

УДК 504.054:631.4

DOI <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2022.123.31>

ОСОБЛИВОСТІ ТРАНСЛОКАЦІЇ ТА АКУМУЛЯЦІЇ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ У СИСТЕМІ «ГРУНТ – РОСЛИНА – СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКА ПРОДУКЦІЯ»

Брайнінгер О.І. – аспірант кафедри екології та біотехнології в рослинництві,
Державний біотехнологічний університет

У статті наведено стан досліджень щодо транслокації важких металів у системі «грунт – рослина – сільськогосподарська продукція».

Проаналізовано літературні джерела, які окреслюють проблему техногенезу та його вплив на довкілля. Визначено основні джерела забруднення навколишнього середовища важкими металами – чорна та кольорова металургія, видобувна та переробна промисловість, хімічна промисловість, теплоенергетика, зберігання та спалювання відходів, сільськогосподарське виробництво, транспорт. За рахунок антропогенних джерел у довкілля надходить 94–97% Pb, 84–89% Cd, 56–87% Cu, 66–75% Ni та до 60% Hg. Важкі метали належать до пріоритетних забруднюючих речовин довкілля, особливо ґрунтів, як депонуючого середовища, що зумовлено дуже низькою швидкістю самоочищення ґрунту. За класифікацією М.Ф. Реймерса, важкими вважаються метали зі щільністю більше 8 г/см³, до яких належать – B, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Sn, Sb, Hg, Pb, Bi. Визначено основні шляхи надходження важких металів у систему «грунт – рослина – сільськогосподарська продукція». Механізм транслокації важких металів у рослини зумовлений системою бар'єрно – безбар'єрного накопичення, що полягає у поглинанні хімічних елементів рослинами відповідно до їх біологічних особливостей.

Живим організмам у мікрокількостях необхідні усі мікроелементи, проте перевищення їх нормативних концентрацій може мати токсичний вплив. З'ясовано, що токсичність важких металів зумовлена їх здатністю накопичуватися у живих організмах, включатися в метаболічний цикл та утворювати високотоксичні металлоорганічні сполуки. Вплив дефіциту та надлишку хімічних елементів для рослин представлений у таблиці 1. Основними шляхами надходження важких металів до організму людини є продукти харчування, особливо овочі. Таким чином, виникає необхідність пошуку ефективних способів зниження вмісту важких металів у сільськогосподарській продукції. Використання різних технологічних процесів обробки сільськогосподарської продукції дозволяє суттєво зменшити концентрацію токсикантів.

Ключові слова: антропогенний вплив, забруднення довкілля, ґрунт, депонуюче середовище, контамінанти, мікроелементи.

Braininher O.I. Peculiarity of translocation and accumulation of heavy metals in the system 'soil – plant – agricultural products'

The aim of the article is to outline the state of research on the translocation of heavy metals in the system "soil – plant – agricultural products".

Literary sources that outline the problem of technogenesis and its impact on the environment are analyzed. The main sources of environmental pollution by heavy metals have been identified: ferrous and nonferrous metallurgy, mining and processing, chemical industry, thermal power, waste storage and incineration, agricultural production, transport. Due to anthropogenic sources, 94-97% of Pb, 84-89% of Cd, 56-87% of Cu, 66-75% of Ni and up to 60% of Hg enter the environment. Heavy metals are among the priority pollutants of the environment, especially soils, as a landfill, due to the very low rate of self-cleaning of the soil. According to the classification of M.F. Reimers, heavy metals with a density of more than 8 g / cm³ are considered, which include – B, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Sn, Sb, Hg, Pb, Bi. The main ways of entering heavy metals into the system "soil – plant – agricultural products" are determined. The mechanism of translocation of heavy metals in plants is due to the system of barrier-barrier-free accumulation, which consists in the absorption of chemical elements by plants in accordance with their biological characteristics.

The human body needs all trace elements in microquantities, but exceeding their regulatory concentrations can have toxic effects. The toxicity of heavy metals has been found to be due to their ability to accumulate in living organisms, be included in the metabolic cycle, and form highly

toxic organometallic compounds. The effects of deficiency and excess of chemical elements for plants are presented in table 1. The main pathways through which heavy metals enter the human body are food, especially vegetables. Thus, there is a need to find effective ways to reduce the content of heavy metals in agricultural products. The use of various technological processes of processing agricultural products can significantly reduce the concentration of toxicants.

