

УДК 633.1:581.581.1

DOI: 10.37128/2707-5826-2023-3-16

**ВПЛИВ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ
НА ОСНОВНІ ФІЗІОЛОГІЧНІ
ПРОЦЕСИ ЗЕРНОВИХ ТА
ЗЕРНОБОБОВИХ КУЛЬТУР**

С.Е. АМОНС, кандидат с.-г.
наук, доцент

Л.А. ЯКОВЕЦЬ, кандидат с.-г.
наук, доцент

Вінницький національний аграрний
університет

Постійне зростання народонаселення та швидкий розвиток виробництва призвели наприкінці ХХ століття ситуацію зі станом навколишнього середовища в багатьох країнах і регіонах світу до межі екологічної кризи. До основних чинників деградації природного середовища належить її забруднення різними полютантами, серед яких одне з головних місць займають важкі метали. З огляду на сказане стає зрозумілою актуальність досліджень, присвячених впливу важких металів на рослини. Нині вони активно проводяться у багатьох країнах світу.

Статтю спрямовано на вивчення впливу важких металів на основні фізіологічних процесів, які відбуваються у рослині. Наведено результати досліджень з вивчення впливу важких металів на основні фізіологічні процеси зернових та зернобобових культур.

За результатами аналізу доведено, що накопичуючись у великих кількостях у рослинах, важкі метали спричиняють негативний вплив на ріст, розвиток та інші фізіологічні процеси.

Встановлено, що у присутності великих концентрацій цих елементів у злакових рослин спостерігається зменшення висоти стебла, скорочення кількості міжвузлів, зниження накопичення сирової і сухої біомаси, а також зменшення розмірів суцвіть. Основними причинами зниження продуктивності надземної біомаси у рослин є негативний вплив важких металів на ріст і розвиток рослин та інтенсивність фотосинтезу. Окремі види груп рослин проявляють різну здатність до накопичення важких металів.

Результатами власних досліджень встановлено, що у присутності високих концентрацій важких металів спостерігалось зниження лінійних розмірів листя практично у всіх видів рослин, із якими проводилися дослідження.

Все вищевикладене свідчить про різні аспекти дії важких металів на метаболічні процеси та життєздатність рослин. Вони впливають на різні функціональні групи біологічно важливих речовин організму, витісняють есенціальні метали з металовмісних комплексів, а також генерують активні форми кисню, що часто призводить до виникнення в клітинах окисного вибуху і навіть загибелі рослин.

Ключові слова: рослина, ріст, розвиток, важкі метали, накопичення, забруднення, концентрація, ґрунт.

Табл. 2. Рис. 2. Літ. 16.

Постановка проблеми. Важкі метали належать до найбільш небезпечних хімічних забруднюючих речовин. Надмірне надходження металів в екосистеми в результаті антропогенного пресингу часто призводить до незворотних змін та порушення життєво важливих функцій у більшості живих організмів. Важливо, що важкі метали відносяться переважно до розсіяних хімічних елементів, тому забруднення ними зазнає ґрунтовий покрив, гідросфера і атмосфера.

В зв'язку з цим, таке підвищення концентрації важких металів у навколишньому середовищі носить глобальний характер. Надлишок металів у

середовищі, як правило, призводить до їхнього підвищеного накопичення рослинними організмами, при цьому величина і характер поглинання у різних видів рослини має свою специфіку [1].

Щороку підприємства України в атмосферу викидають велику кількість токсичних та шкідливих речовин, у тому числі важких металів. Близько 90 % важких металів, що надходять в навколишнє середовище, акумулюються ґрунтами, які потім мігрують в природні води, поглинаються рослинами і поступають в харчові ланцюги. Значна кількість шкідливих для усіх живих організмів речовин, може засвоюватися вирощуваними рослинами і далі по ланцюгах живлення надходити до організму людини.

Основними джерелами надходження важких металів у довкілля є господарська діяльність людини. До таких надходжень належать: високі температурні процеси з промисловими викидами; скидання стічних вод; винесення важких металів із металургійних підприємств водними і повітряними потоками; постійне внесення високих доз органічних і мінеральних добрив, пестицидів, які містять домішки важких металів [2].

Агрофітоценози, які забруднені важкими металами особливо негативно впливають на екологічні функції ґрунту, що змінює його фізичні та хімічні властивості та пригнічує мікробіологічні процеси, погіршуючи тим самим родючість, що зумовлює зниження врожайності та якості продукції рослинництва [3].

Зростаюче надходження у довкілля важких металів призводить до забруднення ґрунту, що є основним джерелом надходження надлишкових кількостей важких металів у рослини. Клітина у відповідь на збуджуючий вплив важких металів, перш за все, вдається до апробованих за нормальної життєдіяльності засобів. Первинна реакція на вплив стресора спрямована на запобігання пошкодженням клітин організму, а тому є універсальною, що проявляється в мобілізації неспецифічних захисних реакцій, що стоять «на варті життя» і беруть участь у формуванні адаптивних реакцій рослин, що сприяють підвищенню їх стійкості до умов середовища [4].

Тому, у зв'язку із збільшенням забруднення навколишнього природного середовища важкими металами, дослідження вивчення їх впливу на основні фізіологічні процеси рослин є надзвичайно важливими та актуальними.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Вплив важких металів (ВМ) на фізіологічні процеси рослин досить активно досліджується науковцями різних країн. Аналіз наукових робіт свідчить, що пригнічення росту рослин є найбільш загальним та характерним проявом токсичності важких металів для рослин, що пов'язано, в першу чергу, з їх прямою дією на процеси поділу і росту клітин [5].

Згідно досліджень науковців, хімічні елементи, без яких не завершується життєвий цикл рослинних організмів, називають життєво необхідними. Деякі важкі метали є основними мікроелементами: кобальт (Co), мідь (Cu), молібден (Mo), цинк (Zn), нікель (Ni), манган (Mn), залізо (Fe), оскільки вони в

мікрокількостях необхідні для росту і розвитку рослин. Ці метали є кофакторами багатьох ферментів. [5].

