілів *a*, *b*, їхньої суми та співвідношення мають специфічний характер залежно від виду рослини та концентрації фториду.

У *C. officinalis* спостерігалось зниження вмісту обох форм хлорофілу при усіх досліджуваних концентраціях (25-100 мг/кг) у порівнянні з контрольними зразками. Загальний пул пігментів зменшується з 0,95 мг/г (контроль) до мінімальних 0,44 мг/г за концентрації 75 мг/кг. Деяке відновлення показників до 0,54 мг/г спостерігається при наявності NaF 100 мг/кг. Оскільки вміст хлорофілу *b* знижувався швидшими темпами, ніж хлорофілу *a*, співвідношення *a* та *b* зростало від 1,11 до найбільшого значення 2,38 у варіанті 3. Це вказує на вищу чутливість хлорофілу *b* до фторидного забруднення.

У рослин *B. officinalis* спостерігається різке зниження вмісту обох пігментів уже на першому варіанті досліду. Сумарний вміст пігментів зменшується майже вдвічі порівняно з контролем (0,92 мг/г) і коливається в межах 0,44-0,55 мг/г у дослідних варіантах.

Таблиця 5.

Вплив фторидного забруднення ґрунту на вміст хлорофілу *b* у листових пластинках деяких видів лікарських рослин

Table 5.

The effect of fluoride soil pollution on chlorophyll *b* content in the leaf blades of certain medicinal plant species

Показники	Номер варіанту				
	К	1	2	3	4
1	2	3	4	5	6
<i>Calendula officinalis</i> L.					
M ± m	0,45 ± 0,13	0,27 ± 0,06*	0,22 ± 0,04*	0,13 ± 0,04*	0,19 ± 0,02*
D	-	-0,18	-0,23	-0,31	-0,26
D^D	-	0,07	0,07	0,07	0,07
% до контролю	100,0	60,0	48,9	28,9	42,2
<i>Borago officinalis</i> L.					
M ± m	0,38 ± 0,13	0,20 ± 0,06*	0,21 ± 0,02*	0,19 ± 0,06*	0,20 ± 0,02*
D	-	-0,18	-0,17	-0,19	-0,18
D^D	-	0,07	0,07	0,07	0,07
% до контролю	100,0	52,6	55,2	50,0	52,6
<i>Mentha piperita</i> L.					
M ± m	1,04 ± 0,61	0,44 ± 0,07*	0,47 ± 0,07*	0,44 ± 0,12*	0,56 ± 0,17*
D	-	-0,60	-0,56	-0,59	-0,47
D^D	-	0,31	0,31	0,31	0,31
% до контролю	100,0	42,3	45,1	42,3	53,8

Таблиця 6.

Вплив забруднення ґрунту NaF на співвідношення хлорофілів *a* і *b* у листових пластинках деяких видів лікарських рослин

Table 6.

The effect of NaF soil contamination on the ratio of chlorophylls *a* and *b* in leaf blades of some medicinal plant species

Показники	Номер варіанту				
	К	1	2	3	4
1	2	3	4	5	6
<i>Calendula officinalis</i> L.					
Хлорофіл <i>a</i>	0,50 ± 0,07	0,32 ± 0,08	0,39 ± 0,06	0,31 ± 0,13	0,35 ± 0,04
Хлорофіл <i>b</i>	0,45 ± 0,13	0,27 ± 0,06	0,22 ± 0,04	0,13 ± 0,04	0,19 ± 0,02
Хлорофіл <i>a + b</i>	0,95	0,59	0,61	0,44	0,54
Хлорофіл <i>a/b</i>	1,11	1,18	1,77	2,38	1,84
<i>Borago officinalis</i> L.					
Хлорофіл <i>a</i>	0,54 ± 0,21	0,29 ± 0,14	0,29 ± 0,09	0,25 ± 0,12	0,35 ± 0,09
Хлорофіл <i>b</i>	0,38 ± 0,13	0,20 ± 0,06	0,21 ± 0,02	0,19 ± 0,06	0,20 ± 0,02
Хлорофіл <i>a + b</i>	0,92	0,49	0,50	0,44	0,55
Хлорофіл <i>a/b</i>	1,42	1,45	1,38	1,31	1,75
<i>Mentha piperita</i> L.					
Хлорофіл <i>a</i>	0,71 ± 0,32	0,79 ± 0,06	1,02 ± 0,32	0,96 ± 0,34	1,40 ± 0,51
Хлорофіл <i>b</i>	1,04 ± 0,61	0,44 ± 0,07	0,47 ± 0,07	0,44 ± 0,12	0,56 ± 0,17
Хлорофіл <i>a + b</i>	1,75	1,23	1,49	1,40	1,96
Хлорофіл <i>a/b</i>	0,68	1,79	2,17	2,18	2,50

