

CHORNObYL – 40:

**MULTIDISCIPLINARY
PERSPECTIVES
ON A GLOBAL
TRAGEDY**



COLLECTIVE MONOGRAPH

CHERNOBYL – 40:
Multidisciplinary Perspectives
on a Global Tragedy

Compiled by
VIKTOR SHPAK

Chairman of the Editorial Board
STANISLAV TABACHNIKOV

GS Publishing Services
Sherman Oaks
2026

The collective monograph is a scientific and practical publication that contains scientific articles by doctors and candidates of sciences, doctors of philosophy and art, graduate students, students, researchers and practitioners from European and other countries. The articles contain research that reflects current processes and trends in world science.

Text Copyright © 2026 by the Publisher «GS Publishing Services» and authors.

Illustrations © 2026 by the Publisher «GS Publishing Services» and authors.

Cover design © 2026 Publisher «GS Publishing Services».

Authors: Emir Aznakaiev, Andrii Boyarkin, Viktoriia Burdeina, Tamara Dudar, Danylo Filonenko, Valentyna Groza, Pylp Hovorov, Olena Hrozna, Eduard Ivashkevych, Ernest Ivashkevych, Yevhen Kharchenko, Eduard Khomiak, Nataliia Khupavtseva, Olga Kosychenko, Maksym Kovhan, Yeva Kyrylenko Oleksandr Malyhin, Ihnat Matasar, Volodymyr Melnyk, Anna Militovska, Valentyna Moiseienko, Nataliia Mykhalchuk, Nataliia Nekrasova, Iryna Nizhenkovska, Serhii Puzik, Marharyta Radomska, Ihor Serheta, Halyna Sichkarenko, Ruslan Teklyuk, Olena Velchynska, Serhiy Ziablitsev.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed or transmitted in any form or by any means, or stored in a database or search engine without the prior written permission of the publisher. The authors are responsible for the content and reliability of their articles. Citation or other use of the monograph is possible only with reference to the publication.

Publisher «GS Publishing Services»
15137 Magnolia Blvd, # D,
Sherman Oaks, CA 91403, USA.

ISBN 979-8-9935428-1-2

DOI: 10.51587/9798-9935-42812-2026-31

LCSH: Chernobyl Nuclear Accident, Chornobyl, Ukraine, 1986. | Nuclear energy—Social aspects. | Environmental health—Ukraine.

LCC TK9152.2 .C46 2026 | DDC 363.17/9909477—dc23

Reviewers:

Hanna Kozhyna, Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Department of Psychiatry, Narcology, Medical Psychology and Social Work of Kharkiv National Medical University;

Viacheslav Martynov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Architectural Structures of the Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture.

Scientific editors-reviewers:

S. Bobrovnyk, Yu. Bondar, A. Cherep, P. Glukhovskiy, P. Hovorov, Yu. Kuznetsov, V. Lazurenko, V. Moiseienko, L. Omelianchuk, Zh. Virna.

The monograph is recommended for publication by the Academic Council of the Institute of Adult Education of the PO «National Academy of Sciences of Higher Education of Ukraine» (Protocol No. 4 dated April 20, 2026).

Chornobyl 40: Multidisciplinary Perspectives on a Global Tragedy : collective monograph / Compiled by V. Shpak; Chairman of the Editorial Board S. Tabachnikov. Sherman Oaks, California : GS Publishing Services, 2026. 139 p.

Available at: DOI: 10.51587/9798-9935-42812-2026-31

CONTENT

MEDICINE

*Yeva KYRYLENKO,
Serhiy ZIABLITSEV*

SYNERGISTIC RADIATION- AND CHEMICAL-INDUCED
CARCINOGENESIS: DEFICIENT DNA REPAIR MECHANISMS
IN THE POST-CHORNOBYL COHORT UNDER WARTIME CHEMICAL
EXPOSURES IN UKRAINE 5

МАТАСАР Ігнат Тимофійович

ХАРЧУВАННЯ ЯК СТРАТЕГІЧНИЙ ЧИННИК
РАДІОЕКОЛОГІЧНОГО ЗАХИСТУ НАСЕЛЕННЯ 14

*Anna MILITOVSKA,
Nataliia NEKRASOVA*

PREVALENCE OF ACUTE CEREBROVASCULAR EVENTS (STROKE,
TIA AND THEIR SEQUELAE; ICD-10: I60-I64, I69, G45) AND DIABETES
MELLITUS AS A COMORBIDITY AMONG YOUNG ADULTS (18-45
YEARS) IN A CHORNOBYL RADIATION-CONTAMINATED REGION:
A RETROSPECTIVE ANALYSIS OF DATA FROM IVANKIV CENTRAL
DISTRICT HOSPITAL (2018-2025) 20

МОЙСЕЄНКО Валентина Олексіївна

МЕДАЛЬ ІМЕНІ МАРІЇ КЮРІ – ВЧЕНИМ-НАУКОВЦЯМ
ЗА ВКЛАД У ВИВЧЕННЯ ЕЗОФАГОГАСТРОДУОДЕНОПАТІЙ У
ЛІКВІДАТОРІВ АВАРІЇ НА ЧАЕС ТА ЖИТЕЛІВ ЗАБРУДНЕНИХ
ТЕРИТОРІЙ..... 29

*Ihor SERHETA
Ruslan TEKLYUK*

FEATURES OF THE PROCESSES OF FORMATION OF HEALTH-
PRESERVING COMPETENCE OF SCHOOLCHILDREN
AND THEIR CHANGES IN THE DYNAMICS OF A 20-YEAR
PERIOD IN THE CONTEXT OF THE INFLUENCE OF EXTERNAL
ADVERSE FACTORS 32

PEDAGOGICAL SCIENCES

*Tamara DUDAR,
Marharyta RADOMSKA*

RADIOECOLOGICAL SAFETY IN ENVIRONMENTAL
EDUCATION CURRICULA..... 38

PHARMACY

*ВЕЛЬЧИНСЬКА Олена Василівна,
НІЖЕНКОВСЬКА Ірина Володимирівна*

ТЕХНОГЕННІ КАТАСТРОФИ: ВАЖКІ МЕТАЛИ
ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇХ АНАЛІЗУ 44

ВЕЛЬЧИНСЬКА Олена Василівна,
доктор фармацевтичних наук, професор,
Національний медичний університет
імені О.О. Богомольця
ORCID: 0000-0001-7023-8493

НІЖЕНКОВСЬКА Ірина Володимирівна,
доктор медичних наук, професор,
Національний медичний університет
імені О.О. Богомольця
ORCID: 0000-0001-5065-3147
м. Київ, Україна

ТЕХНОГЕННІ КАТАСТРОФИ: ВАЖКІ МЕТАЛИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇХ АНАЛІЗУ

Техногенні (технологічні) катастрофи виникають як результат аварій на технічних об'єктах, супроводжуються загибеллю людей та екологічними збитками. Токсичні речовини (важкі метали, отруйні гази, бойові отруйні речовини та інші ксенобіотики) вивільняються під час техногенних катастроф та призводять до отруєння і загибелі живих організмів. Важкі метали накопичуються в ґрунті, рослинах (овочі, фрукти, ягоди, лікарська рослинна сировина для виготовлення лікарських засобів), а потім після вживання цих харчових продуктів і лікарських засобів потрапляють до організму людей і тварин.