Мідь входить до складу переносників електронів при фотосинтезі і диханні, включається в лігніфікацію. Цинк (Zn) є кофактором супероксиддисмутази і карбоангідрази, бере участь у регулюванні азотного метаболізму, поділі клітин, біосинтезі гормонів, відіграє важливу роль у синтезі нуклеїнових кислот і білків. Залізо (Fe) – мікроелемент багатьох ферментних систем. Манган (Mn) – важливий компонент при окисно-відновних процесах та фотосинтезі, адже він активізує дію різних ферментів, або входить до їх складу [5]. Проте, підвищення концентрації накопичення цих металів у клітинах може викликати їх негативний вплив.

Біологічна функція інших важких металів менш важлива для росту і розвитку рослин, тому їх токсична дія виявляється при високих концентраціях.

Надходження важких металів у рослини відбувається через поглинання їх кореневою системою з ґрунту. Частина металів зв'язується з органічним матеріалом ґрунту і стає недоступною для рослин. Інші залишаються в іонній формі і можуть надходити в кореневу систему. Іони важких металів поглинаються кореневою системою за механізмами пасивної дифузії та активного транспорту залежно від кислотності ґрунту, вмісту в ньому органічних речовин, вапна, макро- і мікроелементів, вологості, гранулометричного складу [6].

У рослинні організми надходять важкі метали можуть також і через листки з аерозолями, причому здатність листків поглинати важкі метали залежить від їх анатомічних особливостей. Рослини з більш опушеними листками інтенсивніше вбирають важкі метали із забрудненої атмосфери.

Окремо потрібно відмітити вплив важких металів на ріст листка – основного, спеціалізованого органу фотосинтезу. Підвищення концентрації всіх вивчених металів в оточуючому середовищі призводить до значного зменшення площі листової пластинки, що є однією із причин зниження інтенсивності фотосинтезу і транспірації. Помітне зниження лінійних розмірів листків в присутності високих концентрацій важких металів виявлено практично у всіх видів рослин, з якими проводились подібні дослідження [5].

У рослин є кілька фізіологічних бар'єрів, що обмежують надходження важких металів у надземні органи. Основними з яких є плазматична мембрана та ендодерма, відповідно на клітинному і тканинному рівнях. Надходження важких металів у цитоплазму клітини відбувається різними транспортними системами, які локалізовані на плазматичній мембрані [6].

Іони важких металів, які знаходяться на поверхні клітин або знаходяться в середині клітин, можуть взаємодіяти з нуклеїновими кислотами, білками, полісахаридами та іншими сполуками. У зв'язку з цим, виникають різні порушення метаболізму, як правило, невідомо, які з них є первинними, а які є наслідками порушення інших процесів.

Негативно впливають важкі метали і на мітотичну активність клітин, викликаючи сповільнення інтенсивності клітинних поділів, зменшення кількості клітин на всіх фазах мітозу, збільшення тривалості фаз і всього мітотичного циклу [6].

Підвищення концентрації важких металів також може викликати в меристематичних клітинах коренів різні цитогенетичні порушення. Проявом цього може бути сильна спіралізація хромосом, нерівномірне розходження хромосом до полюсів клітини або повна відсутність розходження, поява тетраплоїдних клітин. Такі важкі метали як, кадмій та нікель викликають пошкодження ядра, порушують синтез рибонуклеїнової кислоти та інгібують активність рибонуклеази. Окрім ряду негативних впливів, важкі метали чинять також негативний вплив і на ріст клітин розтягненням, що пов'язано, із зниженням еластичності клітинних стінок.

Зменшення еластичності клітинних стінок у присутності важких металів може бути обумовлено пошкодженням структури мікротрубочок і порушенням водного режиму клітин. Також це може бути пов'язане з порушенням проникності мембран унаслідок збільшення кількості активних форм кисню і зростання перекисного окиснення ліпідів [5].

Підвищені дози іонів важких металів викликають у рослин сповільнення росту кореневої системи. Наслідком такого явища є те, що корені є першим бар'єром на шляху транспорту важких металів із ґрунту у рослини, тому саме корені беруть на себе основну функцію акумуляції і детоксикації. Зростаюча концентрація важких металів спричиняє зменшення довжини головного кореня і кількість бічних коренів, відмирають кореневі волоски, знижується біомаса коренів [7]. Такі, досить суттєві зміни у кореневій системі рослин призводять до зниження поглинання поживних речовин і води, що негативно відображається на рості і розвитку всієї рослини, а за високих концентрацій важких металів рослина може і загинути.

Більшістю дослідників встановлено, що негативна дія важких металів проявляється також у пригніченні росту і надземної частини рослин, але дещо в меншій мірі ніж кореневої системи, а також зменшується висота пагона та знижується площа листової пластинки. Високі концентрації важких металів не тільки пригнічують ріст вегетативних органів рослин, а й призводять до зменшення розмірів суцвіть і біомаси плодів, зниженню кількості насіння, а у деяких випадках рослини взагалі можуть втратити здатність до формування генеративної маси [7]. Окрім прямого впливу важких металів на клітинний поділ і розтягнення, ріст рослин може сповільнюватись у результаті їх опосередкованої дії, пов'язаної зі зміною гормонального балансу, порушенням фотосинтезу, водного режиму, мінерального живлення та дихання [7].

Згідно аргументів науковців, важкі метали інгібують процес фотосинтезу – порушують ультраструктуру хлоропластів, гальмуючи синтез фотосинтетичних пігментів і зменшують фотосинтетичність пігментів. Хоча дія важких металів на процеси дихання вивчена недостатньо, але на сьогодні відомо, що вони

знижують поглинання кисню кореневою системою, інгібують транспорт електронів і протонів у мітохондріях, що призводить до порушення роботи електронтранспортного ланцюга.

Метою дослідження є вплив важких металів на основні фізіологічні процеси зернових та зернобобових культур.

Об'єкти та методи досліджень. Дослідження проводили в 2022–2023 рр. на території ПП «ЗЕТО» Жмеринського району Вінницької області. Територія господарства відноситься до Подільського плато, що розташоване в північно-східному (Вінницькому) агроґрунтовому районі правобережного Лісостепу. Район в основному характеризується м'яким і відносно вологим кліматом.

Ґрунтово-кліматичні умови регіону сприятливі для вирощування сільськогосподарських культур. Ґрунтовий покрив в межах господарства представлений різними типами ґрунтів. Найбільш поширені серед них сірі лісові та темно-сірі лісові.