На відміну від інших видів, у *B. officinalis* співвідношення стабільне за концентрацій 25-75 мг/кг (1,31-1,45) порівняно з контролем (1,42) і помітно зростає за концентрації NaF (1,75). Це може свідчити про пропорційне руйнування або пригнічення синтезу обох форм хлорофілу за помірних концентрацій.

M. piperita продемонструвала унікальну, відмінну від інших досліджуваних видів реакцію на присутність NaF у ґрунті, що може свідчити про запуск інших механізмів адаптації. На відміну від інших видів, вміст хлорофілу *a* стрімко зростає – від 0,71 у контрольних зразках до 1,40 мг/г за наявності NaF 100 мг/кг. Водночас рівень хлорофілу *b* знижується вдвічі (до ~0,44-

0,56 мг/г). Це призводить до різкого зсуву співвідношення a/b у бік переважання хлорофілу a (з 0,68 до 2,50) та збільшення загального вмісту пігментів у варіанті 4 до 1,96 мг/г. Такий зсув можливо відображає перебудову світлозбиральних комплексів м'яти перцевої в умовах стресу.

Отримані дані вказують на можливу високу токсичність NaF для *C. officinalis* та *B. officinalis*, що проявляється у руйнуванні світлозбиральних комплексів. Натомість *M. piperita* виявляє вищу толерантність до фторидного стресу, активуючи

синтез хлорофілу а для підтримання стабільності фотосистеми.

Подальший етап експерименту передбачав вивчення показників сирової та сухої маси лікарських рослин. Але через недостатню кількість рослинного матеріалу для *Mentha piperita* в контрольному варіанті в усіх трьох повторностях не було можливим провести точне визначення сирової і сухої маси та відповідно здійснити порівняльний аналіз з контрольними показниками (табл. 7).

Таблиця 7.

Вплив забруднення ґрунту на накопичення біомаси деякими видами лікарських рослин

Table 7.

The influence of soil pollution on the accumulation of biomass by some types of medicinal plants

Показник		Номер варіанту				
		К	1	2	3	4
<i>Calendula officinalis</i> L.						
Сира маса рослини,	M ± m	4,99 ± 0,36	5,25 ± 0,40	5,44 ± 1,12	6,19 ± 0,57	5,90 ± 1,20
	D	-	0,25	0,44	1,19	0,90
	D ^D	-	1,65	1,65	1,65	1,65
	% до контролю	100,0	105,2	109,0	124,0	118,2
Суха маса рослини	M ± m	0,59 ± 0,04	0,46 ± 0,08	0,58 ± 0,10	0,60 ± 0,04	0,57 ± 0,24
	D	-	-0,12	-0,02	0,01	-0,01
	D ^D	-	0,30	0,30	0,30	0,30
	% до контролю	100,0	77,9	98,3	101,7	96,6
<i>Borago officinalis</i> L.						
Сира маса рослини, г	M ± m	4,56 ± 1,08	4,87 ± 1,39	5,53 ± 0,47	5,87 ± 0,90	6,39 ± 0,94
	D	-	0,31	0,97	1,30	1,87
	D ^D	-	2,02	2,02	2,02	2,02
	% до контролю	100,0	106,8	121,2	127,7	140,1
Суша маса рослини, г	M ± m	0,43 ± 0,12	0,45 ± 0,11	0,42 ± 0,01	0,43 ± 0,08	0,39 ± 0,05
	D	-	0,01	-0,01	-0,01	-0,04
	D ^D	-	0,20	0,20	0,20	0,20
	% до контролю	100,0	104,6	97,6	100,0	90,7

Проведені експериментальні дослідження показали, що забруднення ґрунту фторидом натрію у концентраціях від 25 до 100 мг/кг викликає позитивні зміни у накопиченні сирової маси у двох видів лікарських рослин – *C. officinalis* та *B. officinalis*. Так, у *C. officinalis* спостерігається помірне збільшення сирової біомаси. Зокрема, при мінімальній досліджуваній концентрації NaF 25 мг/кг приріст сирової маси становив 5,2 % у порівнянні з контролем, що є найнижчим показником серед усіх випробуваних концентрацій для цього виду. При підвищенні концентрації до 75 мг/кг було зафіксовано значне збільшення сирової маси – на 24 % у порівнянні з рослинами, вирощеними у необробленому ґрунті.