Техногенні аварії стають джерелом викиду важких металів: забруднення ґрунтів та вод: аварії на АЕС, шахтах, фабриках та хімічних заводах. Аварії призводять до витоків ртуті, кадмію та свинцю тощо. Відбувається біоаккумуляція: важкі метали не руйнуються, а накопичуються в харчових ланцюжках. Ртуть із промислових стоків перетворюється на метилртуть, потрапляє та концентрується у організмі риби; попадання важких металів в організм людини внаслідок катастроф викликає ураження ЦНС (ртуть), нирок (кадмій) та кісток (плумбум). Більшість з важких металів є небезпечними токсикантами.

Головна особливість важких металів – вони не руйнуються, а переходять з однієї форми в іншу, здатні до біоаккумуляції (накопичення в тканинах живих організмів). Токсичність металів зумовлена їхньою здатністю взаємодіяти з білками та ферментами на клітинному рівні. Важкі метали блокують функції ферментів – зв'язуються з сульфгідрильними групами білків, зупиняють життєво важливі біохімічні реакції. Важкі метали призводять до розвитку окислювального стресу: стимулюють утворення вільних радикалів, які пошкоджують ДНК та клітинні мембрани. Організм може помилково прийняти токсичний метал за корисний (мімікрія): плюмбум заміщує кальцій у кістках, а кадмій заміщує цинк у складі ферментів. Важкі метали мають тривалий період напіввиведення: деякі можуть залишатися в організмі десятки років (плюмбум у кістках має період напіввиведення до 20–30 років). Основні шляхи потрапляння в організм важких металів: пероральний (вода та продукти харчування), інгаляційний, трансдермальний: через шкіру (сполуки ртуті). Особливу увагу приділяють аналізу важких металів – представників «великої трійці» як найбільш небезпечних для людей і навколишнього середовища – ртуті, плюмбуму, кадмію. Ртуть уражує центральну нервову систему, спричиняє тремор, викликає порушення пам'яті та зору. Плюмбум порушує синтез гемоглобіну, гальмує розвиток мозку у дітей, вражає нирки. Кадмій накопичується в нирках (ниркова недостатність), руйнує кісткову тканину¹.

Забруднення навколишнього середовища важкими металами внаслідок антропогенної діяльності або природних процесів є серйозною проблемою. Важкі метали зустрічаються в ґрунті в різних формах, які відрізняються за своєю біодоступністю. Геохімічна поведінка важких металів у ґрунті, їх поглинання рослинами залежать від фізико-хімічних властивостей ґрунту. Метали переважно накопичуються в клітинах коренів через їх блокування каспаріановими смужками. Надмірне накопичення їх у рослинній тканині погіршує або блокує біохімічні, фізіологічні та морфологічні функції рослин. Важкі метали спричиняють шкідливий вплив

1 Qadir A., Hashmi M. Z., Mahmood A. Xenobiotics, Types, and Mode of Action. In: Hashmi, M. Z., Kumar, V., and Varna, A., Eds. *Xenobiotics in the Soil Environment. Monitoring, Toxicity and Management*. Cham: Springer International Publishing AG. 2017. P. 1-7; 2 Abdelbary K., Ali M., Abdelfatah A. New Biofilter Media for Heavy Metals Removal From Aquaculture Wastewater. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 2022.0(0). <https://doi.org/10.21608/mjae.2022.174352.1091>; Abdel-Shafy H. I., Mansour M. S. M. A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2015. Vol.25. № 1. P.107–123; Ahmad A., Das S., Ghangrekar M. M. Removal of xenobiotics from wastewater by electrocoagulation: A mini-review. *Journal of the Indian Chemical Society* 2020. Vol. 97. № 4. P. 493–500.

на різні фізіологічні процеси в рослинах: на клітинному рівні токсичність важких металів призводить до порушення окисно-відновного балансу та викликає окислювальний стрес. В умовах стресу рослини мають численні захисні механізми для боротьби з токсичністю важких металів, які включають зниження поглинання важких металів, їх секвестрацію у вакуолі, зв'язування фітохелатинами та активацію антиоксидантів. На сьогодні отруєння відбуваються через вживання рослин, продуктів харчування рослинного походження, що містять важкі метали (ВМ). Важкі метали можуть бути присутніми у сировині фармакопейних рослин та лікарських засобів рослинного походження як результат антропогенної діяльності людини, техногенних катастроф, вибухів під час військових подій тощо. Токсичність важких металів пов'язана з широким спектром несприятливих наслідків для здоров'я. Це – дисфункція печінки, нирок, серця, летальний наслідок. Натуральні рослинні засоби часто містять синтетичні компоненти, які, також, можуть містити неприпустимі домішки, що впливає на якість лікарських засобів та ускладнює їхній фармацевтичний або хіміко-токсикологічний аналіз².

Незважаючи на значні досягнення в галузі органічного синтезу, зацікавленість у рослинних лікарських засобах залишається високою. Кожен третій лікарський засіб на фармацевтичному ринку виготовлений з лікарської рослинної сировини. Велика кількість препаратів, що використовуються для лікування серцево-судинних захворювань, є лікарськими засобами рослинного походження³.

За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), частка лікарських засобів рослинного походження сягає 60 %.

Важливою проблемою, що обмежує використання лікарських рослин у медицині, є скорочення територій, які не зазнають антропогенного тиску.

- 2 Nikulin, A.; Potanina, O.; Alyussef, M.; Vasiliev, V.; Abramovich, R.; Novikov, O.; Boyko, N.; Khromov, A.; Platonov, E. Development of a method for the determination of cadmium, lead, and arsenic by the ETAAS method in medicinal plant raw materials. *Farmacia* 2021, 69, 566–575; Chaplygin, V.; Dudnikova, T.; Chernikova, N.; Fedorenko, A.; Mandzhieva, S.; Fedorenko, G.; Sushkova, S.; Nevidomskaya, D.; Minkina, T.; Sathishkumar, P.; et al. *Phragmites australis* cav. As a bioindicator of hydromorphic soils pollution with heavy metals and polyaromatic hydrocarbons. *Chemosphere* 2022, 308, 136409; Erofeeva, E.A. Hormesis in plants: Its common occurrence across stresses. *Curr. Opin. Toxicol.* 2022, 30, 100333.
- 3 Zhang, Z.; Song, J.; Zhang, H.; Zheng, Z.; Li, T.; Wu, S.; He, B.; Mao, B.; Yu, Y.; Fang, H. Analysis method development and health risk assessment of pesticide and heavy metal residues in *Dendrobium Candidum*. *RSC Adv.* 2022, 1, 6869–6875; Luo, L.; Wang, B.; Jiang, J.; Fitzgerald, M.; Huang, Q.; Yu, Z.; Li, H.; Zhang, J.; Wei, J.; Yang, C.; et al. Heavy metal contaminations in herbal medicines: Determination, comprehensive risk assessments, and solutions. *Front. Pharmacol.* 2021, 11, 595335; 10Rojas, P.; Ruiz-Sánchez, E.; Ríos, C.; Ruiz-Chow, A.; Resendiz-Albor, A.A. A health risk assessment of lead and other metals in pharmaceutical herbal products and dietary supplements containing *Ginkgo biloba* in the Mexico city metropolitan area. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2021, 18, 8285–8304.