За даними агрохімічного обстеження (2020 р.) дані ґрунти характеризуються наступними показниками: механічний склад – крупно-пилувато-суглинковий, вміст гумусу за Тюрнімом 1,8-2,4; рН (сольове) – 5,7-6,3; гідролітична кислотність в орному шарі, мг екв/100г ґрунту – 1,3-2,5; сума ввібраних основ – 9,2-10,7 мг екв/100г ґрунту; вміст мг/100г ґрунту: N – 7,3-8,5; P₂O₅ 16,6-18,3; K₂O – 8,5-10,0.

При відборі варіантів експерименту користувалися оціночними таблицями максимально допустимих рівнів вмісту ВМ у ґрунтах і рослинній продукції. Вміст ВМ визначали у середній пробі, яку утворювали, залежно від маси коренів, із 10-15 коренів, відібраних рандомним методом. Проби повітряно сухого рослинного матеріалу озолювали за температури 450°C, дотримуючись технології спалювання з метою попередження втрат елементів. Одержану золу після зважування розчиняли розведеною HNO₃. Визначення проводили у трьох повторностях.

Листя ретельно протирали вологим фільтрувальним папером від пилу і, щоб уникнути вимивання елементів, швидко обполіскували дистильованою водою. Озолення рослинного матеріалу проводили за загальноприйнятою методикою. Вміст важких металів визначали методом атомно-абсорбційної спектроскопії. Зміни, що відбуваються у рослині під впливом дії важких металів стосуються всіх рівнів організації рослинного організму. Залежно від поставлених завдань наших досліджень при оцінці металостійкості рослин використовували такі групи методів: морфометричні, фізіологічні, анатомо-морфологічні, цитологічні, біохімічні та молекулярно-біологічні. Спостереження, обліки та вимірювання проводили за загальноприйнятими методиками [8].

Виклад основного матеріалу. Слід зазначити, деякі з важких металів (ВМ) важливі для життєдіяльності рослин у низьких концентраціях, але у високих – токсичні (зокрема, цинк, мідь, молібден). Є і ВМ, які не беруть участь у метаболічних процесах і токсичні навіть у низьких концентраціях

(наприклад, кадмій, свинець, ртуть).

При цьому інтенсивність залучення важких металів з техногенних джерел у біохімічний кругообіг у середньому у 100 разів вища, ніж із природних джерел. Слід зазначити, що забруднення довкілля важкими металами, які є відходами промислових підприємств, носить локальний характер, тоді як викиди, що виникають при спалюванні палива (до 95% як високодисперсних аерозолів), поширюються повсюдно [9].

До числа найбільш токсичних важких металів відноситься кадмій, який був відкритий як елемент, що присутній в природі в низьких концентраціях, в 1817 р. Підвищення його кількості в ґрунтах обумовлено різноманітними техногенними впливами (рис. 1).

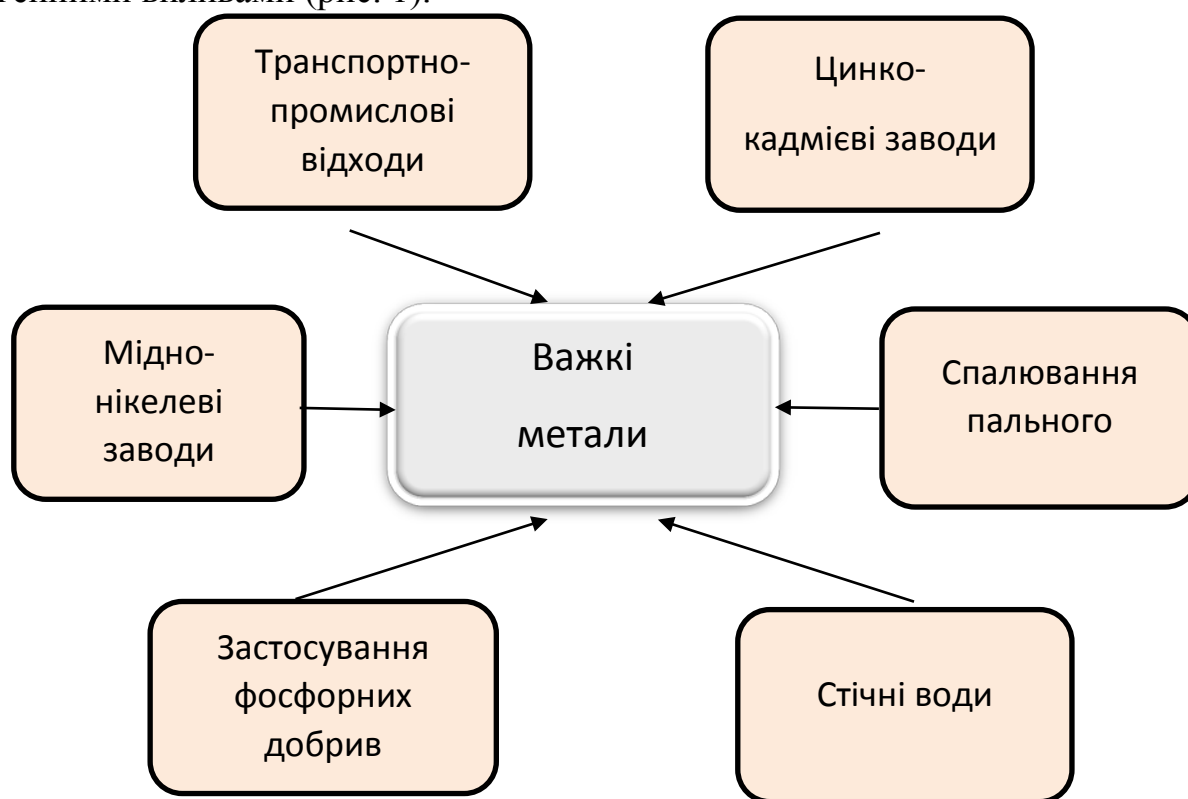


Рис. 1. Основні джерела надходження важких металів

До їх числа відносяться підприємства, які виготовляють фарби, антисептичні речовини, лужні акумулятори, а також ті, що здійснюють виплавку кольорових металів, переробку мідних, свинцевих і, особливо, цинкових руд, оскільки кадмій супроводжує цинк і є його антагоністом.