Key words: anthropogenic impact, environmental pollution, soil, depositing environment, contaminants, trace elements.

Постановка проблеми. Антропогенна діяльність сприяє перетворенню біосфери у техносферу. В умовах посиленого техногенезу та антропогенного навантаження значно збільшується надходження важких металів (ВМ) у навколишнє середовище. У зв'язку з інтенсифікацією процесів техногенезу постає проблема екологічної безпеки продуктів харчування рослинного походження, яка є домінуючим складником раціону людини. Фізико-хімічні властивості ґрунтів сприяють депонуванню поллютантів та їх надходженню в систему «ґрунт – рослина – сільськогосподарська продукція». Тому гостро постає проблема екологічної безпеки сільськогосподарської продукції та пошук сучасних технологій деконтамінації важких металів у готовій харчовій продукції.

Аналіз останніх джерел і публікацій. Фундаментальні теоретичні основи щодо геохімічної міграції елементів були закладені О.П. Виноградовим, Б.Б. Полиновим, О.І. Перельманом. Екологічні аспекти негативного впливу важких металів на навколишнє середовище представлено в працях як вітчизняних, так і зарубіжних науковців Ю.В. Алексєєва, М.Ф. Реймерса, А. Кабати-Пендіас, С.П. Мальованого, І.В. Кармазиненко, А.І. Кураєва, Ю.Ю. Самчук, Ю.Ю. Войтюк, В.Й. Манічев. Проблема безпечності продуктів харчування репрезентована в працях Т.М. Дабіжук, О.С. Чалої, А.Н. Некос, Н. Войтович, О.І. Щербаченко.

Постановка завдання. Мета статті – визначити стан вивчення проблеми щодо процесів транслокації важких металів у системі «ґрунт – рослина – сільськогосподарська продукція» та їх впливу на живі організми.

Виклад основного матеріалу дослідження. Еволюція взаємодії людини і природи призвела до сучасного негативного становища природного середовища у більшості регіонів світу. Несприятлива сучасна екологічна ситуація в Україні впливає на якість питної води, повітряного басейну, ґрунтів і, як наслідок, – сільськогосподарської продукції.

Проблемам антропогенного навантаження, особливо надходженню важких металів у довкілля, присвячено багато наукових праць як вітчизняних, так і зарубіжних вчених. За класифікацією М.Ф. Реймерса, важкими слід вважати метали зі щільністю більше 8 г/см^3 , до яких належать В, Со, Ni, Cu, Zn, Cd, Sn, Sb, Hg, Pb, Ві. Часто у прикладних роботах до списку ВМ додають ще і Mn, Fe, Ag, W, Pt, Au. [9, с. 9–10]. У мікрокількостях більшість важких металів необхідна для нормального функціонування живих організмів, перевищення допустимої концентрації чинить токсичну дію, що зумовлено їх здатністю проникати через клітинну оболонку і утворювати комплекси на поверхні і всередині клітини. [3, с. 163].

Стан забруднення атмосфери відіграє значну роль у визначенні екологічного стану ґрунтів, а далі за ланцюжком «ґрунт – рослина – сільськогосподарська продукція». За даними Держстату України у 2020 році найбільшими забруднювачами атмосферного повітря викидами забруднюючих речовин від стаціонарних джерел були:

- виробництво коксу та продуктів нафтоперероблення – 29 936 тонн викидів;
- добування кам'яного та бурого вугілля – 290 674 тонн;

- добувна промисловість і розроблення кар'єрів – 365 586 тонн;
- металургійне виробництво – 729 854 тонн;
- постачання електроенергії, газу, пари та кондиційованого повітря – 849 232 тонн.

Крім вказаних стаціонарних джерел забруднення, вагому екологічну небезпеку становить автотранспорт, газові викиди якого зростають щороку.

