

<https://doi.org/10.15407/frg2025.02.167>

УДК 577.175.1:582.542.12+632.122.2

РОЛЬ АБК У ПІДТРИМЦІ ВОДНОГО БАЛАНСУ *CAREX HIRTA* L. ЗА УМОВ НАФТОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТУ

Л.В. БУНЬО¹, О.М. ЦВІЛІНЮК¹, Л.В. ВОЙТЕНКО²

¹Львівський національний університет імені Івана Франка
79005 Львів, вул. Грушевського, 4

²Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного Національної академії наук України
01004 Київ, вул. Терещенківська, 2
e-mail: bunio.lyubov@gmail.com

На сьогодні загально визнаним стресовим гормоном є абсцизова кислота (АБК), яка задіяна в регуляції стійкості рослин до впливу низки абіотичних стресорів — посухи, засолення, високих та низьких температур, важких металів. Нафтове забруднення ґрунту, яке досить широко розповсюджене, є комплексним полікомпонентним стресом для рослин. Рослини, що ростуть на забрудненому нафтою ґрунті, потерпають від посухи, гіпоксії й підвищеної температури. Незважаючи на широкий спектр регуляторної ролі АБК упродовж росту та розвитку рослин, механізм її дії насамперед зумовлений регуляцією водного балансу в рослин за стресового навантаження. Метою нашого дослідження було схарактеризувати роль АБК у збереженні водного балансу рослин-фітормедіантів *Carex hirta* L. за впливу полістресу — нафтового забруднення ґрунту. Встановлено, що за умов полікомпонентного стресу ендогенний вміст АБК підвищився в надземних органах *C. hirta* більшою мірою, ніж у підземних. Зростання вмісту АБК у коренях сприяло збільшенню загального об'єму кореневої системи. Виявлено збільшення кількості напіввідкритих продихів і зменшення повністю відкритих продихів та збільшення товщини кутикули верхньої і нижньої епідерми внаслідок підвищення вмісту пулу вільної та зв'язаної форм ендогенної АБК. Це має сприяти зменшенню втрат води рослиною через транспірацію. Загалом збільшення концентрації АБК у різних органах *C. hirta* за полікомпонентного стресу (нафтового забруднення ґрунту) спричинило запуск каскаду морфологічних змін, які сприяли збереженню водного балансу рослин та підвищенню їх стресостійкості.

Ключові слова: *Carex hirta* L., абсцизова кислота, водний баланс, стресостійкість, нафтове забруднення ґрунту.

Дослідження останніх років здебільшого зосереджені на вивченні реакцій рослин на окремі абіотичні стреси [1]. Однак у природі рослини часто зазнають одночасного впливу кількох абіотичних стресорів. Реакція рослин на комбіновані стреси відрізняється від реакції на окремі стреси [2, 3]. Цю реакцію на полістрес неможливо передбачити на основі реакцій на окремий стрес [4], оскільки запускають-

Цитування: Буньо Л.В., Цвілінюк О.М., Войтенко Л.В. Роль АБК у підтримці водного балансу *Carex hirta* L. за умов нафтового забруднення ґрунту. *Фізіологія рослин і генетика*. 2025. 57, № 2. С. 167—180. <https://doi.org/10.15407/frg2025.02.167>

ся специфічні системні реакції, які важливі для адаптації [2]. Дотепер незрозуміло, який ефект буде мати одночасна дія кількох стресів на рослину — антагоністичний, синергічний чи адитивний [5].

Нині пропонується комбінацію стресів розглядати як новий вид абіотичного стресу [6]. Таким комплексним полікомпонентним стресом для рослин є нафтове забруднення ґрунту, яке набуло широкого розповсюдження [7, 8, 9]. При потраплянні в ґрунт нафта може призвести до кількох проблем: токсичності ґрунту, зниження водоутримувальної здатності, вмісту вологи, гіпоксії та підвищеної температури [8, 10]. Такі ґрунти потребують відновлення.

Один з найекономічніших й екологічно чистих методів відновлення забрудненого нафтою ґрунту є метод фіторемедіації. Його перевагами порівняно з традиційними ремедіаційними технологіями є відсутність або невелика кількість виникаючих вторинних відходів, мінімальні порушення природних екосистем, можливість застосування як на малих, так і на великих територіях, естетичність, відносна простота реалізації, економічність [11]. Рослини для фіторемедіації мають бути місцевими [12, 13], придатними до кліматичних і ґрунтових умов забруднених ділянок [14] та витривалими до умов стресу [15]. Найповніша реалізація відновлювального потенціалу рослин-ремедіантів можлива за розкриття механізмів їхньої адаптації до умов забрудненого ґрунту.

Фітогормон абсцизова кислота (АБК) — ключовий регулятор реакції рослин на абіотичні стреси [16]. АБК є найдослідженішим стресовим гормоном [17], проте її роль за комбінованих стресів ще мало вивчена. Деякі дослідження показали, що за впливу комбінованого стресу (висока температура й посуха) в рослинах утворюється більше АБК, ніж за дії окремих складових [4, 18]. Попри те, що АБК виконує широкий спектр функцій у рості та розвитку рослин, її основною функцією є регуляція водного балансу рослин і стійкості до осмотичного стресу [19].

Наше дослідження мало на меті схарактеризувати роль АБК у регуляції водного режиму в рослин-фіторемедіантів осоки шорстково-лосистої (*Carex hirta* L.) за впливу комбінованого абіотичного стресу — нафтового забруднення ґрунту.

Методика

Дослідження проводили за умов дрібноділянкового польового досліді в південно-східній частині м. Борислава з такими географічними координатами: 49°28'0971" пн. ш., 23°42'6862" сх. д. Викопали два рови завглибшки 0,25 м і площею 4 м². Дно рову вистелили поліетиленовою плівкою з перфораціями. В один із них, що слугував контрольним, внесли місцевий дерново-підзолистий ґрунт із фоновим, природним нафтовим забрудненням, у другий — модельний, місцевий дерново-підзолистий ґрунт з додаванням нафти в розрахунку 50 г на 1 кг ґрунту (використовували сиру нафту з Бориславського нафтового родовища густиною 0,86 г/мл).

Через 20 діб на кожен ділянку висадили по 150 клонів рослин *C. hirta* віргінільного віку, які зростали на чистих територіях в од-

норідних екологічних умовах. Висаджували їх в шаховому порядку в лунки завглибшки 10—15 см, відстань між рослинами 15—25 см. Під час всього періоду росту рослин вологість ґрунту підтримували в межах 60 % повної вологості. Відбір зразків здійснювали на 30-ту добу росту рослин *C. hirta*, які перебували у фазі розетки (7—9 листків).