В останні роки по всій території України спостерігається перебудова ґрунтових екосистем у бік регресивного розвитку під впливом багатьох забруднюючих факторів, одним із яких є важкі метали.

У невеликих концентраціях важкі метали потрібні всім живим організмам, оскільки входять в склад ферментів і беруть участь у багатьох фізіологічних реакціях і процесах, які в них проходять. Важкі метали можуть змінювати валентність і тому беруть участь в окисно-відновних реакціях організмів. Як і

мікроелементи, вони можуть утворювати сполуки з протеїдами. Також, при високих концентраціях важких металів можуть руйнуватися нуклеїнові кислоти, різні білки, вітаміни та інші речовини.

Зовнішніми ознаками порушення біохімічних і фізіологічних процесів, які проходять у рослинних організмів – є сповільнення процесів росту і розвитку, втрата стійкості до хвороб, до посухи, втрата зимостійкості, пожовтіння і в'янення листків [10].

Тому, якщо концентрація важких металів недостатня, то фізіологічні процеси пригнічуються, а якщо концентрація оптимальна, то фізіологічні процеси проходять належним чином. І це все відображається на морфологічно-метричних ознаках рослин, в тому числі на рості та розвитку.

Найбільш загальні прояви токсичної дії важких металів, в том числі і кадмію, на рослини це інгібування фотосинтезу, порушення транспорту асимілянтів, зміни водного і гормонального статусів, а також мінерального живлення (рис. 2).

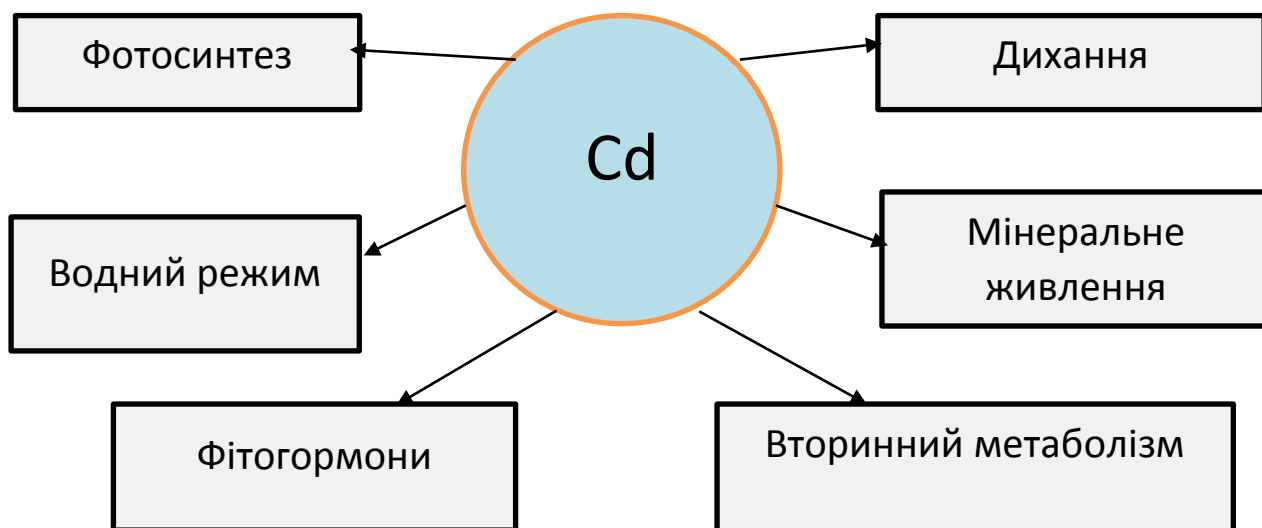


Рис. 2. Токсична дія кадмію на основні фізіологічні процеси в рослинах

В їх присутності відмічались зміни в ультраструктурі хлоропластів, біосинтезі фотосинтетичних ферментів, кількості хлорофілу, пластохінону і каротиноїдів, а також дефіцит CO_2 , викликаного закриттям продихів. Зниження вмісту фотосинтетичних пігментів при дії кадмію в більшій мірі проявлялось для сумарного вмісту хлорофілів, особливо хлорофілу *a*, в порівнянні з каротиноїдами [6].

Вважається, що ці зміни є наслідком гальмування біосинтезу хлорофілу і його деградацією. Відмічено також вплив кадмію на світлову фазу фотосинтезу, за рахунок порушення транспорту електронів, переважно пов'язаного з фотосистемою II, що обумовлено зміною структури тилакоїдних мембран, порушенням біосинтезу пластохінону і зниженням активності фередоксин НАДФ⁺-оксидоредуктази, квантової ефективності фотосистеми II і швидкості електронного транспорту. Негативна дія цього металу на фотосинтез є доволі

видоспецифічною та в значній мірі визначається його концентрацією в ґрунтовому розчині [6].

Кадмій приводить до змін дихання рослин, транспірації і водного режиму. Встановлено зниження поглинання кисню коренями та ізольованими клітинами тютюну в його присутності. Повідомлялось також про збільшення інтенсивності дихання при дії кадмію на рослини ячменю і вівса, що пояснюється підвищенням активності ряду дихальних ферментів. Проте високі його концентрації приводили до зворотного ефекту. Так, у рису, кукурудзи і ячменю дія підвищених доз полютанту викликала зниження інтенсивності дихання, що пов'язували із інгібуванням активності ключових ферментів гліколізу, пентозофосфатного шляху і циклу Кребса [11].

Відомо, що фотосинтез відрізняється дуже високою чутливістю до впливу важких металів, які впливають на багато сторін цього процесу. При цьому, як показано в численних роботах, зниження швидкості асиміляції CO_2 у присутності важких металів може бути пов'язане як з функціональними, так і структурними змінами у фотосинтетичному апараті рослин (ФСА). Нижче наведено основні «мішені» токсичної дії металів на фотосинтетичні процеси у рослин [6].

Основними причинами зменшення активності ферментів є порушення четвертинної структури білків в результаті взаємодії іонів металів з SH-групами та інгібування синтезу ферментів *de novo*. Виявлено також зниження рівня експресії генів, кодуєть ряд ферментів. До непрямих причин уповільнення швидкості реакцій темної фази фотосинтезу при присутності важких металів відносять зниження надходження клітини CO_2 внаслідок зменшення числа продихів або їх закривання [5].