В Україні за кількістю забруднюючих речовин на одну особу у лідерах 2020 року були: Дніпропетровська область – 169,2 кг; Донецька – 182,4 кг; Івано-Франківська – 102,9 кг; Запорізька – 92,7 кг; Вінницька – 50,9 кг; Черкаська – 43,4 кг [14].

Важкі метали належать до найбільш небезпечних забруднюючих речовин довкілля. Моніторингові дослідження показують, що з кожним роком рівень надходження поллютантів у довкілля зростає. Важлива роль у циркуляції важких металів у довкіллі належить ґрунтам. Ґрунти є основним середовищем, у яке потрапляють важкі метали, у тому числі із атмосфери, з поверхневим стоком, з підґрунтових порід і підземних вод. Важкі метали зазвичай концентруються у верхньому гумусовому шарі 0–10 (20) см, де вони знаходяться як у формі іонів, так і в зафіксованій нерухомій формі.

В аспекті дослідження ґрунтів для вирощування сільськогосподарської продукції їх слід розглядати як базове середовище, як «арену колоїдів», тому що ґрунти відіграють майже визначну роль у формуванні екологічної якості рослин. Джерела надходження важких металів у ґрунти поділяють на природні і техногенні. До природних джерел належить вивітрювання гірських порід і мінералів, ерозійні процеси, вулканічна діяльність тощо. Основними техногенними джерелами викидів поллютантів у навколишнє середовище є: чорна та кольорова металургія, видобувна та переробна промисловість, хімічна промисловість, теплоенергетика, зберігання та спалювання відходів, сільськогосподарське виробництво. Найбільш високі концентрації ВМ спостерігаються навколо підприємств чорної та кольорової металургії, до 95% контамінантів потрапляє у ґрунт у вигляді техногенного пилу, лише 15–20% – з атмосферними опадами [5, с. 17].

На відміну від інших хімічних елементів, здатних розкладатися під дією фізико-хімічних властивостей ґрунту та біотичних факторів, важкі метали накопичуються та зберігаються в ньому тривалий час. При насиченні ґрунту поллютантами він може стати джерелом вторинного забруднення для води, водойм, кормів тварин і продуктів харчування людини. Специфічною особливістю забруднення ґрунтів важкими металами є дуже низька швидкість самоочищення ґрунту [14, с. 12–14]. Механізм транслокації хімічних елементів у рослини, в тому числі важких металів, зумовлений системою бар'єрно-безбар'єрного накопичення, що полягає у поглинанні хімічних елементів рослинами відповідно до їх біологічних особливостей [16, с. 121]. Існує кореляційний зв'язок між вмістом важких металів у ґрунті та рослинах, що своєю чергою призводить до перевищення гранично допустимих концентрацій та акумуляції важких металів у надземних вегетативних та репродуктивних органах рослин [4, с. 80]. Накопичення важких металів різними типами ґрунтів зумовлене їх буферністю [17, с. 39].

У своїх публікаціях Е.Г. Дегодюк та інші визначають, що, потрапляючи з ґрунту в рослини через кореневу систему, важкі метали можуть переміщуватися активно (метаболічним шляхом) або пасивно. У першому разі поглинання і переміщення іонів металів здійснюється за системою, що складається з протопластів клітин, пов'язаних плазмодесмами. При пасивному транспорті іони, досягнувши поверхні кореня, потрапляють у вільний простір кореня і далі з транспіраційним

Таблиця 1

Дефіцит та надлишок деяких хімічних елементів для рослин [16, с. 121; 17, с. 325]