Для аналізу вмісту гормону АБК у 30-добових рослин відбирали листки із середнього ярусу та корені й фіксували в рідкому азоті. Далі рослинний матеріал гомогенізували та екстрагували 80 %-ним етанолом з 1—2 краплями антиоксиданту (0,02 % діетилдитіокарбамату натрію). Екстрагували етанолом двічі по дві години й один раз упродовж двадцяти годин за +4 °С. Гомогенат фільтрували й концентрували до водної фази за температури +40...45 °С. Три аліквоти із водного залишку заморожували й витримували за температури 18 °С упродовж 12 год для видалення білків і пігментів. Для виділення сумарної фракції АБК аліквоту розмороженого водного залишку доводили розчином 2 н HCl до рН 2,5 і центрифугували 20 хв за 15000 об/хв. Вільні форми АБК тричі екстрагували діетиловим ефіром (співвідношення 1 : 1) із надосадової рідини. Кількість зв'язаних форм АБК визначали після гідролізу водного залишку в 1 н NaOH у 30 %-ному етанолі.

Фракціонували АБК методом тонкошарової хроматографії (ТШХ) на пластинках Silufol UV-254 («Kavalier», Чехія) у системі розчинників хлороформ : етилацетат : оцтова кислота (70 : 30 : 5). Для ідентифікації гормону використовували АБК фірми «Sigma» (США). Аналітичне визначення фітогормону здійснювали методом високоефективної рідинної хроматографії на хроматографі Agilent 1200 LC з діодно-матричним детектором G 1315 B (США) на колонці Eclipse XDB-C 18 4,5×150 мм із зернистістю часток 5 мкм. Елюцію проводили в системі розчинників метанол : вода (37 : 63). Аналізували проби у режимі online, обраховували хроматограми за програмним забезпеченням Chem Station (версія В.03.01) у режимі offline. Вміст АБК виражали у нг/г сирової речовини [20].

Вимірювання об'єму кореневої системи здійснювали за методом Д.А. Сабініна й І.І. Колосова [21]. Добре промиті й просушені фільтрувальним папером корені з одного клону *C. hirta* занурювали в мірчий циліндр із дистильованою водою. Об'єм кореневої системи обчислювали за об'ємом води, яка витіснялася коренями у мірчому циліндрі.

Для обчислення кількості та аперттури продихів на абаксіальну поверхню середньої частини листка наносили тонкий мазок прозорого лаку. Плівку знімали препарувальною голкою і пінцетом, клеїли на предметне скло та аналізували за допомогою мікроскопа XS-5520 MICROMED разом із модулем цифрової кольорової камери 5 Mpix (CCD). Відбитки були зроблені на 7-ми листках кожного варіанта. Аперттуру продихів підраховували за збільшення ×600, а кількість — за збільшення ×150. Кількість продихів і ступінь їх відкритості підраховували в 15-ти полях зору в межах відбитка в кожному варіанті досліду. Для забезпечення однорідності вибірок, продихи розглядали

між другою та третьою жилкою, якщо лічити від центральної жилки листкової пластинки [22].

Товщину кутикули обчислювали на поперечних зрізах листків, отриманих із середньої частини листкової пластинки. Зрізи здійснювали лезом від руки [23].

Морфометричні показники клітин, які вимірювали з мікроскопічних зображень, здійснювали за програмним забезпеченням Місо Сартуре (версія 9.3).

Отримані кількісні значення були статистично оброблені за Microsoft Excel 2016. Достовірність різниці між експериментальними даними оцінювали за критерієм Стьюдента з використанням рівня значущості $p < 0,05$ та $0,01$ і $0,001$.

Результати та обговорення

Ендогенні програми стійкості рослин модифікуються таким чином, щоб структурні та метаболічні зміни допомогли подолати несприятливі умови навколишнього середовища. Однією з основних біохімічних змін у відповідь на стрес є підвищення рівня АБК [17]. За дії нафти в осоки шорстковолосистої, фітормедіанта забруднених нафтою ґрунтів [24], спостерігалось підвищення вмісту АБК у листках і коренях, відповідно, на 52 % і 19 % відносно контролю (рис. 1).

Експериментальні дані демонструють, що значна частина АБК, яка наявна в коренях, може мати листкове походження. Здатність АБК переміщуватись на великі відстані за допомогою білкових транспортерів у акропетальному та базипетальному напрямках судинами ксилеми та флоєми в усі органи рослини дає змогу гормону виконувати роль критичного месенджера стресового стану й здійснювати зв'язок між коренем і пагоном, регулювати транспорт води та контролювати комунікацію між органами [17, 25, 26]. Відомо, що для синтезу АБК у коренях використовуються попередники, які транспортуються з листків [27].

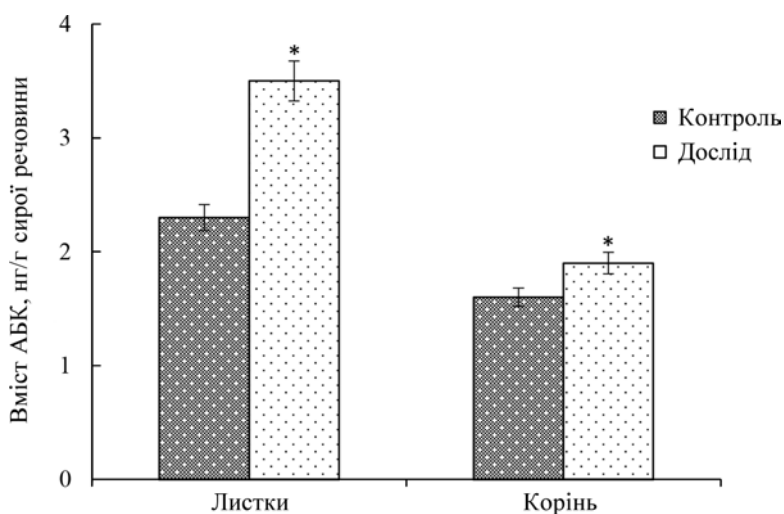


Рис. 1. Вміст АБК в органах рослин *C. hirta* на 30-ту добу росту за умов нафтового забруднення ґрунту (5 %) (*різниця між контролем і дослідом вірогідна за $p < 0,001$)

АБК синтезується в листках, корені, стеблі, плодах, однак головним сайтом утворення гормону є хлоропласти, судинна система та замикальні клітини продохів, а накопичується АБК здебільшого у вакуолях [28, 29]. Вміст абсцизової кислоти в листках зазвичай вищий, ніж у коренях [30]. Нами встановлено, що за дії нафтового забруднення у листках *C. hirta* сумарний рівень вільної і зв'язаної форм АБК був вищий у 1,5 раза порівняно з контрольними рослинами та удвічі порівняно з коренями. Відомо, що ендogenous вміст АБК у листках і коренях визначається співвідношенням між процесами біосинтезу, кон'югації, деградації, а також пов'язаний із можливістю її транспортування [30, 31]. Хоча основним місцем біосинтезу АБК є листки, а не корені [30, 32, 33], однак первинним місцем її біосинтезу буде той орган, який зазнає більшого стресового навантаження [34, 35]. Зниження водного потенціалу ґрунту індукує синтез АБК у коренях, яка транспортується по ксилемі до листків [34]. Також первинне місце біосинтезу АБК у рослин за дефіциту води може змінюватися залежно від стадій їх розвитку. Наприклад, в арахісу (*Arachis hypogaea* L.) за умов посухи на стадії розсади місцем біосинтезу АБК були корені, а на стадії плодоношення — листки [35].