1. У присутності важких металів спостерігаються певні зміни в анатомічній структурі листа: зменшуються розміри клітин мезофілу та товщина клітинної стінки, знижуються число та розміри хлоропластів, а також розміри замикаючих клітин продихів.

2. Важкі метали викликають різні порушення у структурній організації хлоропластів: зменшення кількості гран та тилакоїдів, зниження протяжності мембран, зміна структури мембран та їх хімічного складу (зокрема, зниження вмісту ненасичених жирних кислот), збільшення кількості пластоглобул.

3. Під впливом важких металів у листі рослин зменшується вміст фотосинтетичних пігментів. При цьому більшою мірою це відноситься до хлорофілів, ніж до каротиноїду). Основними причинами зниження кількості хлорофілів а та b у присутності важких металів є: пригнічення біосинтезу хлорофілів, посилення процесу їх деградації, порушення ультраструктури хлоропластів.

4. Важкі метали негативно впливають на світлові реакції фотосинтезу і на структурну цілісність фотосистем. Найбільш чутлива до іонів металів фотосистема II (ФС II). У присутності важких металів знижується ефективність

її роботи, що реєструється щодо зміни низки параметрів флуоресценції хлорофілу. Наприклад, знижуються максимальний (Fm) та мінімальний (F0) вихід флуоресценції, змінна флуоресценція (Fv), квантова ефективність ФС II (Fv/Fm), уповільнюється швидкість електронного транспорту.

Усе це свідчить про порушення у роботі ФСА рослин. Даних про вплив важких металів на фотосистему I (ФС I) дуже мало, проте встановлено, що деякі важкі метали (зокрема, кадмій) ушкоджують світлозбираючі антенні комплекси реакційних центрів як ФС II, так і ФС I. Відомо також, що при наявності важких металів уповільнюється швидкість циклічного та нециклічного фотофосфорилування.

5. Негативний вплив важких металів на темнові реакції фотосинтезу пов'язаний головним чином з пригніченням активності ферментів циклу Кальвіна та, зокрема, основного ферменту асиміляції CO₂ – рибулозобісфосфаткарбоксилази/оксигенази [5].

Основними причинами зменшення активності ферментів є порушення четвертинної структури білків внаслідок взаємодії іонів металів з SH-групами та інгібування синтезу ферментів *de novo*. Виявлено також зниження рівня експресії генів, що кодують низку ферментів. До непрямих причин уповільнення швидкості реакцій темної фази фотосинтезу в присутності важких металів відносять зниження надходження до клітин CO₂ внаслідок зменшення числа продихів або їх закриття.

6. Крім безпосереднього впливу важких металів на ті чи інші фотосинтетичні реакції, можливий і їхній опосередкований вплив на фотосинтез, пов'язаний із змінами в процесі дихання з порушеннями водного обміну та мінерального живлення [5].

Під дією важких металів часто відмічалась зміна водного статусу рослин. Так, ряд більшості рослин в промислових районах характеризуються меншою обводненістю тканин і пониженою інтенсивністю транспірації, що порушує тепловий режим листка. Зміна водного статусу рослин являється наслідком зниження ефективності осморегуляції, зменшення еластичності кліткових стінок, порушення водопоглинальної здатності кореня.

Водопоглинальна здатність кореня знижується внаслідок інгібування формування нових бічних коренів і кореневих волосків, уповільнення лінійного зростання кореня, зниження контакту кореневої системи з ґрунтом, гальмування транспорту асимілянтів з пагонів в кореневу систему. Крім цього, пришвидшується відмирання кінчика кореня, зростає лігніфікація і суберинізація клітин, збільшується вміст абсцизової кислоти (АБК), що викликає закриття продихів [12].

У таблиці 1 наведено характерні приклади впливу кадмію на ріст і накопичення біомаси кореня у різного виду рослин, що належать до різних родин. З даної таблиці видно, що концентрація кадмію в біомасі кореня у взятих для вивчення сільськогосподарських культур знаходилась в межах від 5 до 400 мг/кг.

Таблиця 1

Вплив кадмію на ріст і накопичення біомаси кореня у рослин

Сільськогосподарська культура	Концентрація кадмію, мг/кг	Експозиція, діб	Величина показника, % від контролю
Овес посівний (контроль)	300	7	x
Соняшник однорічний	400	28	133,3
Ячмінь посівний	20,0	20	6,66
Кукурудза культурна	10,0	3	3,33
Горох посівний	5,0	21	1,66

Джерело: сформовано на основі власних досліджень

Максимальна його концентрація – 400 мг/кг в наших дослідженнях була відмічена у корені соняшнику, що становило відповідно 133,3% до контролю. Мінімальне ж значення даного показника зафіксовано у коренях гороху посівного – 5.0 мг/кг (1,66%). Це зумовлено в значній мірі фізіологічними особливостями культури та внесеннями підвищених норм мінеральних добрив на варіантах.

При вирощуванні рослин у присутності важких металів їх токсична дія більшою мірою проявляється щодо зростання коренів, оскільки саме в них затримується та інактивується більша частина токсичних іонів, що надійшли в рослину. Накопичення важких металів у коренях супроводжується зменшенням розмірів та біомаси кореневої системи, зниженням кількості бічних коренів, відмиранням кореневих волосків.

Гальмування росту пагонів спостерігається при більш високих концентраціях важких металів, ніж кореня. Внаслідок цього зменшується висота пагонів та розміри листових пластинок, знижується біомаса надземних органів, а у злаків ще й довжина міжвузлів.

Надходження металу в довкілля пов'язане із сільськогосподарським виробництвом, зокрема із застосуванням фосфорних добрив, що містять кадмій у вигляді домішки. Негативний ефект спричиняють і стічні води, у яких вміст кадмію може досягати значних величин [13, 14].

Висока токсичність кадмію обумовлена тим, що він може зберігатися в ґрунті впродовж 1-3 років, у прибережних відкладах – 2 роки і у воді океанів – понад 7000 років. Важливо і те, що кадмій шкідливий для здоров'я людини і тварин, що обумовлено його накопиченням в рослинах і наступним потраплянням у харчові ланцюги.