Не завжди можливо заготовлювати лікарську рослинну сировину лише з екологічно чистих територій. Одним з актуальних завдань у сучасному фармацевтичному аналізі є моніторинг можливості використання лікарських рослин, що зростають під техногенним тиском, у лікувальних цілях та удосконалення їх аналізу. Лікарські рослинні матеріали можуть бути джерелом потрапляння до організму людини токсикантів, в першу чергу – важких металів, пестицидів, інших ксенобіотиків. Частіше у навколишньому середовищі знаходяться важкі метали. Це – плумбум, кадмій та ртуть. Основними джерелами цих металів є транспортні засоби, промислові та теплові електростанції, сміттєспалювальні заводи тощо⁴.

Для аналізу лікарської рослинної сировини та рослинних лікарських засобів традиційно використовували метод паперової хроматографії та колориметрію. Пізніше було впроваджено більш сучасні методи та їх комбінації, наприклад, рідинна хроматографія-УФ-спектрофотометрія.

Існує багато методів виявлення забруднення важкими металами в рослинах: хімічний аналіз, електрохімічна анодна вольтамперометрія, ультрафіолетова видима спектрофотометрія (УФ), високоефективна рідинна хроматографія (ВЕРХ), атомно-абсорбційна спектрометрія (ААС), мас-спектрометрія з індуктивно зв'язаною плазмою, оптична емісійна спектрометрія з індуктивно зв'язаною плазмою (ICP-OES) тощо. Ці методи мають високу точність виявлення, однак вони трудомісткі та складні для попередньої обробки зразків. Методи мають обмежений діапазон виявлення, що не може відповідати вимогам екологічного, швидкого та масштабного виявлення. З розвитком оптичних приладів чутливість оптичної спектроскопії візуалізації була покращена та застосована для виявлення важких металів у рослинах завдяки простим перевагам, що надаються спектроскопією.

Поява сучасних аналітичних методів аналогічна органолептичному синтезу, який відбувається під час вибору лікарської рослини. Сучасні інструментальні методи підвищили ефективність аналізу, ідентифікацію та оцінку якості лікарської рослинної сировини. Поява та застосування комбінації інструментальних методів стали можливими і корисними з розвит-

4 Zhang, Z.; Song, J.; Zhang, H.; Zheng, Z.; Li, T.; Wu, S.; He, B.; Mao, B.; Yu, Y.; Fang, H. Analysis method development and health risk assessment of pesticide and heavy metal residues in *Dendrobium Candidum*. *RSC Adv.* 2022, 1, 6869–6875; Pirhadi, M.; Shariatifar, N.; Bahmani, M.; Manouchehri, A. Heavy metals in wheat grain and its impact on human health: A mini-review. *J. Chem. Health Risks* 2022, 12, 421–426; Guo, C.; Lv, L.; Liu, Y.; Ji, M.; Zhang, E.; Liu, Q.; Zhang, M.; Li, M. Applied analytical methods for detecting heavy metals in medicinal plants. *Crit. Rev. Anal. Chem.* 2023, 53, 339–359.

ком комп'ютерних систем та інструментів управління даними. Це дозволило швидко та вибірково синтезувати інформацію з інструментальних та аналітичних сигналів даних⁵.

З використанням комбінаторної апаратури з'явилися комбінаторні методи обробки даних: метаболомне профілювання, алгоритми розпізнавання образів тощо. Це розширило аналітичні можливості, одночасно зменшуючи час аналізу та необхідність інтерпретації. Сучасна тенденція використання комбінаторних методів прискорила темпи розвитку аналітичних методів та можливостей, що пов'язані з цими дослідженнями.

Спектроскопія поділяється на молекулярну та атомну для аналізу рослинного матеріалу відповідно до різних реакцій на важкі метали. Атомну та молекулярну спектроскопію використовують для виявлення стресу важких металів у рослинних зразках. Традиційні методи поєднують із спектроскопією для виявлення важких металів у рослинах. Таке поєднання значно підвищує ефективність та точність виявлення, дозволяючи проводити дослідження *in situ* без мічення. Поєднання оптичної спектроскопії з часовою та просторовою інформацією про рослини для побудови багатовимірної візуальної кінетичної моделі для оцінки характеристик розподілу важких металів у рослинах є новим науковим підходом. Він має теоретичне еталонне значення для селекції та зеленої ремедіації.

Таким чином, у аналіз лікарських засобів рослинного походження та лікарської рослинної сировини останнім часом впроваджено сучасні методи: лазерно-індукована пробійна спектроскопія (LIBS), спектроскопія комбінаційного розсіювання, спектроскопія видимого/ближнього інфрачервоного діапазону (Vis-NIR)/гіперспектральна візуалізація (HSI), флуориметр хлорофілу.

Спектральні дані видимого та ближнього ІЧ-діапазонів отримують шляхом точкового сканування в широкому діапазоні довжин хвиль. Через вплив обертонів та комбінованих вібрацій характеристики поглинання у видимому ближньому ІЧ-спектрі низькі.

5 Rehan, I.; Gondal, M.A.; Aldakheel, R.K.; Almessiere, M.A.; Rehan, K.; Khan, S.; Sultana, S.; Khan, M.Z. Determination of nutritional and toxic metals in black tea leaves using calibration free LIBS and ICP: AES technique. *Arab. J. Sci. Eng.* 2022, 47, 7531–7539; Nguyen, H.M.; Huynh, N. T. K.; Nguyen, N. T. Y.; Ha, L.T.; Pham, T.T. Evaluating the content of some metal elements in soil and their effects on the total phenolic and flavonoid contents of some medicinal plants using X-ray fluorescence (XRF) Method. *Res. Sq.* 2022, 1, 1–24.