Встановлено, що інтенсивність росту окремих органів рослин залежить від концентрації ендogenous АБК. Зокрема, зміни рівня цього гормону задіяні у регуляції розвитку та росту кореневої системи культурних злаків [17, 26, 36]. Корені рослин *C. hirta* за дії нафтового забруднення мали вищий вміст АБК порівняно з контролем (див. рис. 1) і, відповідно, були довшими й товщими [24]. Такі зміни призвели до збільшення у 3,6 раза загального об'єму кореневої системи порівняно з контрольним варіантом (рис. 2). Об'єм кореневої системи, як інтегральний показник, залежить від кількості бічних коренів, їхньої товщини й наявності кореневих волосків і характеризує її потужність. Довгі та товсті корені *C. hirta* сприяють росту рослин в умовах водного стресу, спричиненого нафтовим забрудненням ґрунту [26].

Під час посухи швидкість втрати води через транспірацію може перевищувати швидкість поглинання води коренями. Тому відбува-

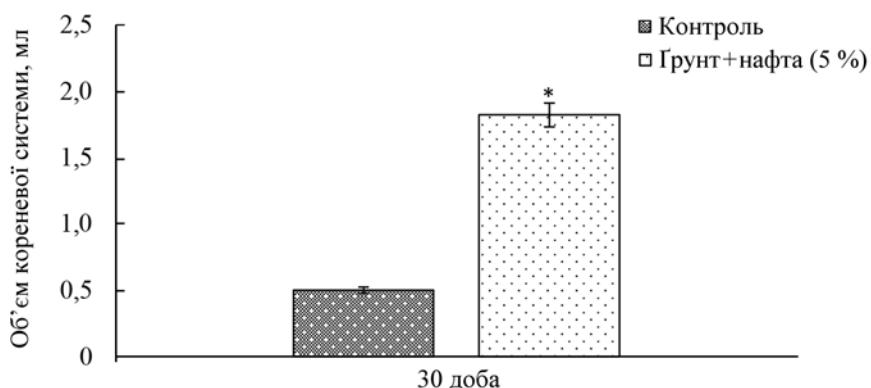


Рис. 2. Об'єм кореневої системи рослин *C. hirta* (одна зона кушіння) за умов росту на забрудненому нафтою ґрунті (*різниця між контрольними та дослідними рослинами вірогідна за $p < 0,05$)

ється перерозподіл ресурсів в організмі рослини. Збільшується об'єм кореневої системи, яка є водопоглинальним органом [37, 38]. Гідротропізм є основним механізмом, що спрямовує ріст коренів для пошуку води, й АБК є важливим чинником, який впливає на гідротропні реакції кореня. Корені рослин або глибоко проникають у ґрунт, утворюючи множинну бічних коренів при наближенні до підземного джерела вологи, або відразу збільшуються в діаметрі, утворюють більше бічних корінців із більшою кількістю кореневих волосків, у такий спосіб збільшуючи загальну площу поглинальної поверхні, що сприяє максимуму вилучення вологи та поживних речовин із ґрунту [31, 39].

Підвищений вміст АБК у коренях рослин за умов дефіциту води відіграє важливу роль у передаванні сигналів від коренів, які перебувають за стресових умов, до пагонів, що, зрештою, призводить до водозберігальної антитранспірантної активності, зокрема до закривання продихів [31, 40]. Продиховий апарат виконує основну роль у випаровуванні води рослинами, тому швидкість транспірації значною мірою залежить від ступеня їх відкритості [41]. Апертура продихів регулюється тургоріндукованими змінами розмірів продихових замикальних клітин і відіграє значну роль у регуляції водного статусу рослини [40, 42]. Нами було виявлено, що кількість продихів на абаксіальній поверхні листка за дії нафтового забруднення майже не відрізнялась від контролю (рис. 3).

В епідермі *C. hirta* на абаксіальній поверхні листків переважали напіввідкриті продихи станом на 12 год доби (рис. 4). У рослин, що росли на забрудненому нафтою ґрунті, кількість напіввідкритих продихів збільшилась, а повністю відкритих продихів зменшилась, відповідно на 15 та 14 % відносно контролю. Натомість кількість закритих продихів була практично на рівні контролю. Дослідженнями Г. Коровецької зі співавт. [43] встановлено, що для продихів листків *C. hirta* характерна так звана продихова плямистість — різний ступінь відкритості продихів у певний момент часу за умов нафтового забруднення. Піки відкритості продихів у листках були зміщені у часі на 2 год порівняно з контрольними зразками.

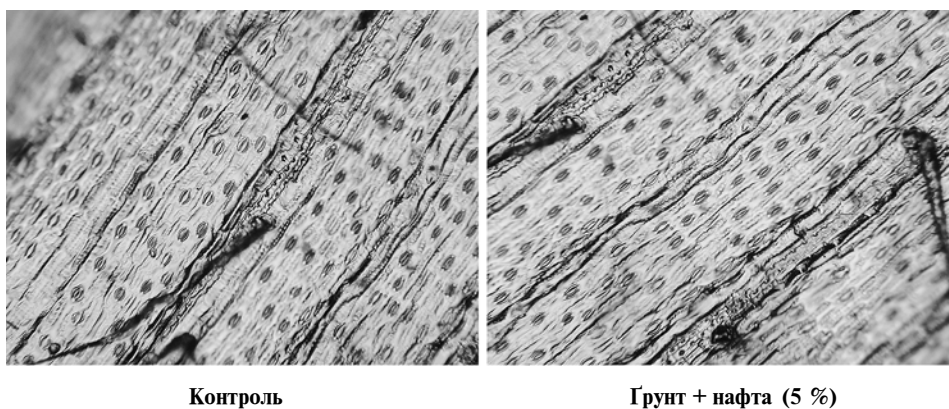


Рис 3. Відбитки абаксіальної поверхні листків контрольних рослин *C. hirta* та на 30-ту добу росту на забрудненому нафтою ґрунті (5 % нафти) ($\times 150$)