Хім. елемент	Токсичні прояви надлишкового вмісту	Прояви дефіциту	Чутливі рослини
Al	Загальна затримка росту, темно-зелене листя, відмирання листя, структурні зміни кореневої системи, порушення мітозу, порушення властивостей протоплазми та клітинних стінок	Не виявлені	Злаки
B	Хлороз і некроз на листках уздовж жилки, бура плямистість, скручування та відмирання старого листя, загнивання ростових точок	Хлороз, коричневе молоде листя, порушення розвитку бруньок та квітів, відсутність бору порушує обмін цукрів, призводить до раннього відмирання точок росту кореня і стебла, порушення метаболізму, відмирання вегетативних пагонів, утворення порожнин – «гниль сердечка» (у цукрового буряка)	Злаки, картопля, помідор цукровий буряк, огірки, капуста, соняшник, яблуня, груша, виноград, шпилькові рослини
Cd	Порушення активності ферментів, що беруть участь у процесах дихання, білкового та нуклеїнового обміну, пригнічення фотосинтезу, порушення транспірації та фіксації CO ₂ , зміна проникності клітинних мембран, ускладнення надходження та метаболізму в рослинах ряду елементів живлення. Зовнішні прояви – затримка росту, бурі краї листя, хлороз, червонуваті жилки, скручування листя, бурі недорозвинені корені	Випадки прояву ознак дефіциту не виявлені	Бобові, шпинат, редис, морква, овес
Co	Міжжилковий хлороз листя, білі краї листя, структурні зміни коренів	Випадки прояву ознак дефіциту не виявлені	Бобові, злаки
Cr	Хлороз молодого листя, потішення росту та розвитку рослин, ушкодження кореневої системи, різке зниження вмісту в рослинах більшості незамінних макро- та мікроелементів	Випадки прояву ознак дефіциту не виявлені	Плодові дерева, злаки
Cu	Темно-зелене листя, товсті, короткі корені, пригнічення утворення паростків, зміна проникності мембран, інгібування переносу електролітів при фотосинтезі	Меланізм, побліління і висихання кінчиків листя, скручування молодого листя, втрата тургору, хлороз, некроз країв листків, пошкодження генеративних органів, пустоколосиця	Злаки, бобові, шпинат, цитрусові, соняшник, цибуля, салат, буряк, плодові дерева
Fe	Темно-зелене та темно-коричневе листя, уповільнений ріст рослин	Міжжилковий хлороз молодого листя, некроз країв листя, пожовтіння молодого листя, корені та стебла короткі та тонкі	Рис, поттон, фруктосві дерева, виноград, малина, томат, овес, кукурудза
Hg	Пригнічення розвитку ростків та коренів, хлороз листя, бурі точки на листі	Прояви ознак дефіциту не виявлені	Цукровий буряк

Таблиця 1

Mo	Хлороз, некротичні ураження старого листя, бурувато-чорні плями, сухе листя	Хлороз та некроз між жилками старого листя, послаблений тургор, слабе коренеутворення, поникле листя	Знаки, бобові, картопля, капуста, огірок, цибуля, буряк, часник, фруктові дерева
Ni	Міжжилковий хлороз молодого листя, пригнічення процесу фотосинтезу, росту, метаболізму, зниження адсорбції поживних речовин, зниження темпів фіксації молекулярного азоту	Пригнічення гідротенази, що веде до зниження ефективності азотфіксації (у бобових).	Знаки, бобові
Pb	Інгибування фотосинтезу, дихання, мітозу, зниження врожайності, погіршення якості рослинної продукції. Зовнішні прояви – темно-зелене листя, скручування старого листя, буре коротке коріння	Випадки прояву ознак дефіциту не виявлені	Цибуля, картопля, буряк, часник
Se	Міжжилковий хлороз, чорні плями, пожовтіння молодого листя, рожеваті плями на коренях	Уповільнення вегетації	Бобові, цибуля ріпчата
Zn	Хлороз та некроз країв листя, міжжилковий хлороз молодого листя, затримка росту рослин, ураження коренів	Міжжилковий хлороз, зупинка росту, асиметричність та ламкість листя, розеточність, скорочені міжвузля, дрібне листя (у дерев), фіолетово-червоні плями на листі порушення метаболізму, порушення росту кореня у довжину	Знаки, бобові, трави, виноград, фруктові дерева

струмом пересуваються по рослині. До складу рослин входить 78 елементів із 108 відомих у природі. З активним транспортом по культурі пересуваються макро- (N, C, O, H, S, P, Ca, K, Mg, Fe, Na) та мікроелементи (Zn, J, B, Cu, Mo, Co, Mn), які виконують біологічні функції, а також метали, які хімічно подібні до необхідних елементів (кадмій є хімічним аналогом цинку). Проте більшість металів, особливо ті, які не є необхідними для культур, переміщуються за допомогою дифузії. У результаті можлива поява візуальних ознак токсичності. Однак візуальні ознаки токсичності починають проявлятися, коли концентрації токсичних елементів значно перевищують санітарно-гігієнічні нормативи, встановлені для сільськогосподарської продукції (табл. 1) [15, с. 154; 16, с. 121–23].