HSI поєднує методи візуалізації та спектроскопії для отримання високороздільної спектрально-просторової інформації у видимому та ближній ІЧ-області. Метод HSI забезпечує точність. Він здатний візуально виразити інформацію про фенотип рослинних зразків на рівні пікселів. Недоліком цього методу є те, що тисячі спектральних смуг можуть призвести до надлишковості даних, оптичної складності.

Раманівський спектр – вид молекулярного розсіювання, заснований на непружному розсіюванні падаючого світла. Спектри розсіювання різних частот падаючого світла аналізуються для отримання інформації про коливання та обертання молекули, для вивчення структури молекули. Раманівська спектроскопія має просторову роздільну здатність, характеризується стійкістю до перешкод від води. Раманівський сигнал слабкий, легко піддається впливу зовнішніх факторів (флуоресценція). Для вирішення проблеми слабого сигналу та перешкод запропоновано різні методи раманівської спектроскопії – поверхнево-посилене раманівське розсіювання (SERS). Раманівська спектроскопія в поєднанні з мікровізуалізацією дозволяє візуалізувати хімічні сполуки в клітині, на метаболічному рівні. Це допомагає досліджувати процес стресу важких металів та правила міграції ксенобіотиків у рослинних тканинах.

LIFS – це технологія атомно-емісійної спектроскопії. Вона використовує сфокусований імпульсний лазерний промінь для генерації плазми з матеріалів, аналізує елементний склад зі спектру випромінювання.

Основними характеристиками LIFS є здатність виявляти всі елементи, виявлення зразків у різних матрицях, здатність до виявлення кількох елементів, відсутність підготовки зразків, діагностика *in-situ* та дистанційне виявлення. Вміст вологи в зразках обмежує здатність LIFS. Волога може зменшити інтенсивність випромінювання та вплинути на стабільність сигналу.

Технологія флуоресценції хлорофілу (CHI-FI) як фотосинтетичний зонд може відображати розподіл важких металів у рослинах. Використовують хлорофіл як еталон. Останнім часом поєднують спектроскопічні методи з технологією флуоресценції хлорофілу для виявлення та візуалізації розподілу важких металів Cd та Cu у рослинах. Багатофункціональне використання вважається ефективним способом виявлення розподілу важких металів та реакції рослин.

Спектральні дані є складними та високорозмірними. Для ефективного аналізу даних необхідні методи комп'ютерного аналізу для зменшення розмірності, вилучення ознакових смуг, моделювання тощо.

Для спектроскопії використовують HSI, RS та CHI-FI традиційні методи, які є складними для виконання завдань. Виявлення важких металів у рослинах можна передбачити за допомогою математичних моделей.

Важливим етапом дослідження є підготовка зразків для отримання спектру. Зразки рослин необхідно очистити, висушити та подрібнити. Практично всі зразки необхідно заливати розчинником, нарізати. Сушіння, подрібнення та пресування є кращими для висушених зразків з використанням LIBS для отримання спектральних даних. Заливання розчинником та нарізання є необхідними умовами для отримання мікроструктури зі спектральними властивостями за допомогою раманівської спектроскопії.

Важливою є організована система збору даних для отримання спектру: темне приміщення для роботи, джерело світла, спектрометр, приміщення для зберігання зразків, комп'ютерне забезпечення. Для спектрометрів необхідна ПЗЗ-камера.

Спектральні вимірювання проводять в темному приміщенні для контролю умов освітлення та зменшення впливу розсіяного світла. Під час збору спектрів навколишнє середовище має бути стабільним, скоригованим за допомогою стандартної опорної пластини.

Обчислювальна обробка необхідна для отримання необхідної інформації з великої кількості даних. Спектральна обробка даних включає попередню обробку, зменшення розмірності, вибір оптимальної смуги, встановлення моделі. Для гіперспектральних даних потрібні калібрування випромінювання, корекція атмосфери, геометрична корекція.

Вихідний спектр містить спектральну інформацію та шумові сигнали. Шумові сигнали можуть перешкоджати спектральній інформації через різні фактори – фон вибірки та розсіяне світло. Перед аналізом даних використовується спектральна попередня обробка для видалення шуму, фільтрації даних:

- згладжування згортки Савітзга-Голага (S-G),
- стандартне перетворення нормальної змінної (SNV),
- корекція багатовимірного розсіювання (MSC),

- короткочасне перетворення Фур'є (STFT),
- функціональна залежність (FD),
- виведення швидкого перетворення Фур'є (FFT),
- вейвлет-перетворення (WT).

Згладжування усуває шум у спектрі. SNV зменшує вплив неспецифічного розсіювання на поверхні частинок. MSC усуває ефект розсіювання, покращує інформацію про спектральне поглинання. Виводиться модифікована базова лінія. Вейвлет-перетворення використовується для шумозаглушення та згладжування даних.

Необхідно вибрати найкращу смугу, включаючи генетичний алгоритм (GA), метод виключення неінформативних змінних (UVE), алгоритм послідовного проєктування (SPA).

Під час обробки спектральних даних методи спектрального моделювання додатково розділяють на класифікаційну модель (якісні результати) та регресійну модель (кількісна оцінка). Класифікація – це метод, який використовується для ідентифікації категорій різних речовин.

До поширених методів належать:

- метод опорних векторів (SVM),
- метод опорних векторів найменших квадратів (LS-SVM),
- наївний байєсівський метод (NB),
- метод логічної регресії.

Кластеризація – це процедура, яка дозволяє автоматично класифікувати вибірки: k-середні, ієрархічну кластеризацію, моделі гаусової суміші.

Регресійний аналіз прогнозує значення змінних шляхом встановлення лінійних або нелінійних моделей. Для регресійного аналізу застосовують методи комп'ютерного аналізу – регресія з частковими найменшими квадратами (PLSR), штучні нейронні мережі (ANN).

Важкі метали впливають на ріст рослин та їхні фізіологічні параметри (вміст хлорофілу та ферментативна активність). Корінь, стебло та листя відіграють важливу роль у рості рослин. Рівень важких металів у рослинах та фізіологічні параметри можна оцінити, аналізуючи інформацію про спектральне відбиття.

Дослідження з виявлення важких металів у коренях, стеблах, листках та плодах рослин забезпечують теоретичну основу для вивчення характеристик міграції важких металів у рослинних організмах. Спектроскопічна

технологія застосовується для аналізу листя або коренів рослин для отримання інформації про рівень вмісту або концентрацію важких металів.

HSI, Vis-NIR, CHI-FI, LIBS та RS є часто використовуваними спектрами для отримання інформації про рослини (рис. 1).