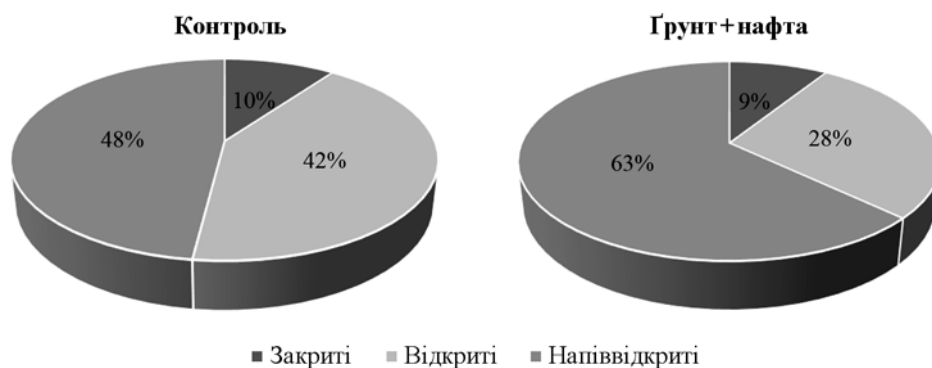


Рис. 4. Стан продихів (% загальної кількості) листків контрольних рослин *C. hirta* та на 30-ту добу росту за умов нафтового забруднення ґрунту (5 %)

За умов стресу продихи можуть мати неповний ступінь відкритості або закриватись повністю [44]. Апертура продихів зменшується за тривалої нестачі вологи в ґрунті [27, 40, 45], що узгоджується з отриманими нами результатами. Можливо, таке зниження апертури продихів листків, що зростали за умов водного дефіциту, спричиненого нафтовим забрудненням, допомагає рослині знизити втрати води.

Центральну роль у регуляції руху продихів відіграє АБК [40, 46]. За умов браку води сигнал про необхідність закриття продихів надходить до листків від коренів [33]. Водночас посилена акумуляція АБК у листках може зберігатись упродовж кількох тижнів. Так, у листках *Fagus sylvatica* L. підвищений рівень АБК зберігався впродовж 30 днів посухи [33].

В умовах браку вологи АБК індукує також потовщення кутикули епідерми листків [47]. Якщо продихи є епідермальними порами, які контролюють водообмін, то кутикула є гідрофобним зовнішнім шаром клітинної стінки епідерми, який запобігає позапродиховій втраті води [47]. За умов нафтового забруднення у рослин *C. hirta* сформувалась майже утричі товща кутикула на епідермі адаксіальної поверхні листків та удвічі на епідермі абаксіальної поверхні порівняно з контролем (таблиця). Кутикула, змінюючи свою товщину, формує щільніший бар'єр на шляху транспірації води.

Товща та менш проникна кутикула за дефіциту води утворюється внаслідок накопичення кутину й воску [48]. АБК опосередковано регулює відкладення кутину й безпосередньо регулює синтез воску та збільшує його вміст у кутикулі. Кутин також опосередковано регулює біосинтез АБК. Було показано, що у рослин із порушен-

Вміст води і товщина кутикули у листках рослин C. hirta на 30-ту добу росту за умов нафтового забруднення ґрунту (5 % нафти)

Варіант	Вміст води, %		Товщина кутикули, мкм	
	листки	корені	верхня епідерма	нижня епідерма
Контроль	68,5±1,2	80,0±1,7	1,15±0,47	0,98±0,14
Ґрунт+нафта	76,5±0,9*	61,6±1,8*	3,09±0,78*	1,97±0,32*

*Різниця між контрольними та дослідними рослинами вірогідна за $p < 0,05$.

ням біосинтезу кутину знижується накопичення АБК і толерантність до осмотичного стресу, хоча цей механізм нез'ясований [25, 47, 49].

Підвищений рівень АБК індукуює морфологічні зміни в рослин осоки шорстковолосистої, які за умов росту на забрудненому нафтою ґрунті, що утруднює водопоглинання і спричинює гіпоксію, мають сприяти зберіганню води. Було виявлено перерозподіл води в органах рослини — вміст води в листках підвищився на 12 %, а у коренях знизився на 23 % відносно контрольних показників (див. таблицю). Такий розподіл води характеризує закономірності її поглинання та використання органами рослини [50]. Листки відтягують воду від підземної частини рослини. Менший вміст води в коренях під час посухи зумовлює покращення їхньої водопоглинальної здатності [39, 50].

Таким чином, виявлене підвищення вмісту ендогенної АБК у коренях та листках підтверджує її залучення до формування захисних реакцій, а саме — до збереження води в рослин *C. hirta* за умов полікомпонентного стресу — нафтового забруднення ґрунту. Ендогенна АБК задіяна у підтримці водного балансу регуляцією апертури продихів і потовщення кутикули епідерми адаксіальної та абаксіальної поверхонь листків. Найвні зміни в кореневій системі *C. hirta* за впливу комбінованого нафтового стресу через підвищений вміст АБК сприяють посиленню здатності рослин поглинати воду з ґрунту.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Shahzad K., Hussain S., Arfan M., Hussain S., Waraich E.A., Zamir S., Saddique M., Rauf A., Kamal K.Y., Hano C., El-Esawi M.A. Exogenously applied gibberellic acid enhances growth and salinity stress tolerance of maize through modulating the morphophysiological, biochemical and molecular attributes. *Biomolecules*. 2021. **11** (7). <https://doi.org/10.3390/biom11071005>
2. Zandalinas S.I., Fichman Y., Devireddy A.R., Sengupta S., Azad R.K., Mittler R. Systemic signaling during abiotic stress combination in plants. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2020. **117** (24). P. 13810—13820. <https://doi.org/10.1073/pnas.2005077117>
3. Zandalinas S.I., Fritsch F.B., Mittler R. Signal transduction networks during stress combination. *J. Exp. Bot.* 2020. **71** (5). P. 1734—1741. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz486>
4. Jing Z., Liu N., Zhang Z., Hou X. Research progress on plant responses to stress combinations in the context of climate change. *Plants*. 2024. **13**. <https://doi.org/10.3390/plants13040469>
5. Vescio R., Caridi R., Laudani F., Palmeri V., Zappala L., Badiani M., Sorgona A. Abiotic and herbivory combined stress in tomato: additive, synergic and antagonistic effects and within-plant phenotypic plasticity. *Life*. 2022. **12**. <https://doi.org/10.3390/life12111804>
6. Oyebamiji Y.O., Adigun B.A., Shamsudin N.A.A., Ikmal A.M., Salisu M.A., Malike F.A., Lateef A.A. Recent advancements in mitigating abiotic stresses in crops. *Horticulturae*. 2024. **10** (2). <https://doi.org/10.3390/horticulturae10020156>
7. Moradi S., Sarikhani M.R., Ale-Agha A.B., Hasanpur K., Shiri J. Effects of natural and prolonged crude oil pollution on soil enzyme activities. *Geoderma Reg.* 2024. **36**. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00742>
8. Jabbarov Z., Nomozov U., Kenjaev Y., Abdushukurova Z., Zakirova S., Mahkamova A., Kamilov B., Kurvantaev R., Kholdarov D., Turdaliev A., Yuldashev G. Effects of pollution of saline soils with oil and oil products on soil physical properties. *E3S Web of Conferences*. 2024. **497**. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202449703006>