У випадку *B. officinalis* відзначено стійку тенденцію до збільшення сирової маси у всіх експериментальних варіантах відносно контролю. Максимальний приріст сирової біомаси

– 40,1 % – спостерігався при концентрації NaF 100 мг/кг, що свідчить про позитивну реакцію рослини на підвищене фторидне навантаження. Навпаки, найнижчий показник збільшення сирової маси цього виду (6,8 %) було зафіксовано при мінімальній концентрації 25 мг/кг.

Щодо сухої маси обох видів, результати експерименту засвідчили незначні варіації у її значеннях порівняно з контролем. Ці коливання не були статистично значущими, що може свідчити про несуттєвий вплив фторидного забруднення на накопичення сухої біомаси у *C. officinalis* та *B. officinalis* в діапазоні досліджуваних концентрацій (рис. 5, рис. 6).

Таким чином, отримані дані свідчать про те, що забруднення ґрунту фторидом натрію у помірних концентраціях здатне стимулювати приріст сирової маси у досліджуваних лікарських рослин, проте суттєвих змін у сухій масі не спостерігається.

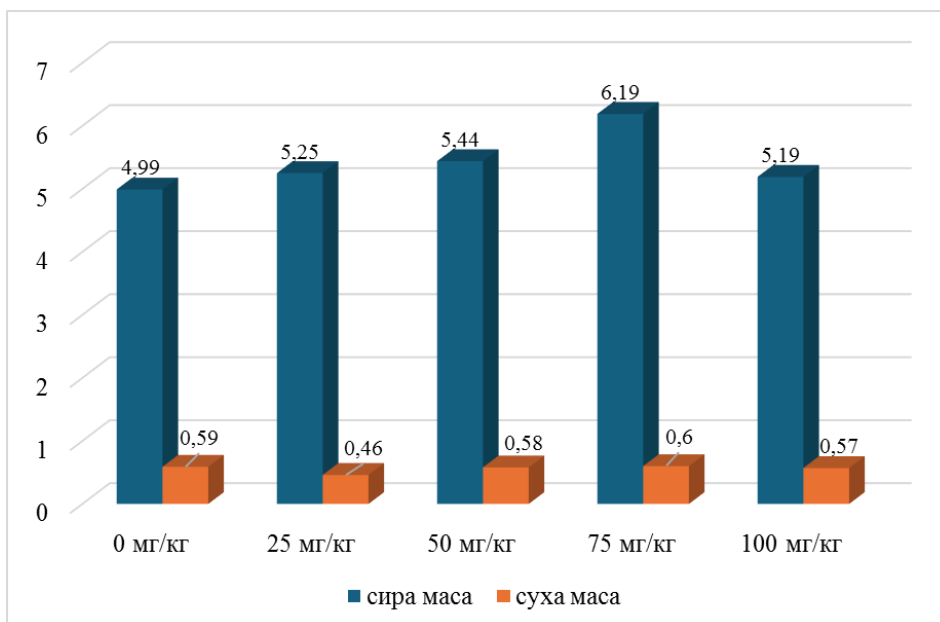


Рис. 5. Співвідношення сирі та сухої маси *C. officinalis* L.

Fig. 5. The ratio of raw and dry mass of *C. officinalis* L.