Джерело: Авторська розробка

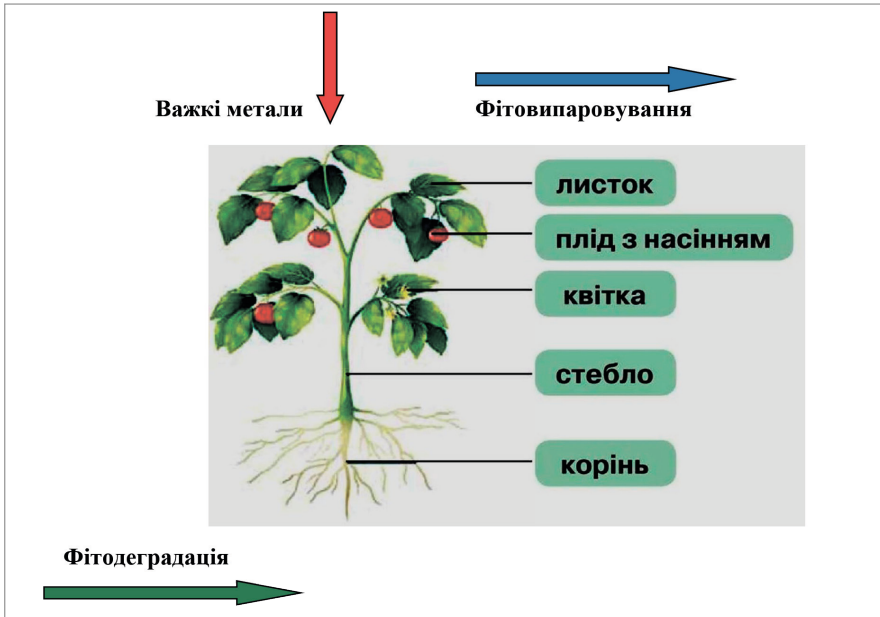


Рис. 1. Вплив важких металів на рослинний організм.

Для визначення вмісту важких металів в сировині фармакопейних рослин використовують комплексне використання методів: це – хімічний аналіз тканини, оцінка стану ґрунту, спостереження за фізіологічними змінами.

Лабораторні методи аналізу елементного складу тканин рослини:

- Атомно-абсорбційна спектрометрія (AAS): метод для виявлення металів (Pb, Cd, Cu, Zn), який потребує підготовки проби шляхом «мокрого» спалювання або мінералізації в кислотах.
- Спектрометрія з індуктивно-зв'язаною плазмою (ICP-OES/ICP-MS): одночасне визначення десятків елементів у низьких концентраціях. Метод ICP-MS має найвищу чутливість.
- Рентгенофлуоресцентний аналіз (XRF): експрес-аналіз без руйнування зразка.
- До біоіндикаційних та морфологічних методів відносяться:

- Визначення фітотоксичності: порівняння схожості насіння та довжини проростків на забрудненому та чистому субстратах.
- Морфометричний аналіз: вимірювання висоти рослин, площі листової поверхні та маси сухої речовини.
- Візуальна діагностика: фіксація ознак хлорозу, некрозу, деформації органів.

Використовують фізіолого-біохімічні методи, які допомагають виявити стресовий стан рослини до появи видимих ушкоджень:

- Аналіз пігментів: визначення вмісту хлорофілів та каротиноїдів, які першими реагують на токсичний вплив.
- Визначення активності ферментів: оцінка антиоксидантної системи (активність пероксидази, каталази), активація у відповідь на окиснювальний стрес.
- Флуоресценція хлорофілу: неінвазивний метод оцінки ефективності фотосинтезу, що показує пригнічення рослини важкими металами.

Виконують аналіз системи «ґрунт – рослина»: вивчення шляху потрапляння важкого металу, розрахунок спеціальних показників (коефіцієнт біологічного накопичення: співвідношення концентрації металу в рослинній тканині до його вмісту в ґрунті; визначення рухомих форм – хімічний аналіз ґрунтових витяжок).

Важкі метали Cd, Pb, As, Hg, Zn, Cr є високотоксичними забруднювачами навколишнього середовища. Ці метали накопичуються в ґрунтах внаслідок діяльності людини та порушують фізіологічні і біохімічні процеси в рослинних організмах. В першу чергу це пригнічення проростання насіння, пошкодження клітинних мембран. Кадмій та плумбум перешкоджають поглинанню води та знижують активність основних гідролітичних ферментів, гальмують фотосинтез, впливаючи на біосинтез хлорофілу та структуру хлоропластів. Всі перелічені процеси призводять до затримки росту та зменшення біомаси.

Важкі метали збільшують продукування активних форм кисню (АФК), викликають окислювальний стрес та пошкодження клітинних компонентів. Активація антиоксидантного захисту відбувається за ферментативними механізмами (ферменти – супероксиддисмутаза, каталаза, аскорбатпероксидаза) та неферментативними механізмами (глутатіон, аскорбат). Їхня ефективність залежить від типу металу та його концентрації.

На молекулярному рівні важкі метали впливають на експресію генів та викликають стресові реакції, підвищують регуляцію генів транспортерів металів, факторів транскрипції. Вони порушують поглинання поживних речовин і це призводить до дефіциту незамінних елементів (залізо, цинк) та послаблення стійкості рослин до стресу.

Тривалий вплив важких металів призводить до змін у взаємодії рослини та мікробіому, до зменшення корисних мікробних популяцій, впливають на стійкість до хвороб⁶.

Прояви токсичності важких металів на лікарських, зернових та інших культурах багатогранні: хлороз, затримка росту, складні фізіологічні зміни на клітинному рівні. На них впливають присутній важкий метал, його концентрація в ґрунті, тривалість впливу, властива сортам культур або рослин толерантність до ксенобіотиків.

Окрім порушення ферментативної активності важкі метали в ґрунті перешкоджають засвоєнню поживних речовин. Важливі поживні речовини (залізо, цинк, марганець та їх сполуки) є необхідними для різних функцій рослин. Їх засвоєння може бути ускладнене за наявності токсичних важких металів. Кадмій може конкурувати із залізом і цинком за засвоєння корінням рослин. Це призводить до дисбалансу, дефіциту поживних речовин. Таке втручання порушує життєво важливі клітинні процеси, призводить до симптомів захворювання, наприклад, хлороз (пожовтіння листя) через зниження вироблення хлорофілу⁷.

Зернові культури, лікарські рослини демонструють різні реакції на стрес, що спричинений важкими металами. Це залежить від конкретного металу, його концентрації, виду культури. Рослини рису, наприклад, особливо схильні до накопичення кадмію в зерні. Це може призвести до значних проблем зі здоров'ям людини при споживанні. Ячмінь та деякі сорти пшениці продемонстрували кращу стійкість до важких металів.

6 Gálvez, E. C., Dachs, J., Lundin, D., Fernández-Pinos, M. C., Sebastián, M., & Vila-Costa, M. (2021). Responses of Coastal Marine Microbiomes Exposed to Anthropogenic Dissolved Organic Carbon. *Environmental Science Technology*, 55(14), 9609–9621; Rane, J., Singh, A. K., Kumar, M., Boraiah, K. M., Meena, K. K., Pradhan, A., & Prasad, P. V. V. (2021). The adaptation and tolerance of major cereals and legumes to important abiotic stresses. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(23), 12970. <https://doi.org/10.3390/ijms222312970>; Mushtaq, Z., Asghar, H. N., & Zahir, Z. A. (2021). Comparative growth analysis of okra (*Abelmoschus esculentus*) in the presence of PGPR and press mud in chromium contaminated soil. *Chemosphere.*, 1, 262.