9. Sharma K., Shah G., Singhal K., Soni V. Comprehensive insights into the impact of oil pollution on the environment. *Reg. Studies Marine Science*. 2024. **74** (6). <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103516>
10. Kanungo J., Sahoo T., Bal M., Behera I.D. Performance of bioremediation strategy in waste lubricating oil pollutants: a review. *Geomicrobiol. J.* 2023. **4**. P. 360–373. <https://doi.org/10.1080/01490451.2023.2245395>
11. Khan S., Masoodi T.H., Pala N.A., Murtaza S., Mugloo J.A., Sofi P.A., Zaman M.U., Kumar R., Kumar A. Phytoremediation Prospects for restoration of contamination in the natural ecosystems. *Water*. 2023. **15** (8). <https://doi.org/10.3390/w15081498>
12. Aloud S.S., Alotaibi K.D., Almutairi K.F., Albarakah F.N. Phytoremediation potential of native plants growing in industrially polluted soils of al-qassim, saudi arabia. *Sustainability*. 2023. **15** (3). <https://doi.org/10.3390/su15032668>
13. Azizi M., Faz A., Zornoza R., Martinez-Martinez S., Acosta J.A. Phytoremediation potential of native plant species in mine soils polluted by metal(loid)s and rare earth elements. *Plants*. 2023. **12** (6). <https://doi.org/10.3390/plants12061219>
14. Paes Q.C., Veloso G.V., Filho M.N.C., Barroso S.H., Fernandes-Filho E.I., Fontes M.P.F., Soares E.M.B. Potential of plant species adapted to semi-arid conditions for phytoremediation of contaminated soils. *J. Hazardous Materials*. 2023. **449**. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131034>
15. Kaffle A., Timilsina A., Gautam A., Adhikari K., Bhattarai A., Arya N. Phytoremediation: mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents. *Env. Adv.* 2022. **8**. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100203>
16. Yang X., Jia Z., Pu Q., Tian Y., Zhu F., Liu Y. ABA mediates plant development and abiotic stress via alternative splicing. *Int. J. Mol. Sci.* 2022. **23** (7). <https://doi.org/10.3390/ijms23073796>
17. Косаківська І.В., Щербатюк М.М., Васюк В.А., Войтенко Л.В. Значення фітогормонів у регуляції росту та формуванні стресостійкості культурних злаків. *Фізіологія рослин і генетика*. 2024. **56**, № 2. С. 130–150. <https://doi.org/10.15407/frg2024.02.130>
18. Shabbir R., Singhal R.K., Mishra U.N., Chauhan J., Javed T., Hussain S., Kumar S., Anuragi H., Lal D., Chen P. Combined abiotic stresses: challenges and potential for crop improvement. *Agronomy*. 2022. **12**. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112795>
19. Rehman A., Azhar M.T., Hinze L., Qayyum A., Li H., Penge Z., Qina G., Jiae Y., Pane Z., He S., Du X. Insight into abscisic acid perception and signaling to increase plant tolerance to abiotic stress. *J. Plant Int.* 2021. **16** (1). P. 222–237. <https://doi.org/10.1080/17429145.2021.1925759>
20. Косаківська І.В., Васюк В.А., Войтенко Л.В., Щербатюк М.М. Регуляція гормонального балансу пшениці екзогенною абсцизовою кислотою за умов теплового стресу. *Вісн. Харків. нац. аграр. ун-ту. Сер. Біологія*. 2021. **1** (52). С. 52–66. <https://doi.org/10.35550/vbio2021.01.052>
21. Фізіологія рослин: практикум: Паршикова Т.В. (ред.). Луцьк: Терен, 2010. 420 с.
22. Israel W.K., Watson-Lazowski A., Chen Z.-H., Ghannoum O. High intrinsic water use efficiency is underpinned by high stomatal aperture and guard cell potassium flux in C₃ and C₄ grasses grown at glacial CO₂ and low light. *J. Exp. Bot.* 2022. **73** (5). P. 1546–1565. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab477>
23. Yeung E.C. A beginner's guide to the study of plant structure. pp. 125–141. In: Tested studies for laboratory teaching, 19. Ed. S.J. Karcher. Proceedings of the 19th Workshop/Conference of the Association for Biology Laboratory Education (ABLE). 1998. 365 p. <https://www.researchgate.net/publication/228552007>
24. Bunio L.V., Tsvilynyuk O. M. Influence of crude oil pollution on the content and electrophoretic spectrum of proteins in *Carex hirta* plants at the initial stages of vegetative development. *Reg. Mechan. Bio.* 2021. **12** (3). P. 459–466. <https://doi.org/10.15421/022163>
25. Косаківська І.В., Васюк В.А., Войтенко Л.В., Щербатюк М.М. Гормональна система рослин за дії важких металів. Київ: Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного, 2022. 176 с.
26. Teng Z., Lyu J., Chen Y., Zhang J., Ye N. Effects of stress-induced ABA on root architecture development: Positive and negative actions. *Crop Journal*. 2023. **11** (4). P. 1072–1079. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2023.06.007>
27. Buckley T.N. How do stomata respond to water status? *New Phytol.* 2019. **224**. P. 21–36. <https://doi.org/10.1111/nph.15899>