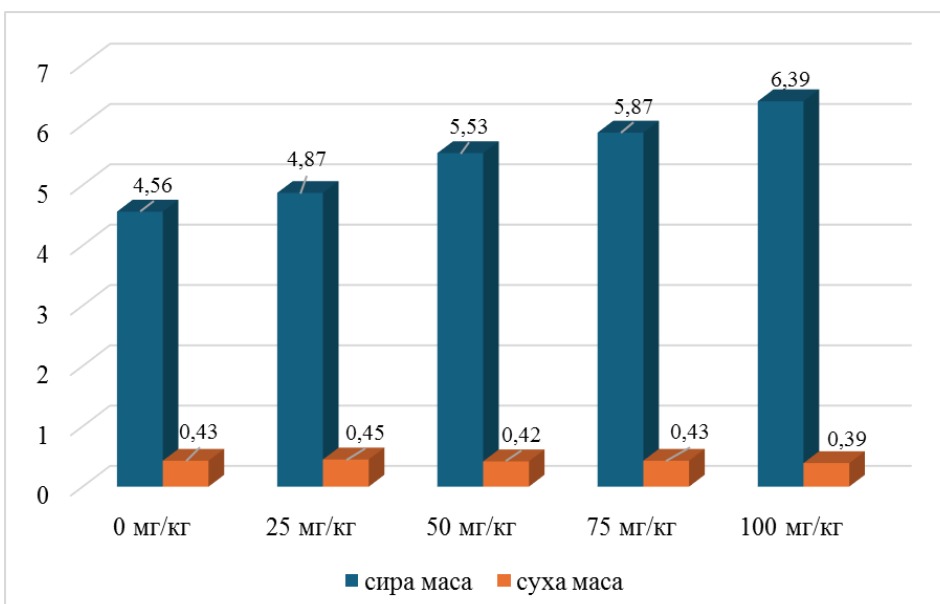


Рис. 6. Співвідношення сирі та сухої маси *B. officinalis* L.

Fig. 6. The ratio of raw to dry mass of *B. officinalis* L.

Практично всі дослідні варіанти демонстрували певний рівень стійкості до різних концентрацій забруднювача. Хоча загалом спостерігалось збільшення сирі маси, що може свідчити про адаптивні реакції рослин на стресові умови, водночас фіксувалось зниження сухої маси, особливо помітне при концентрації 25 мг/кг для *C. officinalis* та 100 мг/кг для *B. officinalis*.

Висновки. В результаті проведених досліджень впливу фторидного забруднення на ростові та біохімічні параметри досліджуваних рослин встановлено, що у *M. piperita* спостерігалось виражене стимулювання росту

кореневої системи за низьких концентрацій та зниження довжини кореня за найвищих концентрацій фторидів у ґрунті. Для *C. officinalis* зафіксовано помірне стимулювання росту за концентрацій 25-75 мг/кг, тоді як за максимальної концентрації 100 мг/кг показник наближався до контрольного. У *B. officinalis* в усіх дослідних варіантах спостерігалось поступове збільшення довжини коренів. Отримані результати вказують на видоспецифічну реакцію рослин на фторидне навантаження та прояв ефекту гормезису, який найбільш виражений у *M. piperita* та *C. officinalis*. Щодо впливу фторидів на надземну

частину, у *C. officinalis* істотних змін росту стебла не виявлено. У *B. officinalis* за концентрації 100 мг/кг NaF спостерігалось видовження стебла на 49,2 % порівняно з контролем. У *M. piperita* стимулювання росту стебла відзначено в усіх варіантах досліду, а особливо при найвищих концентраціях, що можливо є адаптивною реакцією в умовах стресу.

Дослідження фторидного впливу на вміст та співвідношення хлорофілів *a* і *b*, продемонструвало, що у *C. officinalis* та *B. officinalis* відбувається пригнічення пігментної системи, шляхом зниження вмісту хлорофілів *a* та *b* майже вдвічі. Натомість, у *M. piperita* вміст хлорофілу *a* зростає на 97,7 % за концентрації

NaF 100 мг/кг на тлі двократного падіння хлорофілу *b* через можливу перебудову світлозбиральних комплексів, що є варіантом адаптації до стресу.

Вивчення показників сирової та сухої маси лікарських рослин виявило, що помірні концентрації NaF стимулюють накопичення сирової маси рослин (максимальний приріст зафіксовано у *C. officinalis* (+24 % при 75 мг/кг) та *B. officinalis* (+40,1 % при 100 мг/кг). Суттєвих змін у показниках сухої маси обох видів не виявлено.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність будь-якого потенційного конфлікту інтересів.