7 Zhao, F. J.; Tang, Z.; Song, J.J.; Huang, X. Y.; Wang, P. Toxic metals and metalloids: Uptake, transport, detoxification, phytoremediation, and crop improvement for safer food. *Mol. Plant* 2022, 15, 27–44; Sharma, J.K.; Kumar, N.; Singh, N.P.; Santal, A.R. Phytoremediation technologies and their mechanism for removal of heavy metal from contaminated soil: An approach for a sustainable environment. *Front. Plant Sci.* 2023, 14, 1076876; Sperdouli, I. Heavy metal toxicity effects on plants. *Toxics* 2022, 10, 715.

Вони здатні виживати та давати прийнятні врожаї на забруднених металами ґрунтах.

Реакції рослин на токсичність важких металів та металоїдів з можливим прямим та непрямим впливом на продуктивність сільськогосподарських культур спостерігаються після всмоктування токсичних елементів надземними та підземними частинами.

Вплив кадмію пов'язують зі зниженням життєздатності пилку та зменшенням кількості насіння. Забруднення важкими металами змінює поживний склад зернових. Це потенційно може призвести до дефіциту мікроелементів у популяціях.

Зменшення кількості необхідних поживних речовин (залізо, цинк, марганець) може вплинути на здоров'я людини та тварин. Харчові продукти, отримані з таких зернових можуть мати знижену харчову цінність.

Вирішення проблеми впливу важких металів на продуктивність та якість зернових культур вимагає комплексного підходу – відновлення важких металів у ґрунті, методи управління ґрунтом, вирощування стійких до впливу металів сортів сільськогосподарських культур.

Постійне тестування та моніторинг ґрунту відіграють вирішальну роль при ранньому втручанні. Інноваційні методи пом'якшення негативного впливу важких металів на врожайність, якість та безпеку харчових продуктів із зернових культур може допомогти зменшити ризики для здоров'я²²⁻²⁴.

Біодоступність важких металів у ґрунті є критичним аспектом екологічної науки. Зернові культури можуть накопичувати важкі метали в зернах. Це є шляхом їхнього негативного та небезпечного впливу на організм людини.

Процес біодоступності важких металів у зернових культурах ропочинається на рівні кореневої системи. Зернові культури поглинають воду та поживні речовини, в тому числі, й важкі метали, з ґрунту через свої корені. Поглинання важких металів відбувається через два механізми: пасивне поглинання та активне поглинання. Пасивне поглинання: важкі метали можуть пасивно потрапляти в коріння рослин через процес дифузії, інтенсивність якої залежить від градієнта концентрації іонів металів.

Активне поглинання: зернові культури використовують спеціалізовані транспортні білки – транспортери металів для активного перекачування іонів важких металів з ґрунту в свої кореневі системи (рис.2).

Джерело: Авторська розробка

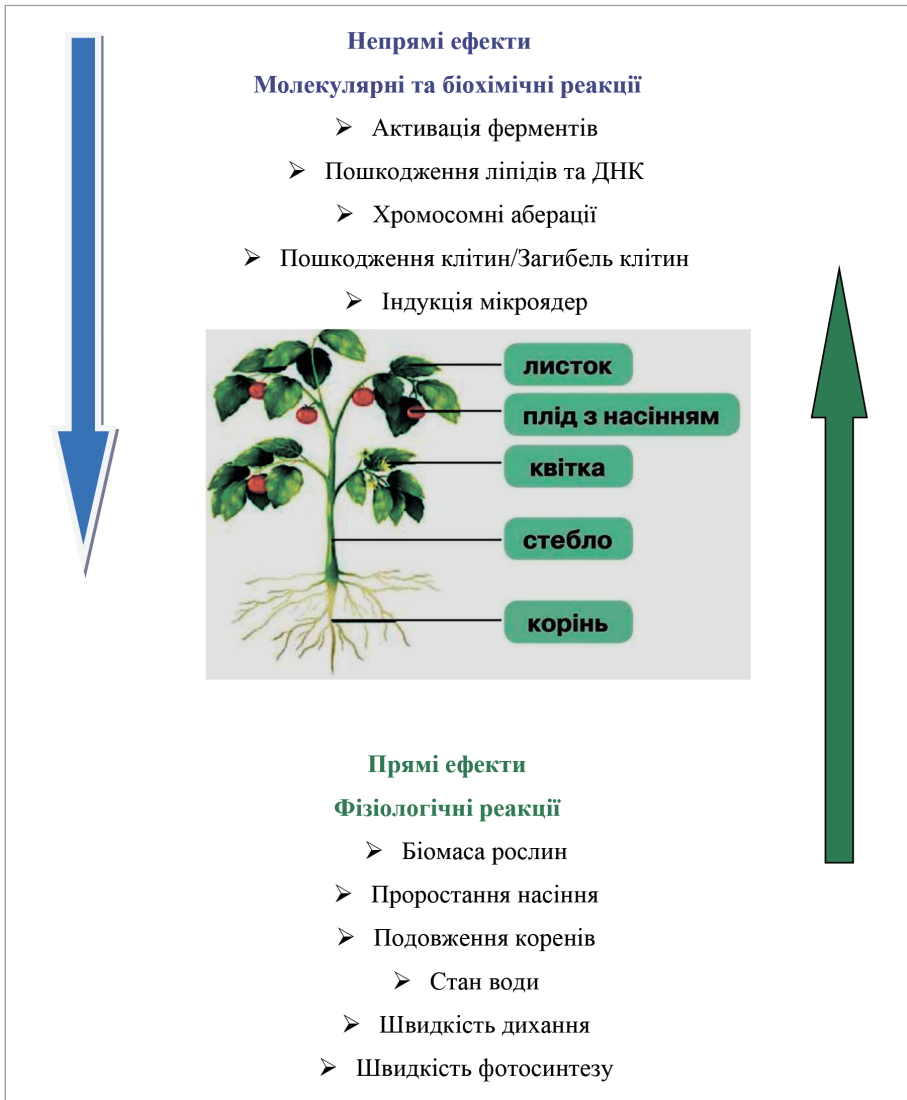


Рис. 2. Реакції рослин на токсичність токсичних металів та металоїдів з можливим прямим та непрямим впливом на продуктивність сільськогосподарських культур.