28. Muhammad Aslam M., Waseem M., Jakada B.H., Okal E.J., Lei Z., Saqib H.S.A., Yuan W., Xu W., Zhang Q. Mechanisms of abscisic acid-mediated drought stress responses in plants. *Int. J. Mol. Sci.* 2022. **23** (3). <https://doi.org/10.3390/10.3390/ijms23031084>
29. Bajguz A., Piotrowska-Niczyporuk A. Biosynthetic pathways of hormones in plants. *Metabolites*. 2023. **13** (8). <https://doi.org/10.3390/metabo13080884>
30. Troups H.S., Cochetel N., Deluc L., Cramer G.R. Abscisic acid metabolism pathways differ between grapevine species, leaves, and roots during water deficit. *OENO One*. 2022. **56** (4). P. 125–137. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2022.56.4.5483>
31. Rai G.K., Khanday D.M., Choudhary S.M., Kumar P., Kumari S., Мартінез-Андрѣјар С., Мартінез-Мелгарејо P.A., Rai P.K., Prerez-Alfocea F. Unlocking nature's stress buster: Abscisic acid's crucial role in defending plants against abiotic stress. *Plant Stress*. 2024. **11**. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100359>
32. Liu Y., Chen S., Wei P., Guo S., Wu J. A briefly overview of the research progress for the abscisic acid analogues. *Front. Chem.* 2022. **10**. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.967404>
33. Kane C.N., McAdam S.A.M. Abscisic acid driven stomatal closure during drought in anisohydric *Fagus sylvatica*. *J. Plant Hydraul.* 2023. **9**. <https://doi.org/10.20870/jph.2023.002>
34. Takahashi F., Kuromori T., Urano K., Yamaguchi-Shinozaki K., Shinozaki K. Drought stress responses and resistance in plants: from cellular responses to long distance inter-cellular communication. *Front. Plant Sci.* 2020. **11**. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.556972>
35. Hu B., Cao J., Ge K., Li L. The site of water stress governs the pattern of ABA synthesis and transport in peanut. *Sci. Rep.* 2016. **6**. <https://doi.org/10.1038/srep32143>
36. Kosakivska I.V., Voytenko L.V., Vasyuk V.A., Shcherbatiuk M.M. Effect of zinc on growth and phytohormones accumulation in *Triticum aestivum* L. priming with abscisic acid. *Dopov. nac. akad. nauk Ukr.* 2019. **11**. P. 93–99. <https://doi.org/10.15407/dopovid2019.11.093>
37. Conceição-Sabino F., Souza L.S.B., Souza M.A.G., Barros J.P.A., Lucena L.R.R., Jardim A.M.R.F., Rocha A.K.P., Silva T.G.F. Morphological characteristics, biomass accumulation and gas exchange of an important species native for restoration in Semi-arid Brazilian areas affected by salt and water stress. *Plant Stress*. 2021. **2**. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100021>
38. Seleiman M.F., Al-Suhaibani N., Ali N., Akmal M., Alotaibi M., Refay Y., Dindaroglu T., Abdul-Wajid H.H., Battaglia M.L. Drought stress Impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*. 2021. **10** (2). <https://doi.org/10.3390/plants10020259>
39. Sandar M.M., Ruangsiri M., Chutteang C., Arunyanark A., Toojinda T., Siangliw J.L. Root characterization of myanmar upland and lowland rice in relation to agronomic and physiological traits under drought stress condition. *Agronomy*. 2022. **12** (5). <https://doi.org/10.3390/agronomy12051230>
40. Manandhar A., Pichaco J., McAdam S.A.M. Abscisic acid increase correlates with the soil water threshold of transpiration decline during drought. *Plant Cell Environ.* 2024. **47** (12). P. 5067–5075. <https://doi.org/10.1111/pce.15087>
41. Caine R.S., Harrison E.L., Sloan J., Flis P.M., Fischer S., Khan M.S., Nguyen P.T., Nguyen L.T., Gray J.E., Croft H. The influences of stomatal size and density on rice abiotic stress resilience. *New Phytol.* 2023. **237**. P. 2180–2195. <https://doi.org/10.1111/nph.18704>
42. Bawa G., Yu X., Liu Z., Zhou Y., Sun, X. Surviving the enemies: regulatory mechanisms of stomatal function in response to drought and salt stress. *Env. Exp. Botany*. 2023. **209**. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105291>
43. Коровецька Г., Соханьчак Р., Джура Н., Цвілинюк О., Терек О. Стан продихового апарату листків рослин *Carex hirta* L. за впливу нафтового забруднення ґрунту. *Вісник Львівського університету. Серія біологічна*. 2008. Вип. 47. С. 166–171.
44. Driesen E., Proft M., Saeys W. Article drought stress triggers alterations of adaxial and abaxial stomatal development in basil leaves increasing water-use efficiency. *Horticult. Res.* 2023. **10** (6). <https://doi.org/10.1093/hr/uhad075>
45. Wang L., Zhang Y., Luo D., Hu X., Feng P., Mo Y., Li H., Gong S. Integrated effects of soil moisture on wheat hydraulic properties and stomatal regulation. *Plants*. 2024. **13** (16). <https://doi.org/10.3390/plants13162263>

46. Zhang Q., Tang W., Xiong Z., Peng S., Li Y. Stomatal conductance in rice leaves and panicles responds differently to abscisic acid and soil drought. *J. Exp. Bot.* 2023. **74** (5). P. 1551–1563. <https://doi.org/10.1093/jxb/erac496>
47. Brookbank B.P., Patel J., Gazzarrini S., Nambara E. Role of basal ABK in plant growth and development. *Genes*. 2021. **12** (12). <https://doi.org/10.3390/genes12121936>
48. He M., He C.-Q., Ding N.-Z. Abiotic stresses: general defenses of land plants and chances for engineering multistress tolerance. *Front. Plant Sci.* 2018. **9**. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01771>
49. Romero P., Lafuente M.T. The combination of abscisic acid (ABA) and water stress regulates the epicuticular wax metabolism and cuticle properties of detached citrus fruit. *Int. J. Mol. Sci.* 2021. **22** (19). <https://doi.org/10.3390/ijms221910242>
50. Yan S., Weng B., Jing L., Bi W. Effects of drought stress on water content and biomass distribution in summer maize (*Zea mays* L.). *Front. Plant Sci.* 2023. **14**. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1118131>

Отримано 18.03.2025

REFERENCES

1. Shahzad, K., Hussain, S., Arfan, M., Hussain, S., Waraich, E.A., Zamir, S., Saddique, M., Rauf, A., Kamal, K.Y., Hano, C. & El-Esawi, M.A. (2021). Exogenously applied gibberellic acid enhances growth and salinity stress tolerance of maize through modulating the morpho-physiological, biochemical and molecular attributes. *Biomolecul.*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/biom11071005>
2. Zandalinas, S.I., Fichman, Y., Devireddy, A.R., Sengupta, S., Azad, R.K. & Mittler, R. (2020). Systemic signaling during abiotic stress combination in plants. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 117(24), pp. 13810-13820. <https://doi.org/10.1073/pnas.2005077117>
3. Zandalinas, S.I., Fritschi, F.B. & Mittler, R. (2020). Signal transduction networks during stress combination. *J. Exp. Bot.*, 71 (5), pp. 1734-1741. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz486>
4. Jing, Z., Liu, N., Zhang, Z. & Hou, X. (2024). Research progress on plant responses to stress combinations in the context of climate change. *Plants*, 13. <https://doi.org/10.3390/plants13040469>
5. Vescio, R., Caridi, R., Laudani, F., Palmeri, V., Zappala, L., Badiani, M. & Sorgona, A. (2022). Abiotic and herbivory combined stress in tomato: additive, synergic and antagonistic effects and within-plant phenotypic plasticity. *Life*, 12. <https://doi.org/10.3390/life12111804>
6. Oyebamiji, Y.O., Adigun, B.A., Shamsudin, N.A.A., Ikmal, A.M., Salisu, M.A., Malike, F.A. & Lateef, A.A. (2024). Recent advancements in mitigating abiotic stresses in crops. *Horticult.*, 10 (2). <https://doi.org/10.3390/horticulturae10020156>
7. Moradi, S., Sarikhani, M.R., Ale-Agha, A.B., Hasanpur, K. & Shiri, J. (2024). Effects of natural and prolonged crude oil pollution on soil enzyme activities. *Geoderma R.*, 36. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00742>
8. Jabbarov, Z., Nomozov, U., Kenjaev, Y., Abdushukurova, Z., Zakirova, S., Mahkamova, A., Kamilov, B., Kurvantaev, R., Kholdarov, D., Turdaliev, A. & Yuldashev, G. (2024). Effects of pollution of saline soils with oil and oil products on soil physical properties. *E3S Web of Conferences*, 497. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202449703006>
9. Sharma, K., Shah, G., Singhal, K. & Soni, V. (2024). Comprehensive insights into the impact of oil pollution on the environment. *Reg. Stud. Marine Science*, 74(6), 103516. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103516>
10. Kanungo, J., Sahoo, T., Bal, M. & Behera, I.D. (2023). Performance of bioremediation strategy in waste lubricating oil pollutants: a review. *Geomicrobiol. J.*, 4, pp. 360-373. <https://doi.org/10.1080/01490451.2023.2245395>
11. Khan, S., Masoodi, T.H., Pala, N.A., Murtaza, S., Mugloo, J.A., Sofi, P.A., Zaman, M.U., Kumar, R. & Kumar, A. (2023). Phytoremediation prospects for restoration of contamination in the natural ecosystems. *Water*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/w15081498>