Список літератури:

1. ДСТУ 7018:2009. Насіння квітково-декоративних культур. Правила приймання та методи визначення якості. На заміну ГОСТ 24933.0-81, ГОСТ 24933.1-81, ГОСТ 24933.2-81 та ГОСТ 24933.3-81; чинний від 2009-05-12. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2010. 57 с.
2. Приседський, Ю. Г. (1999). Статистична обробка результатів біологічних експериментів: навчальний посібник. Донецьк: Кассіопея. 210 с.
3. Приседський, Ю. Г. (2005). Пакет програм для проведення статистичної обробки результатів біологічних експериментів: навч. посібник. Донецьк: ДонНУ. 75 с.
4. Приседський, Ю. Г. (2014). Вплив забруднення ґрунту фторидами та сульфитами на ростові показники деяких видів квітково-декоративних рослин. *Вісник Дніпропетровського державного аграрно-економічного університету*, 1 (33), 115–119.
5. Приседський, Ю. Г. (2016). Фотосинтез: методичний посібник з виконання лабораторних робіт та самостійної роботи. Вінниця: ДонНУ. 68 с.
6. Приседський, Ю. Г. (2017). Ростові параметри деяких видів газонних трав за умов комплексного флуоридно-сульфитного забруднення ґрунту. *Вісник Львівського університету. Серія біологічна*, (76), 128–137.
7. Шевчик, Л. З., Романюк, О. І. (2014). Дослідження деяких закономірностей впливу нафти на початкові ростові параметри рослинних тест-об'єктів. *Вісник Львівського університету. Серія біологія*, (67), 129–137.
8. Braga, A. F., Borges, A. C., Vaz, L. R. L., de Souza, T. D., & Rosa, A. P. (2021). Phytoremediation of fluoride-contaminated water by *Landoltia punctata*. *Engenharia Agricola*, 41 (2), 171–180. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v41n2p171-180/2021>
9. Chatterjee, N., Sahu, G., Ghosh Bag, A., Plal, B., & Hazra, G. C. (2020). Role of fluoride on soil, plant and human health: A review on its sources, toxicity

- and mitigation strategies. *International Journal of Environment and Climate Change*, 10(8), 77–90. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2020/v10i830220>
10. Choudhary S, Rani S, Devika OS, Patra A, Singh RK, Prasad SK. (2019). Impact of fluoride on agriculture: A review on its sources, toxicity in plants and mitigation strategies. *International Journal of Chemical Studies*. 7 (2), 1675-1680.
 11. Farhangi-Abri, S., & Ghassemi-Golezani, K. (2022). The modified biochars influence nutrient and osmotic statuses and hormonal signaling of mint plants under fluoride and cadmium toxicities. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1048755. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1064409>
 12. S. Kumari, H. Dhankhar, V. Abrol, & A. K. Yadav. (2024). Bioaccumulation of fluoride toxicity in plants and its effects on plants and techniques for its removal. *Advanced treatment technologies for fluoride removal in water* akhilesh kumar yadav saba shirin vijay p. singh editors water purification, Volume 125, 271-290. https://doi.org/10.1007/978-3-031-38845-3_15.

References:

1. DSTU 7018:2009. (2010). *Nasinnia kvitkovo-dekoratyvnykh kultur. Pravyla pryimannia ta metody vyznachennia yakosti* [Seeds of flower and ornamental plants. Acceptance rules and methods of quality determination]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy.
2. Prysedskyyi, Yu.G. (1999). *Statystychna obrobka rezultativ biolohichnykh eksperymentiv: navchalnyi posibnyk* [Statistical processing of biological experiment results]. Donetsk: Kassiopeia.
3. Prysedskyyi, Yu.G. (2005). *Paket prohram dlia provedennia statystychnoi obrobky rezultativ biolohichnykh eksperymentiv* [Software package for statistical processing of biological experiment results]. Donetsk: DonNU.
4. Prysedskyyi, Yu.G. (2014). Influence of soil contamination with fluorides and sulfites on growth parameters of some ornamental plant species. *Visnyk Dnipropetrovskoho Derzhavnoho Ahrarno-Ekonomichnoho Universytetu*, 1(33), 115-119.