При збільшенні вмісту металів у ґрунті знижується загальна біологічна активність, і це різко відбивається на рості та розвитку рослин, причому різні рослини реагують на надлишок металів по-різному. Метали розподіляються органами рослин нерівномірно. Найбільшою мірою метали накопичуються у листі. Це зумовлено багатьма причинами, одна з яких – локальне накопичення металів у результаті переходу їх у малорухливу форму [15].

Наприклад, у разі мідної інтоксикації забарвлення деяких листків у рослин змінюється до червоного та буро-коричневого, що свідчить про руйнування хлорофілу. Токсичність важких металів пов'язана з їх фізико-хімічними властивостями, зі здатністю до утворення міцних сполук з рядом функціональних угруповань на поверхні та всередині клітин [15].

Симптоми «отруєння» рослин важкими металами зовні проявляються в уповільненні їх росту та розвитку, зміні кольору та в'яненні листя, потворності та недорозвиненості кореневої системи. Реакція рослин на підвищені концентрації важких металів (концентрація у ґрунті, мг/кг): Pb (100-500).

Інгібування дихання та пригнічення процесу фотосинтезу, іноді збільшення вмісту кадмію та зниження надходження цинку, кальцію, фосфору, сірки, зниження врожайності, погіршення якості рослинницької продукції. Зовнішні симптоми – поява темно-зеленого листя, скручування старого листя, деформація листя: Cd (1-13) [5].

Порушення активності ферментів, процесів транспірації та фіксації CO₂, гальмування фотосинтезу, пригнічення біологічного відновлення NO₂ до NO, утруднення надходження та метаболізму в рослинах ряду елементів живлення. Зовнішні симптоми – затримка росту, пошкодження кореневої системи, хлороз листя: Zn (140-250). Хлороз молодого листя: Cr (200-500). Погіршення росту та розвитку рослин, в'янення надземної частини, пошкодження кореневої системи, хлороз молодого листя, різке зниження вмісту в рослинах більшості незамінних макро- та мікроелементів (K, P, Fe, Mn, Cu, B та ін.). Ni (30-100).

Пригнічення процесів фотосинтезу та транспірації. При цьому спостерігаються явища ендемічного захворювання рослин, наприклад, потворні форми. Типові симптоми токсичної дії нікелю: хлороз, поява жовтого забарвлення з наступним некрозом, зупинка росту коренів і появи молодих пагонів або паростків, деформація частин рослини, незвичайна плямистість, в деяких випадках - загибель всієї рослини [5, 16].

Все вищевикладене свідчить про різні джерела надходження важких металів, у тому числі і кадмію, в довкілля, залежність цього процесу від багатьох факторів, включаючи умови вирощування рослин. Важливо враховувати і той факт, що не існує чіткого поділу між елементами, токсичними для рослин та елементами, які є невід'ємною складовою будь-якої системи рослинного організму. Співвідношення концентрацій металів у рослинах вироблялося впродовж еволюції органічного світу і відхилення від цих співвідношень зумовлювали надалі наслідки їх впливу на метаболічні процеси.

Розміри суцвіть, а також маса плодів і насіння зменшуються в присутності набагато меншою мірою, оскільки їх вміст у цих органах зазвичай мінімальний, а негативний вплив на генеративні органи в основному опосередкований.

Слід відмітити, що основним і спеціалізованим органом фотосинтезу є ріст листка, на який безпосередньо впливає вміст у ньому важких металів.

Встановлено, що однією з причин зниження інтенсивності фотосинтезу та транспірації є зменшення площі листової пластинки. Це зумовлено підвищенням концентрації важких металів у навколишньому середовищі.

У таблиці 2 наведено дані щодо впливу важких металів на ріст листка зернових і зернобобових культур.

Таблиця 2

Вплив важких металів на ріст листка

Важкі метали	Сільськогосподарська культура	Концентрація важких металів, мг/кг	Експозиція, діб	Площа листка, % від контролю
Кадмій	Овес посівний (контроль)	100	3	x
	Соняшник однорічний	50	4	50,0
	Ячмінь посівний	100	4	100,0
	Кукурудза культурна	10	6	10,0
	Горох посівний	50	28	50,0
Свинець	Овес посівний	100	6	100,0
	Соняшник однорічний	60	20	60,0
	Ячмінь посівний	100	4	100,0
	Кукурудза культурна	60	28	60,0
	Горох посівний	50	20	50,0
Цинк	Овес посівний	130	15	130,0
	Соняшник однорічний	60	30	60,0
	Ячмінь посівний	150	25	150,0
	Кукурудза культурна	100	20	100,0
	Горох посівний	50	28	50,0

Джерело: сформовано на основі власних досліджень

Результатами власних досліджень встановлено, що у присутності високих концентрацій важких металів було зниження розмірів листя практично у всіх видів рослин, із якими проводилися дослідження.

Вміст важких металів в листках, у взятих для вивчення сільськогосподарських культурах, був підвищений. За цим показником на першому місці знаходиться вміст в листках рослин свинцю, особливо це помітно у таких культур, як овес і ячмінь посівний. Вміст цинку і кадмію у листках цих рослин також був найвищим, відповідно 100 і 130, 150 мг/кг.

Все вищевикладене свідчить про різні аспекти дії важких металів на метаболічні процеси та життєздатність рослин. Вони впливають на різні функціональні групи біологічно важливих речовин організму, витісняють есенціальні метали з металовмісних комплексів, а також генерують активні форми кисню, що часто призводить до виникнення в клітинах окисного вибуху і навіть загибелі рослин.

Слід також наголосити, що всі ці механізми токсичності не виключають один одного і можуть виявлятися одночасно. Незважаючи на це, рослини, в силу прикріпленого способу життя, виробили різні системи захисту, до яких відноситься і біосинтез фенольних сполук – речовин з високою біологічною та антиоксидантною активністю, які не тільки перешкоджають розвитку окислювального стресу в рослинах при дії поллютантів, але й беруть участь у комплексоутворенні з іонами важких металів, тим самим перешкоджаючи їх надходженню та знижуючи наслідки техногенних впливів.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Отже, накопичуючись у великих кількостях у рослинах, важкі метали спричиняють негативний вплив на ріст, розвиток та інші фізіологічні процеси. Встановлено, що у присутності великих концентрацій цих елементів у злакових рослин спостерігається зменшення висоти стебла, скорочення кількості міжвузлів, зниження накопичення сирої і сухої біомаси, а також зменшення розмірів суцвіть. Основними причинами зниження продуктивності надземної біомаси у рослин є негативний вплив важких металів на ріст і розвиток рослин та інтенсивність фотосинтезу. Окремі види груп рослин проявляють різну здатність до накопичення важких металів.