Кадмій в іонній формі (Cd^{2+}) має високу біодоступність, тоді як комплексні або осаджені форми кадмію можуть бути менш доступними для коренів рослин. Плюмбум найчастіше присутній у зовнішніх шарах зерен. Він може поглинатися зерновими культурами через кореневі системи, через активні процеси поглинання. Іони плюмбуму можуть

транспортуватися в клітини коренів спеціалізованими транспортними білками, які можуть ще транспортувати необхідні кальцій та магній. Після поглинання корінням плумбум може переміщуватися в надземні частини рослин. Це переміщення залежить від виду рослини. Деякі рослини мають більшу схильність до накопичення плумбуму в зернах. Сполуки хрому Cr(III) є менш токсичними і менш рухливим. Вважається, що для сполук хрому транспортні білки в мембранах кореневих клітин беруть участь у процесі поглинання. Ці транспортери сприяють потраплянню іонів Cr(III) у клітини кореня. Cr(VI) є більш розчинним, має більшу токсичність. Вважається, що відбувається поглинання іонів хромату (CrO_4^{2-}) через специфічні аніонні транспортери в мембранах кореневих клітин. Cr(VI) може зазнавати хімічного відновлення до Cr(III). Після поглинання корінням сполуки Cr(III) і Cr(VI) можуть транспортуватися в середину рослини. Транслокація відбувається через судинну систему рослини за участю ксилеми та флоєми⁸.

Одним із наслідків токсичності важких металів для рослин є хлороз – характеризується пожовтінням листя через порушення синтезу хлорофілу. Важкі метали (кадмій, плумбум) можуть перешкоджати виробленню хлорофілу.

Хлороз призводить до зниження фотосинтетичної здатності та характерного пожовтіння листя. Кадмій перешкоджає активності ферментів, що беруть участь у синтезі хлорофілу. Він порушує перетворення молекул-попередників на функціональні молекули хлорофілу. Хлоропласти в уражених клітинах листя стають дефіцитними на хлорофіл та спостерігається помітна втрата зеленого кольору. Плумбум може пригнічувати ферменти та метаболічні шляхи, що беруть участь у біосинтезі хлорофілу. Хлороз, викликаний плумбумом, проявляється як прогресуюче пожовтіння листя рослин. Кадмій може пригнічувати ферменти (дегідратаза δ -амінолевулінової кислоти (ALAD), протопорфіриногенаоксидаза (PPO)), які необхідні для виробництва хлорофілу.

8 Chandwani, S.; Kayasth, R.; Naik, H.; Amaresan, N. Current status and future prospects of managing lead (Pb) stress through microbes for sustainable agriculture. *Environ. Monit. Assess.* 2023, 195, 479; Aslam, M.M.; Okal, E.J.; Waseem, M. Cadmium toxicity impacts plant growth and plant remediation strategies. *Plant Growth Regul.* 2023, 99, 397–412; Sánchez-Navarro, A.; de Carmen Salas-Sanjuan, M.; Blanco-Bernardeau, M.A.; Sánchez-Romero, J.A.; Delgado-Iniesta, M.J. Medium-term effect of organic amendments on the chemical properties of a soil used for vegetable cultivation with cereal and legume rotation in a semiarid climate. *Land* 2023, 12, 897; Elango, D.; Devi, K.D.; Jeyabalakrishnan, H.K.; Rajendran, K.; Haridass, V. K. T.; Dharmaraj, D.; Charuchandran, C.V.; Charuchandran, C.V.; Wang, W.; Fakude, M.; et al. Agronomic, breeding, and biotechnological interventions to mitigate heavy metal toxicity problems in agriculture. *Agric. Food Res.* 2022, 10, 100374.

Хлороз – це прояв токсичності важких металів, що свідчить про порушення синтезу хлорофілу. Ступінь хлорозу залежить від кількох факторів: типу важкого металу, його концентрації в ґрунті, тривалості впливу, толерантності рослин⁹.

Під впливом оксидативного стресу рослини реагують активацією вироблення антиоксидантних ферментів. Для протидії шкідливому впливу активних форм кисню (АФК) рослини синтезують антиоксидантні ферменти – SOD та каталазу. Ферменти сприяють нейтралізації АФК та збереженню цілісності клітин. SOD допомагає запобігти окислювальному пошкодженню життєво важливих клітинних компонентів (білків, ліпідів, ДНК). Підвищена активність SOD сприяє швидкому перетворенню супероксидних радикалів, мінімізуючи окислювальне пошкодження клітинних структур.

Каталаза – це важливий антиоксидантний фермент, який відіграє вирішальну роль у детоксикації перекису водню (H_2O_2). Перекис водню відноситься до потужного АФК та може спричинити пошкодження клітин з порушенням метаболічних процесів. Каталаза активує розщеплення перекису водню на воду (H_2O) та кисень (O_2). У рослин, які зазнають впливу надлишку купруму, індукується активність каталази для поглинання накопиченого перекису водню. Спрацьовує антиоксидантний захисний механізм. Він допомагає захистити клітини рослини від окисного пошкодження, перенести стрес від впливу купруму без серйозних ушкоджень.

Окрім SOD та каталази рослини продукують інші антиоксидантні ферменти – пероксидази та глутатіонпероксидази. Ферменти працюють разом для боротьби з активними формами АФК та збереження клітинного гомеостазу. Неферментативні антиоксиданти (аскорбат (вітамін С), токофероли (вітамін Е), глутатіон) синтезуються у відповідь на стрес від важких металів. Антиоксиданти активно нейтралізують АФК безпосередньо, забезпечуючи додатковий шар захисту від окисного пошкодження.

Рослини-гіперакумулятори мають здатність поглинати підвищені рівні важких металів з ґрунту за умови коливань концентрацій цих металів.

9 Emamverdian, A.; Ding, Y.; Mokherdoran, F.; Xie, Y. Heavy metal stress and some mechanisms of plant defense response. *Sci. World J.* 2015, 2015, 756120; Ganguly, R.; Sarkar, A.; Dasgupta, D.; Acharya, K.; Keswani, C.; Popova, V.; Minkina, T.; Maksimov, A.Y.; Chakraborty, N. Unraveling the efficient applications of zinc and selenium for mitigation of abiotic stresses in plants. *Agriculture* 2022, 12, 1551; Armienta, M.A.; Beltrán, M.; Martínez, S.; Labastida, I. Heavy metal assimilation in maize (*Zea mays* L.) plants growing near mine tailings. *Environ. Geochem. Health* 2020, 42, 2361–2375; Gill, R. A.; Kanwar, M.K.; dos Reis, A.R.; Ali, B. Editorial: Heavy metal toxicity in plants: Recent insights on physiological and molecular aspects. *Front. Plant Sci.* 2022, 12, 830682; Khoudi, H. Significance of vacuolar proton pumps and metal/H⁺ antiporters in plant heavy metal tolerance. *Physiol. Plant.* 2021, 173, 384–393.