Рівень накопичення важких металів у різних культурах є неоднаковим. Акумулятивна здатність рослин залежить від ряду факторів, таких як: вологість, температура, тип ґрунту, середовище ґрунту тощо [17, с. 29]. Процес міграції важких металів у системі ґрунт – рослина залежить від концентрації їх рухомих форм у ґрунті. Попри суттєву мінливість різних рослин до накопичення важких металів, біоаккумуляція хімічних елементів має певну тенденцію, що дозволяє впорядкувати їх у кілька груп:

- Cd, Cs, Rb – елементи інтенсивного поглинання;
- Zn, Mo, Cu, Pb, As, Co – середнього ступеня поглинання;
- Mn, Ni, Cr – слабого поглинання;

- Se, Fe, Ba, Te – елементи, важкодоступні рослинам.

По мірі зростання рослин хімічні елементи перерозподіляються по їх органам. При цьому для Cu і Zn встановлюється наступна закономірність у збільшенні їх концентрації: коріння > зерно > солома. Для Pb, Cd та Sr вона має інший вигляд: коріння > солома > зерно. [11, с. 23]. Поліелементне забруднення сільськогосподарської продукції має наступний вигляд: цибуля > часник > картопля > морква > перець > буряк столовий > капуста > томат > кабачок > огірок > баклажан > редис [17, с. 32–38].

Рослинницька продукція є основним джерелом надходження важких металів в організм людини. За різними даними з неї надходить від 40 до 80% важких металів, і лише 20–40% – з повітрям і водою.

Серед важких металів багато мікроелементів, що є необхідними і незамінними компонентами біокатализаторів і біорегуляторів найважливіших фізіологічних процесів, вони є необхідним складником організму людини. Людині потрібні фактично всі мінеральні хімічні елементи. У мікрокількостях організму людини необхідні залізо, мідь, марганець, цинк, йод, хром, кобальт, молібден, нікель, кремній, селен тощо. Це своєрідні «антени», які вловлюють сигнали організму, запускають біохімічні реакції та регулюють їх. Наприклад, магній бере участь у процесах вуглеводного і фосфорного обміну, міститься в кістках і зубах, належить до регулювальників роботи нервової системи, найбільший вміст купруму та алюмінію у печінці людини, кадмію, алюмінію, селену – у нирках і печінці. Організму людини у надзвичайно малих дозах необхідні навіть миш'як, титан, германій у біологічній формі. Однак у великих дозах вони стають токсичними, що призводить до порушення функції кровотворної, імунної, нервової систем і численних захворювань [12; 18 с. 36–38].

Особлива небезпечність важких металів зумовлена їх здатністю накопичуватися у живих організмах, включатися в метаболічний цикл, утворювати високотоксичні металоорганічні сполуки, змінювати форми знаходження при переході від одного природного середовища в інше, не піддаючись біологічному розкладанню, що своєю чергою може викликати отруєння (гострі чи хронічні) [8, с. 113; 9, с. 20].

Таким чином, виникає необхідність пошуку ефективних способів зниження вмісту важких металів у сільськогосподарській продукції. Використання різних технологічних процесів обробки сільськогосподарської продукції дозволяє суттєво зменшити концентрацію токсикантів. Наприклад, інтенсивне очищення поверхні зерна шляхом лущення дозволяє зменшити вміст Pb, Zn, Cd у зерні, оскільки основна їх частина акумулюється у нижніх шарах оболонки зернівки [20, с. 17]. Процес соління і квашення, використання теплової обробки (варіння) є досить ефективним для зменшення вмісту важких металів в овочах. Після термічної обробки концентрація практично всіх металів знижується [21, с. 113].