Список використаної літератури

1. Амонс С.Е. Антропогенний вплив на земельні ресурси та практичні заходи його запобіганню. *Збірник наукових праць ВНАУ*. 2011. № 8. С. 25-30.
2. Chemerys I., Myslyuk O., Chemerys V. Effect of vehicle emissions on the morphological and physiological changes of *Taraxacum officinale* web. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2020. № 10 (1). P. 7-17.
3. Рибалова, О., Коробкова, Г., Гудзевич, А. Оцінка ризику для здоров'я населення від забруднення повітря в промислових регіонах України. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*, 2022. 56. 240-254.
4. Sinclair S.A. The zinc homeostasis network of land plants. *Biochimica et Biophysica Acta*. 2012. № 1823. P. 1553-1567.
5. Топчій Н.М. Вплив важких металів на фотосинтез. *Фізіологія і біохімія культурних рослин*. 2010. Т. 42. № 2. С. 95-106.
6. Фатеева Н.Ю. Токсична дія важких металів на живі організми та шляхи її зменшення. *Актуальні питання сьогодення*. 2018. Том 7. С.107-110.
7. Разанов С.Ф. Вміст радіонуклідів і важких металів у продукції бджільництва. *Агроекологічний журнал*. 2009. № 1. С. 9-11.
8. ДСТУ 4770.1-9:2007. Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук марганцю (цинку, кадмію, заліза, кобальту, міді, нікелю, хрому, свинцю) в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомноабсорбційної спектрофотометрії. [Чинний від 2009–01–01]. URL: http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=58849.

9. Тонха О., Бикова О., Піковська О. Вміст кремнію, фізичні та хімічні властивості ґрунтів Хмельницької області України. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2020. 90 (3), С. 85-90.

10. Yakovets L. Assessment of the ecological condition of agricultural soils in Ukraine. *Agriculture and Forestry*. 2021. № 3 (22). P. 186-195.

11. Razanov S.F., Tkachuk O.P., Razanova A.M., Bakhmat M.I., Bakhmat O.M. Intensity of heavy metal accumulation in plants of *Silybum marianum* L. in conditions of field rotation. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2020. 10 (2). 131-136.

12. Yakovets L. Changes in heavy metals content in winter wheat grain and flour under right-bank forest-steppe conditions. *Agriculture and Forestry*. 2019. № 4 (15). С. 214-221.

13. Мазур В.А., Врадій О.І. Моніторинг забруднення важкими металами науково-дослідної ділянки в НДГ «Агрономічне» Вінницького національного аграрного університету. *Сільське господарство та лісівництво*. 2019. № 2 (13). С. 16-24.

14. Мазур В.А., Ткачук О.П., Яковець Л.А. Екологічна безпека зернової та зернобобової продукції : монографія. Вінниця : Твори, 2020. 442 с.

15. Vradiy O. Analysis of the efficiency of using the culinary processing of mushrooms in order to reduce the concentration of heavy metals in them. *Сільське господарство та лісівництво*. 2020. №17. С. 209-222.

16. Tkachuk O. P., Viter N.G., Pankova S.O., Titarenko O.M., Yakovets L.A. The current environmental state of the field protective forest belts of the forest steppe of Ukraine. *International Journal of Ecosystems and Ecology Science (IJEES)*. 2023. № 13/2. P. 1-6.

Список використаної літератури у транслітерації / References

1. Amons S.E. (2011). Antropohennyu vplyv na zemel'ni resursy ta praktychni zakhody yoho zapobihannyyu. [Anthropogenic impact on land resources and practical measures to prevent it]. *Zbirnyk naukovykh prats' VNAU – Collection of Scientific Works of VNAU*. № 8. 25-30. [in Ukrainian].

2. Chemerys I., Myslyuk O., Chemerys V. (2020). Effect of vehicle emissions on the morphological and physiological changes of *Taraxacum officinale* web. *Ukrainian Journal of Ecology*. №10 (1). P. 7-17. [in English].

3. Rybalova, O., Korobkova, H., Hudzevych, A. (2022). Otsinka ryzyku dlya zdorov'ya naselennya vid zabrudnennya povitrya v promyslovykh rehionakh Ukrayiny. [Assessment of the risk to public health from air pollution in industrial regions of Ukraine]. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho universytetu imeni V. N. Karazina, seriya «Heolohiya. Heohrafiya. Ekolohiya» – Bulletin of Kharkiv National University named after V. N. Karazin, series «Geology. Geography. Ecology»*. 56. 240-254. [in Ukrainian].