Гіперакумулятори є унікальною групою видів рослин, здатних виживати в забрудненому металами середовищі. Вони поглинають та зберігають високі концентрації важких металів у своїх надземних частинах без прояву симптомів токсичності. Ця здатність робить їх цінними у фітореMediaції, у стратегії фітоекстракції. Гіперакумулятори мають здатність накопичувати важкі метали. На поглинання важких металів рослинами-гіперакумуляторами впливають різні фактори: рН, вміст води, органічні речовини (органічні кислоти). Для ефективного механізму поглинання важких металів важлива функціонуюча система транспорту рослини. рН впливає на поглинання важких металів у гіперакумуляторах через два механізми: сприяння розчиненню металів шляхом секреції протонів з коренів (підкислення ризосфери); вплив на ріст видів рослин, які накопичують метали.

Фармакопейні та нефармакопейні рослини, їхня сировина, лікарські засоби рослинного походження часто фігурують як об'єкти дослідження хіміко-токсикологічного аналізу. Це пов'язано із забрудненням рослинної сировини важкими металами та іншими ксенобіотиками. Для підтвердження факту отруєння людини важкими металами використовують інструментальні методи хіміко-токсикологічного аналізу, як високотехнологічні та результативні. Проведення хіміко-токсикологічних досліджень рослинних об'єктів виконують за систематичним хіміко-токсикологічним аналізом (SCTA), який є ефективним аналітичним підходом та дозволяє ідентифікувати одночасно велику кількість токсикологічно значущих металічних та інших речовин. SCTA ґрунтується на використанні комплексу інструментальних досліджень. В арсеналі хіміко-токсикологічного аналізу присутні інструментальні методи, які часто використовують у комбінації: газова хроматографія-мас-спектрометрія (GC-MS), рідинна хроматографія-мас-спектрометрія (LC-MS) тощо¹⁰. SCTA вимагає паралельного використання методів або комбінацію аналітичних методів¹¹.

10 Sheikh A.A. Analysis of Heavy Metals in some selected vegetables by AAS method. *Our Heritage*. 2020. № 38. P. 984-989; Balaram V., Mathur R., Satyanarayanan M., Sawant S.S. et al. A Rapid Method for the Determination of Gold in Rocks, Ores and Other Geological Materials by F-AAS and GF-AAS After Separation and Preconcentration by DIBK Extraction for Prospecting Studies. *APAN-Journal of Metrology Society of India*. 2012. Vol.27. № 2. P. 87-95.

11 Welchinskaya H., Piecuszak B., Kovalenko E., Sharykina N., Getman K., Podgorsky V. Biological activity of bacterial lectins and their molecular complexes with heterocyclic bis-adducts. *Journal of Microbiology*. 2005. Vol.65. № 6. P. 20-25; Вельчинська О., Ніженковська І., Мелешко Р. Сучасні підходи до фармацевтичного аналізу методом ВЕРХ алкалоїду паклітакселу. *Фітотерапія. Часопис*. 2024. 3, 168-174, doi: <https://doi.org/10.32782/2522-9680-2024-3-168>; Zimenkovsky, B.S., Muzychenko, V.A., Nizhenkovska, I.V. & Syrova, G.O. (2014). *Biolochna i bioorganichna khimiya [Biological and bioorganic chemistry]*. K.: Medytyna, 3-d ed., 1, 25-150 [in Ukrainian]; Welchinska, E. (2017). *Toxicological and forensic chemistry (criminal analysis). Poisonous substances and their biotransformation: textbook*. K.: PE Lopatina O.O. 392 p.; Ніженковська І.В., Вельчинська О.В., Кучер М.М. (2020). *Токсикологічна хімія: підручник*. Київ: ВСВ «Медицина», 3-видання, 2020. 372 с. + XII с. <http://ir.libraryntnu.com/handle/123456789/9125>; Welchinskaya, H.V.,

Під час цілеспрямованого визначення токсикантів у зразках рослинного походження використовують методи LC–MS у тандемі з *headspace* (HS)–GC–MS, HS–GC–полум'яно-іонізаційним детектором. За допомогою комбінації методів аналізу підлягає широкий спектр речовин із різноманітними фізико-хімічними властивостями. Оскільки методи аналізу характеризуються різним ступенем чутливості та специфічності, тому іноді не можуть забезпечити очікуваного результату. Відомим методом визначення важких металів у хіміко-токсикологічному аналізі є метод атомно-абсорбційної спектрометрії (AAC, AAS). Метод ґрунтується на поглинанні світла вільними атомами та має специфічний для елементів набір рівнів електронної енергії. Метод використовується для кількісного визначення хімічних компонентів, концентрації металів у різних формах зразків. Високої інтенсивності світла досягають за допомогою електродних газорозрядних ламп (EDL). Такі лампи доступні для визначення небагатьох елементів (As, Bi, Cd, Cs, Ge, Hg, P, Pb, Sb, Rb, Se, Sn, Te, Tl і Zn).

Ефективною є комбінація оптичної емісійної спектрометрії з індуктивно-зв'язаною плазмою (ІЗП-ОЕС), плазмена атомно-емісійна спектрометрія (ІЗП-АЕС), мас-спектрометрія з індуктивно-зв'язаною плазмою (ІЗП-МС). ІЗП-ОЕС та ІЗП-АЕС використовують для виявлення мікроелементів в біологічних об'єктах, в тому числі, й рослинних зразках. Позитивні характеристики методів: висока швидкість аналізу, відсутні проблеми з хімічними або іонізаційно-спектральними перешкодами порівняно з методом ААС, малий об'єм розчину зразку (1-2 мл), широкий лінійний діапазон калібрування (більше 6-ти порядків). Недоліки методів: межі виявлення недостатні для відкриття деяких елементів в біологічних зразках (As, Se, Pb), висока вартість аналізу, перешкоди від спектральних накладень або впливу матриці. Серьозним досягненням в *pprt*-області при вивченні біологічних зразків став метод ІЗП-МС, який дозволяє реєструвати окремі іони ізотопів. Актуальним завданням є впровадження у практику хіміко-токсикологічного аналізу комбінованих методів ІЗП-ОЕС, ІЗП-АЕС, ІЗП-МС, РФА, НАА, ГРС (Мессбауера).

Pieczuszek, B., Kovalenko, E.A., Sharykina, N.I., Getman, K. I. Biological activity of bacterial lectins and their molecular complexes with heterocyclic bis-adducts. *Mikrobiolohichniy Zhurnal*. 2003. Vol.65(5). P. 20-25; Ніженковська І., Вельчинська О., Горчакова Н., Нароха В. Моделювання/прогнозування фізико-хімічних параметрів, біологічної активності та фармакокінетики похідної DL-триптофану *in silico*. *Фітотерапія. Часопис*. 2025. № 3. С. 13–21. doi: <https://doi.org/10.32782/2522-9680-2025-3-13>.