5. Prysedskiy, Yu.G. (2016). *Fotosynteza: metodychnyi posibnyk z vykonannya laboratornykh robot ta samostiinoi roboty* [Photosynthesis: methodical guide for laboratory and independent work]. Vinnytsia: DonNU.
6. Prysedskiy, Yu.G. (2017). Growth parameters of some lawn grasses under conditions of complex fluoride-sulfite soil pollution. *Visnyk of Lviv University. Series Biology*, 76, 128-137.
7. Shevchyk, L.Z., & Romaniuk, O.I. (2014). Investigation of some regularities of oil influence on initial growth parameters of plant test objects. *Visnyk of Lviv University. Series Biology*, 67, 129–137.
8. Braga, A.F., Borges, A.C., Vaz, L.R.L., de Souza, T.D., & Rosa, A.P. (2021). Phytoremediation of fluoride-contaminated water by *Landoltia punctata*. *Engenharia Agricola*, 41(2), 171-180. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v41n2p171-180/2021>
9. Chatterjee, N., Sahu, G., Ghosh Bag, A., Pal, B., & Hazra, G.C. (2020). Role of fluoride on soil, plant and human health: A review on its sources, toxicity and mitigation strategies. *International Journal of Environment and Climate Change*, 10(8), 7–90. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2020/v10i830220>
10. Choudhary, S., Rani, S., Devika, O.S., Patra, A., Singh, R.K., & Prasad, S.K. (2019). Impact of fluoride on agriculture: A review on its sources, toxicity in plants and mitigation strategies. *International Journal of Chemical Studies*, 7(2), 1675-1680.
11. Farhangi-Abriz, S., & Ghassemi-Golezani, K. (2022). The modified biochars influence nutrient and osmotic statuses and hormonal signaling of mint plants under fluoride and cadmium toxicities. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1048755. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1064409>
12. Kumari, S., Dhankhar, H., Abrol, V., & Yadav, A.K. (2024). Bioaccumulation of fluoride toxicity in plants and its effects on plants and techniques for its removal. In A.K. Yadav, S. Shirin, & V.P. Singh (Eds.), *Advanced treatment technologies for fluoride removal in water* (Vol. 125, pp. 271-290). https://doi.org/10.1007/978-3-031-38845-3_15

INFLUENCE OF FLUORIDE CONTAMINATION ON THE GROWTH AND BIOCHEMICAL PARAMETERS OF *CALENDULA OFFICINALIS* L., *BORAGO OFFICINALIS* L. AND *MENTHA PIPERITA* L.

L.O. Mikulich, O.V. Mashtaler, V.V. Skilska, M.I. Rohozhuk

Vasyl' Stus Donetsk National University
16 Yunosti Ave., Vinnytsia, 21021, Ukraine
e-mail: l.mikulich@donnu.edu.ua, m.kozlova@dommu.edu.ua

*This paper presents the results of a study into the effects of fluoride contamination on the growth and biochemical parameters of certain medicinal plants. The experiment analysed the effect of different concentrations of sodium fluoride in the soil on the dynamics of growth parameters, the content of photosynthetic pigments (chlorophylls a and b), as well as the fresh and dry weight of the studied species. Based on the morphometric data obtained, the growth index of the root system and the above-ground parts of the plants was calculated. Species-specific differences in the response of the studied species to fluoride stress were established. Thus, in *Calendula officinalis* L., the changes were insignificant and remained close to control values, whereas in *Borago officinalis* L., moderate stimulation of growth was observed in both roots and shoots. The highest values of the root and shoot growth indices were recorded in *Mentha piperita* L. An analysis of photosynthetic pigment content revealed a significant decrease in the concentration of chlorophylls a and b in *C. officinalis* and *B. officinalis* at all tested concentrations of sodium fluoride compared to the control. In contrast, a possible compensatory reorganisation of the pigment apparatus was observed in *M. piperita*: chlorophyll a content increased rapidly against a background of a twofold decrease in chlorophyll b levels, which led to a sharp shift in their ratio towards a predominance of the a form. It has been established that soil contamination with NaF at moderate concentrations stimulates the fresh weight gain of *C. officinalis* and *B. officinalis*, whilst no significant changes in their dry weight were observed. The results obtained expand our understanding of the species-specificity of responses and the tolerance of medicinal plants to fluoride contamination and can be used to assess their resilience under conditions of anthropogenic stress.*

Keywords: fluorides, contaminated, medicinal plants, concentration, growth parameters

*Отримано редколегією 25.03.2026 р.
Підписано до друку 15.06.2026 р.
Дата публікації 30.06.2026 р.*

ORCID ID

Любов Мікулич <https://orcid.org/0000-0002-7925-0736>
Олександра Машталер <https://orcid.org/0000-0003-1896-824>
Марія Рогожук <https://orcid.org/0009-0001-5818-7627>