12. Aloud, S.S., Alotaibi, K.D., Almutairi, K.F. & Albarakah, F.N. (2023). Phytoremediation potential of native plants growing in industrially polluted soils of al-qassim, saudi arabia. *Sustainability*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/su15032668>
13. Azizi, M., Faz, A., Zornoza, R., Martinez-Martinez, S. & Acosta, J.A. (2023). Phytoremediation potential of native plant species in mine soils polluted by metal(loid)s and rare earth elements. *Plants*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/plants12061219>
14. Paes, Q.C., Veloso, G.V., Filho, M.N.C., Barroso, S.H., Fernandes-Filho, E.I., Fontes, M.P.F. & Soares, E.M.B. (2023). Potential of plant species adapted to semi-arid conditions for phytoremediation of contaminated soils. *J. Hazardous Materials*, 449. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131034>
15. Kafle, A., Timilsina, A., Gautam, A., Adhikari, K., Bhattarai, A. & Arya, N. (2022). Phytoremediation: mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents. *Env. Adv.*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100203>
16. Yang, X., Jia, Z., Pu, Q., Tian, Y., Zhu, F. & Liu, Y. (2022). ABA mediates plant development and abiotic stress via alternative splicing. *Int. J. Mol. Sci.*, 23(7). <https://doi.org/10.3390/ijms23073796>
17. Kosakivska, I.V., Shcherbatiuk, M.M., Vasjuk, V.A. & Voytenko, L.V. (2024). Phytohormones in growth regulation and the formation of stress resistance in cultivated cereals. *Fiziol. rast. genet.*, 56(2), pp. 130-150 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/frg2024.02.130>
18. Shabbir, R., Singhal, R.K., Mishra, U.N., Chauhan, J., Javed, T., Hussain, S., Kumar, S., Anuragi, H., Lal, D. & Chen, P. (2022). Combined abiotic stresses: challenges and potential for crop improvement. *Agronomy*, 12. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112795>
19. Rehman, A., Azhar, M.T., Hinze, L., Qayyum, A., Li, H., Penge, Z., Qina, G., Jiae, Y., Pane, Z., He, S. & Du, X. (2021). Insight into abscisic acid perception and signaling to increase plant tolerance to abiotic stress. *J. Plant Interact.*, 16(1), pp. 222-237. <https://doi.org/10.1080/17429145.2021.1925759>
20. Kosakivska, I.V., Vasyuk, V.A., Voytenko, L.V. & Shcherbatiuk, M.M. (2021). Regulation of hormonal balance of wheat by exogenous abscisic acid under heat stress. *Visn. Hark. nac. agrar. univ., Ser. Biol.*, 1(52), pp. 52-66 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.35550/vbio2021.01.052>
21. Parshykova, T.V. (Eds.). (2010). *Plant physiology: practical*. Lutsk: Teren, 420 p. [in Ukrainian].
22. Israel, W.K., Watson-Lazowski, A., Chen, Z.-H. & Ghannoum, O. (2022). High intrinsic water use efficiency is underpinned by high stomatal aperture and guard cell potassium flux in C₃ and C₄ grasses grown at glacial CO₂ and low light. *J. Exp. Bot.*, 73(5), pp. 1546-1565. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab477>
23. Yeung, E.C. (1998). A beginner's guide to the study of plant structure. pp. 125-141. In: *Tested studies for laboratory teaching*, 19. Ed. S. J. Karcher. *Proceedings of the 19th Workshop/Conference of the Association for Biology Laboratory Education (ABLE)*. <https://www.researchgate.net/publication/228552007>
24. Bunio, L.V. & Tsvilnyuk, O.M. (2021). Influence of crude oil pollution on the content and electrophoretic spectrum of proteins in *Carex hirta* plants at the initial stages of vegetative development. *Reg. Mech. Bio.*, 12(3), pp. 459-466. <https://doi.org/10.15421/022163>
25. Kosakivska, I.V., Vasyuk, V.A., Voytenko, L.V. & Shcherbatiuk, M.M. (2022). Plant hormonal system under heavy metal stress. Kyiv: M.G. Kholodny Institute of Botany [in Ukrainian].
26. Teng, Z., Lyu, J., Chen, Y., Zhang, J. & Ye, N. (2023). Effects of stress-induced ABA on root architecture development: Positive and negative actions. *Crop Journal*, 11(4), pp. 1072-1079. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2023.06.007>
27. Buckley, T.N. (2019). How do stomata respond to water status? *New Phytol.*, 224, pp. 21-36. <https://doi.org/10.1111/nph.15899>
28. Muhammad Aslam, M., Waseem, M., Jakada, B.H., Okal, E.J., Lei, Z., Saqib, H.S.A., Yuan, W., Xu, W. & Zhang, Q. (2022). Mechanisms of abscisic acid-mediated drought stress responses in plants. *Int. J. Mol. Sci.*, 23(3). <https://doi.org/10.3390/ijms23031084>
29. Bajguz, A. & Piotrowska-Niczyporuk, A. (2023). Biosynthetic pathways of hormones in plants. *Metabolites*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/metabo13080884>