4. Sinclair S.A. (2012). The zinc homeostasis network of land plants. *Biochimica et Biophysica Acta*. № 1823. P. 1553-1567. [in English].
5. Topchiiy N.M. (2010). Vplyv vazhkykh metaliv na fotosyntezy. [*Impact of heavy metals on photosynthesis*]. *Fyziolohyya y byokhymyya kul't. Rastenyi – Physiology and biochemistry cult. Grown*. Vol. 42. № 2. 95-106. [in Ukrainian].
6. Fatieieva N.Iu. (2018). Toksychna diia vazhkykh metaliv na zhyvi orhanizmy ta shliakhy yii zmenshennia [*Toxic effects of heavy metals on living organisms and ways to reduce it*]. *Aktualni pytannia sohodennia – Current issues today*. Vols. 7. 107-110. [in Ukrainian].
7. Razanov S.F. (2009). Vmist radionuklidiv i vazhkykh metaliv u produktsiyi bdzhil'nytstva. [*Content of radionuclides and heavy metals in beekeeping products*]. *Ahroekolohichnyy zhurnal – Agroecological journal*. № 1. 9-11. [in Ukrainian].
8. DSTU 4770.1-9:2007 (2007). Yakist gruntu. Vyznachennia vmistu rukhomykh spoluk marhantsiu (tsynku, kadmiu, zaliza, kobaltu, midi, nikeliu, khromu, svyntsiu) v grunti v buferanii amoniino-atsetatnii vytyazhtsi z pH 4,8 metodom atomnoabsorbtsiinoi spektrofotometrii [*Soil quality. Determination of the content of mobile compounds of manganese (zinc, cadmium, iron, cobalt, copper, nickel, chromium, lead) in the soil in a buffer ammonium acetate extract with a pH of 4.8 by atomic absorption spectrophotometry*]. [Effective from 2009–01–01]. URL: http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=58849 [in Ukrainian].
9. Tonkha O., Bykova O., Pikovs'ka O. (2020). Vmist kremniyu, fizychni ta khimichni vlastyvoli gruntiv Khmel'nyts'koyi oblasti Ukrayiny. [*Silicon content, physical and chemical properties of soils of the Khmelnytsky region of Ukraine*]. *Visnyk Kyyivs'koho natsional'noho universytetu imeni Tarasa Shevchenka. Heolohiya – Bulletin of Taras Shevchenko Kyiv National University. Geology*. 90 (3). 85-90. [in Ukrainian].
10. Yakovets L. (2021). Assessment of the ecological condition of agricultural soils in Ukraine. *Agriculture and forestry*. № 3 (22). 186-195. [in Ukrainian].
11. Razanov S. F., Tkachuk O. P., Razanova A. M., Bakhmat M. I., Bakhmat O. M. (2020). Intensity of heavy metal accumulation in plants of *Silybum marianum* L. in conditions of field rotation. *Ukrainian Journal of Ecology*. 10 (2). 131-136. [in Ukrainian].
12. Yakovets L. (2019). Changes in heavy metals content in winter wheat grain and flour under right-bank forest-steppe conditions. *Agriculture and forestry*. № 4 (15). 214-221. [in Ukrainian].
13. Mazur V.A., Vradii O.I. (2019). Monitorynh zabrudnennia hruntiv vazhkymy metalamy naukovo-doslidnoi dilianky v NDH «Ahronomichne» Vinnytskoho natsional'noho ahrarnoho universytetu [*Monitoring of soil contamination by heavy metals of the research area in RF «Agronomichne» of Vinnytsia National Agrarian University*]. *Sil's'ke gospodarstvo ta lisivny'ctvo – Agriculture and forestry*. № 2 (13). 16-24. [in Ukrainian].
14. Mazur V.A., Tkachuk O.P., Yakovets L.A. (2020). Ekolohichna bezpeka zernovoyi ta zernobobovoyi produktsiyi. [*Ecological safety of grain and leguminous products: monograph*]. *Vinnytsya : Tvory*. 442. [in Ukrainian].

15. Vradiy O. (2020). Analysis of the efficiency of using the culinary processing of mushrooms in order to reduce the concentration of heavy metals in them. *Sil'ske hospodarstvo ta lisivnytstvo – Collection of scientific works of Vinnytsia National Agrarian University. Agriculture and forestry*. №17. 209-222. [in Ukrainian].

16. Tkachuk O. P., Viter N.G., Pankova S.O., Titarenko O.M., Yakovets L.A. (2023). The current environmental state of the field protective forest belts of the forest steppe of Ukraine. *International Journal of Ecosystems and Ecology Science (IJEES)*. 2023. № 13/2. 1-6. [in English].

ANNOTATION

INFLUENCE OF HEAVY METALS ON THE BASIC PHYSIOLOGICAL PROCESSES OF CEREAL AND CEREAL PEGUM CULTURES

At the end of the 20th century, the constant growth of the population and the rapid development of production brought the situation with the state of the environment in many countries and regions of the world to the brink of an ecological crisis. One of the main factors in the degradation of the natural environment is its pollution by various pollutants, among which one of the main places is occupied by heavy metals. Given the above, it becomes clear the relevance of research on the impact of heavy metals on plants. Currently, they are actively held in many countries of the world. The article is aimed at studying the influence of heavy metals on the main physiological processes that occur in plants. The results of studies on the influence of heavy metals on the main physiological processes of grain and leguminous crops are presented. Based on the results of the analysis, it was proven that accumulating in large quantities in plants, heavy metals cause a negative impact on growth, development and other physiological processes.

It was established that in the presence of large concentrations of these elements in cereal plants, a decrease in the height of the stem, a decrease in the number of internodes, a decrease in the accumulation of raw and dry biomass, as well as a decrease in the size of inflorescences are observed. The main reasons for the decrease in above-ground biomass productivity in plants are the negative impact of heavy metals on the growth and development of plants and the intensity of photosynthesis. Individual types of plant groups show different ability to accumulate heavy metals.

The results of our own research established that in the presence of high concentrations of heavy metals, a decrease in the linear dimensions of leaves was observed in almost all types of plants with which research was conducted.

All of the above testifies to various aspects of the effect of heavy metals on metabolic processes and the viability of plants. They affect various functional groups of biologically important substances of the body, displace essential metals from metal-containing complexes, and also generate active forms of oxygen, which often leads to the occurrence of an oxidative explosion in cells and even the death of plants.

Key words: plant, growth, development, heavy metals, accumulation, pollution, concentration, soil.

Table 2. Fig. 2. Lit. 16.

Інформація про авторів

Яковець Людмила Анатоліївна – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри ботаніки, генетики та захисту рослин Вінницького національного аграрного університету, (21008, м. Вінниця, вул. Сонячна, 3. e-mail: ludmila28334@gmail.com).

Амонс Сергій Едуардович - кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри ботаніки, генетики та захисту рослин Вінницького національного аграрного університету (21008, м. Вінниця, вул. Сонячна, 3. e-mail: dorosh@vsau.vin.ua).

Yakovets Liudmyla - Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the department of botany, genetics and plant protection, Vinnytsia National Agrarian University, (21008, Vinnytsia, Soniachna St. 3, e-mail: ludmila28334@gmail.com).

Amons Sergey Eduardovich - Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the department of botany, genetics and plant protection, Vinnytsia National Agrarian University (21008, Vinnytsia, Soniachna Str. 3, e-mail: dorosh@vsau.vin.ua).