Висновки. Проблеми забруднення довкілля важкими металами є пріоритетними у життєдіяльності людини на сучасному етапі. Мікро- та макроелементи відіграють велику роль у життєдіяльності живих організмів, проте їх надлишкові концентрації є токсичними. Що своєю чергою потребує пошуку ефективних методів зниження вмісту важких металів у сільськогосподарській продукції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Алексеев Ю.В Тяжелые металлы в почвах и растениях. Ленинград, 1987. 142 с.
2. Реймерс Н.Ф. Природопользование: Словарь-справочник. Москва, 1990. 637 с.
3. Дабіжук Т.М., Денисик Г.І. Аналіз джерел забруднення сполуками важких металів продуктів харчування в Україні. *Наукові записки Вінницького педуніверситету. Серія Географія*. 2010. Вип. 20. С. 161–167.
4. Некос А. Проблеми визначення фонового вмісту мікроелементів у овочах та фруктах географічних регіонів України. *Наук. Записки Вінницького державного університету. Серія Географія*. 2009. №19. С. 79–83.
5. Техноекотолія: підручник. М.С. Мальований та ін. ; за ред. М.С. Мальованого. Львів : Національний університет «Львівська політехніка», 2013. 424 с.
6. Купчик О.Ю. Визначення кореляції між вмістом важких металів у продуктах рослинництва при екологічному моніторингу. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2016. № 1(13). С. 85–91.
7. Чалая О.С., Фатєєва Н.Ю. Токсична дія важких металів на живі організми та шляхи їх зменшення. *Актуальні питання сьогодення: матеріали міжнародної наук.-практ. конф., 20 березня 2018 р. Вінниця, 2018. С. 107–111.*
8. Гриньова Я.Г., Криштоп Є.А. Проблеми забруднення навколишнього середовища важкими металами та шляхи їх подолання. *Інженерія природокористування*. 2021. № 1(19). С. 111–119.
9. Кармазиненко С.П., Кураєва І.В., Самчук А.І., Войтюк Ю.Ю., Манічев В.Й. Важкі метали у компонентах навколишнього середовища м. Маріуполь (еколого-геохімічні аспекти). Київ, 2014. 168 с.
10. Щербаченко О.І. Важкі метали як токсичний фактор забруднення природного середовища. Стійкість і адаптація рослин до їх впливу. *Наук. Записки державного природознавчого музею*. 2014. №30. С. 157–182.
11. Балюк С.А., Фатєєва А.І., Ворона В.П. та ін. Екологічна ситуація в зоні впливу Зміївської ТЕС. Харків, 2019. 90 с.
12. Яровий Г.І., Романов О.В. Овочівництво: навчальний посібник. Харків : ХНАУ, 2017. 376 с.
13. Викиди забруднюючих речовин і парникових газів у атмосферне повітря від стаціонарних джерел забруднення у 2020 р. Держстат України URL: http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/ns/vzap/arch_vzap_u.htm (дата звернення: 12.01.2022).
14. Панас Р.М. Грунтознавство: навчальний посібник. Львів, 2014. 372 с.
15. Дегодюк Е.Г., Сайко В.Ф., Корнійчук М.С. та ін. Вирощування екологічно чистої продукції рослинництва. Київ, 2012. 320 с.
16. Фізіологія рослин. Підручник. М.М. Макрушин та ін.; за ред. проф. М.М. Макрушина. Вінниця : Нова Книга, 2006. 416 с.
17. Некос А.Н. Конструктивно-географічні засади аналізу формування рівня забруднення рослинної продукції : дис. ...д. геогр. наук : 11.00.11. Харків, 2013. 412 с.
18. Некос А.Н., Багрова Л.О., Клименко М.О. Екологія людини: Підручник. Харків, 2007. 346 с
19. Некос А. Н. Трофогеографія: теорія і практика: монографія. Харків, 2015. 296 с.
20. Фридрих Р. Снижение содержания вредных веществ в процессе зерноочистки. *Хлебопродукты*. 2002. № 7. С. 16–18.
21. Уткіна К.Б., Бодак І.В. Особливості транслокації важких металів із фруктової сировини у продукцію її переробки (на прикладі яблук). *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2015. № 3–4(24). С. 110–114.