30. Toups, H.S., Cochetel, N., Deluc, L. & Crame, G.R. (2022). Abscisic acid metabolism pathways differ between grapevine species, leaves, and roots during water deficit. *OENO One*, 56(4), pp. 125-137. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2022.56.4.5483>
31. Rai, G.K., Khanday, D.M., Choudhary, S.M., Kumar, P., Kumari, S., Martinez-Andjar, C., Martinez-Melgarejo, P.A., Rai, P.K. & Perez-Alfocea, F. (2024). Unlocking nature's stress buster: Abscisic acid's crucial role in defending plants against abiotic stress. *Plant Stress*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100359>
32. Liu, Y., Chen, S., Wei, P., Guo, S. & Wu, J. (2022). A briefly overview of the research progress for the abscisic acid analogues. *Front. Chem.* 10. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.967404>
33. Kane, C.N. & McAdam, S.A.M. (2023). Abscisic acid driven stomatal closure during drought in anisohydric *Fagus sylvatica*. *J. Plant Hydraul.*, 9. <https://doi.org/10.20870/jph.2023.002>
34. Takahashi, F., Kuromori, T., Urano, K., Yamaguchi-Shinozaki, K. & Shinozaki, K. (2020) Drought stress responses and resistance in plants: from cellular responses to long distance intercellular communication. *Front. Plant Sci.*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.556972>
35. Hu, B., Cao, J., Ge, K. & Li, L. (2016). The site of water stress governs the pattern of ABA synthesis and transport in peanut. *Sci. Rep.*, 6. <https://doi.org/10.1038/srep32143>
36. Kosakivska, I.V., Voytenko, L.V., Vasyuk, V.A. & Shcherbatiuk, M.M. (2019). Effect of zinc on growth and phytohormones accumulation in *Triticum aestivum* L. priming with abscisic acid. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, 11, pp. 93-99. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2019.11.093>
37. Conceicao-Sabino, F., Souza, L.S.B., Souza, M.A.G., Barros, J.P.A., Lucena L.R.R., Jardim, A.M.R.F., Rocha, A.K.P. & Silva, T.G.F. (2021). Morphological characteristics, biomass accumulation and gas exchange of an important species native for restoration in Semi-arid Brazilian areas affected by salt and water stress. *Plant Stress*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100021>
38. Seleiman, M.F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H.H. & Battaglia, M.L. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/plants10020259>
39. Sandar, M.M., Ruangsiri, M., Chutteang, C., Arunyanark, A., Toojinda, T. & Siangliw, J.L. (2022). Root characterization of myanmar upland and lowland rice in relation to agronomic and physiological traits under drought stress condition. *Agronomy*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/agronomy12051230>
40. Manandhar, A., Pichaco, J. & McAdam, S.A.M. (2024). Abscisic acid increase correlates with the soil water threshold of transpiration decline during drought. *Plant Cell Environ.*, 47(12), pp. 5067-5075. <https://doi.org/10.1111/pce.15087>
41. Caine, R.S., Harrison, E.L., Sloan, J., Flis, P.M., Fischer, S., Khan, M.S., Nguyen, P.T., Nguyen, L.T., Gray, J.E. & Croft, H. (2023). The influences of stomatal size and density on rice abiotic stress resilience. *New Phytol.*, 237, pp. 2180-2195. <https://doi.org/10.1111/nph.18704>
42. Bawa, G., Yu, X., Liu, Z., Zhou, Y. & Sun, X. (2023). Surviving the enemies: Regulatory mechanisms of stomatal function in response to drought and salt stress. *Env. Exp. Botany*, 209. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105291>
43. Korovetska, H., Sohanchak, R., Djura, N., Tsvilynjuk, O. & Terek, O. (2008). Tomatal behaviour in *Carex hirta* L. plants under oil pollution. *Visnyk of Lviv Univ. Biology series*, 47. pp. 166-171 [in Ukrainian].
44. Driesen, E., Proft, M. & Saeys, W. (2023). Article drought stress triggers alterations of adaxial and abaxial stomatal development in basil leaves increasing water-use efficiency. *Horticult. Res.*, 10(6). <https://doi.org/10.1093/hr/uhad075>
45. Wang, L., Zhang, Y., Luo, D., Hu, X., Feng, P., Mo, Y., Li, H. & Gong, S. (2024). Integrated effects of soil moisture on wheat hydraulic properties and stomatal regulation. *Plants*, 13(16). <https://doi.org/10.3390/plants13162263>
46. Zhang, Q., Tang, W., Xiong, Z., Peng, S. & Li, Y. (2023). Stomatal conductance in rice leaves and panicles responds differently to abscisic acid and soil drought. *J. Exp. Bot.*, 74(5), pp. 1551-1563. <https://doi.org/10.1093/jxb/erac496>
47. Brookbank, B.P., Patel, J., Gazzarrini, S. & Nambara, E. (2021). Role of basal ABK in plant growth and development. *Genes*, 12 (12). <https://doi.org/10.3390/genes12121936>

48. He, M., He, C.-Q. & Ding, N.-Z. (2018). Abiotic stresses: general defenses of land plants and chances for engineering multistress tolerance. *Front. Plant Sci.*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01771>
49. Romero, P. & Lafuente, M.T. (2021). The combination of abscisic acid (ABA) and Water Stress Regulates the Epicuticular Wax Metabolism and cuticle properties of detached citrus fruit. *Int. J. Mol. Sci.*, 22 (19). <https://doi.org/10.3390/ijms221910242>
50. Yan, S., Weng, B., Jing, L. & Bi, W. (2023). Effects of drought stress on water content and biomass distribution in summer maize (*Zea mays* L.). *Front. Plant Sci.*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1118131>

Received 18.03.2025

THE ROLE OF ABA IN SUPPORTING THE WATER BALANCE IN *CAREX HIRTA* L. UNDER CONDITIONS OF OIL POLLUTED SOIL

L.V. Bunio¹, O.M. Tsvilynyuk¹, L.V. Voytenko²

¹Ivan Franko Lviv National University
4 Hrushevsky St., Lviv 79005, Ukraine

²M.G. Kholodny Institute of Botany, National Academy of Sciences of Ukraine
2 Tereshchenkivska St., Kyiv, 01004, Ukraine
e-mail: bunio.lyubov@gmail.com

Today, the generally recognized stress hormone is abscisic acid (ABA), which is involved in the regulation of plant resistance to a number of abiotic stressors — drought, salinity, high and low temperatures, heavy metals. Oil pollution of soil, which is quite widespread, is a complex multicomponent stress for plants. Plants growing on oil-polluted soil suffer from drought, hypoxia and elevated temperature. Despite the wide range of regulatory roles of ABA during plant growth and development, the mechanism of its action is primarily due to the regulation of water balance in plants under stress. The aim of our study was to characterize the role of ABA in maintaining the water balance of phytoremediant plants *Carex hirta* L. under the influence of polystress — oil pollution of the soil. It was found that under conditions of multicomponent stress, the endogenous content of ABA increased in the above-ground organs of *C. hirta* to a greater extent than in the underground ones. The increase in the ABA content in the roots contributed to an increase in the total volume of the root system. An increase in the number of semi-open stomata and a decrease in fully open stomata, and an increase in the thickness of the cuticle of the upper and lower epidermis were found due to an increase in the content of the pool of free and bound forms of endogenous ABA. This should contribute to a decrease in water loss by the plant through transpiration. In general, an increase in the ABA concentration in various organs of *C. hirta* under multicomponent stress (oil pollution of the soil) triggered a cascade of morphophysiological changes that contributed to the preservation of plants water balance and increase of their stress resistance.

Key words: *Carex hirta* L., abscisic acid, water balance, stress resistance, polycomponent stress, oil pollution of soil.

ORCID

Л.В. БУНЬО — L.V. Bunio <https://orcid.org/0000-0002-1042-2966>

О.М. ЦВІЛИНЮК — O.M. Tsvilynyuk <https://orcid.org/0000-0002-5179-5179>

Л.В. ВОЙТЕНКО — L.V. Voytenko <https://orcid.org/0000-0003-0380-0807>