



УДК 504.5:502.3/.7:546.95

## НАДХОДЖЕННЯ І МІГРАЦІЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ НАЗЕМНИМИ ТА ВОДНИМИ ЕКОСИСТЕМАМИ

**В. М. ВОЙЦІЦЬКИЙ**, доктор біологічних наук, професор, провідний науковий співробітник

<http://orcid.org/0000-0002-5641-0071>

**С. В. ХИЖНЯК**, доктор біологічних наук, професор, провідний науковий співробітник

<http://orcid.org/0000-0001-6745-2894>

**В. В. ДАНЧУК**, доктор сільськогосподарських наук, професор, заступник директора з наукової та навчальної роботи УЛЯБП АПК

<http://orcid.org/0000-0003-2156-1758>

**С. В. МІДИК**, кандидат ветеринарних наук, старший науковий співробітник

<http://orcid.org/0000-0002-2682-2884>

**О. Ю. КЕППЛ**, кандидат ветеринарних наук, науковий співробітник

<https://orcid.org/0000-0002-8123-3310>

**В. О. УШКАЛОВ**, доктор ветеринарних наук, член-кореспондент НААН України, професор, директор УЛЯБП АПК

<http://orcid.org/0000-0001-5694-632X>

**Національний університет біоресурсів і природокористування України**

E-mail: [khs2014@ukr.net](mailto:khs2014@ukr.net)

<https://doi.org/10.31548/bio2019.01.007>

Наведено різнобічні трактовки стосовно визначення поняття «важкі метали» і визначено найбільш вживаний на даний час: це хімічні елементи з порядковим номером у періодичній системі Д. І. Менделєєва більше 20 і питомою вагою не менше 5 мг/см<sup>3</sup>. Вказані основні їх джерела: дегазація земної кори, її тектонічні рухи, вулканічні викиди, вивітрювання і вимивання гірських порід, добування корисних копалин, спалювання органічного палива для отримання енергії, промислові та міські відходи, викиди в атмосферу та забруднення стічних вод металургійної, хімічної, електротехнічної та інших промисловостей, металовмісні отрутохімікати та добрива в агропромисловому комплексі, засоби побутової хімії тощо. Узагальнено результати досліджень можливих шляхів міграції важких металів наземними і водними екосистемами, в тому числі трофічними ланцюгами. Запропоновано для оцінки міграційної здатності важких металів ланцюгами екосистем застосовувати метод камерних моделей. У цьому методі на основі визначених коефіцієнтів переходу речовин, у тому числі важких металів, між камерами (ланками міграційного ланцюга), які мають індивідуальну характеристику для конкретних екосистем, міграція речовин відбувається за законами кінетики першого порядку і описується системою диференціальних рівнянь. Цей підхід можна застосовувати для будь-якого ланцюга екосистеми. Цей метод дозволяє також визначити критичні (найчутливіші) ланки шляху міграції речовин, зокрема важких металів, ланцюгами наземних і водних екосистем.

*Ключові слова:* важкі метали, джерела, міграція, екосистеми, метод камерних моделей



**Актуальність.** Екстенсивний характер розвитку людської цивілізації обумовлює потенційні ризики зростання надходження важких металів у довкілля, що, враховуючи їх значну екотоксичність, становить загрозу для всієї біосфери, зокрема і для людини.

Особливої актуальності набула проблема комплексного дослідження наслідків еколого-токсикологічного впливу важких металів на організм людини, аналізуючи шляхи їх міграції трофічними ланцюгами екосистем.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Метали (лат. *metallum* – рудник) – глобально поширені у земній корі речовини, які видобуваються і використовуються людиною протягом багатьох тисячоліть. Особливу групу хімічних елементів із металічними властивостями складають важкі метали (ВМ), до яких відносяться перехідні метали, деякі лантаноїди та актиноїди. Існує кілька визначень цього терміну, які засновані на щільності, атомному номері або масі, хімічних властивостях, токсичності тощо [1, с. 9]. Оскільки термін «важкі метали» в науковій літературі не має чіткого визначення, кількість хімічних елементів, що відносяться до групи ВМ, варіює у широких межах.

Термін «важкі метали» часто використовується як узагальнююча назва для металів, які є забруднювачами довкілля і потенційно токсичні для екосистем та, зокрема, людини [2, с. 227]. Але з точки зору токсикології, токсичність будь-якої речовини, в тому числі і хімічного елемента, залежить від його дози та терміну дії. Крім того, у разі використання терміну «метали» мається на увазі, що чистий метал і його сполуки мають однакові фізико-хімічні, біологічні та токсичні властивості. Це ставить під сумнів подібне трактування терміну «важкі метали».

У медичній практиці термін «важкі метали», зазвичай, включає всі метали, що

проявляють токсичність при надлишковому потрапленні до організму людини, незалежно від фізико-хімічних і біологічних властивостей. У більшості країн світу в медичній практиці до списку «важкі метали» включено і «легкі метали» (зокрема, Алюміній і Берилій), а також металоїд Арсен, але Бісмут, який є найщільнішим зі стабільних хімічних елементів, не включений у цей список із-за його низької токсичності. Найбільш поширене визначення терміну «важкі метали», яке використовується в екотоксикології, мабуть, є наступне: важкі метали – це хімічні елементи з порядковим номером у періодичній системі Д. І. Менделєєва більше 20, а також питомою вагою не менше 5 г/см<sup>3</sup> [2, с. 227; 3, с. 66].

Із 35 металів, які зазвичай потрапляють до організму людини (переважно із продуктами харчування, питною водою і вдихуванням повітрям), до ВМ, як правило, відносять 23 (розміщені за зростанням порядкового номера в періодичній системі Д. І. Менделєєва): Ванадій (V), Хром (Cr), Манган (Mn), Ферум (Fe), Кобальт (Co), Нікел (Ni), Купрум (Cu), Цинк (Zn), Галій (Ga), Арсен (As), Аргентум (Ag), Кадмій (Cd), Станум (Sh), Стибій (Sb), Церій (Ce), Тулій (Tm), Платина (Pt), Аурум (Au), Меркурій (Hg), Талій (Tl), Плюмбум (Pb), Бісмут (Bi) і Уран (U). Вони у невеликих кількостях присутні у продуктах харчування і більшість з них є необхідними для людини (так звані мікроелементи, вміст яких в живих організмах не перевищує 10<sup>-3</sup> % і не менше 10<sup>-12</sup> % [4, с. 11], але у великих кількостях будь-який із цих хімічних елементів є токсичним.

Хімічні елементи Арсен, Меркурій, Плюмбум і Кадмій включені Агентством з реєстрації токсичних субстанцій і хвороб (Agency for Substances and Disease Registry, ATSDR) у список 20 найбільш небезпечних для людини.



До ВМ також часто відносять Берилій (Be), Алюміній (Al), Скандій (Sc), Селен (Se), Стронцій (Sr), Ітрій (Y), Цирконій (Zr), Необій (Nb), Рутеній (Ru), Родій (Rh), Паладій (Pd), Індій (In), Барій (Ba), Лантан (La), Гафній (Hf), Тантал (Ta), Вольфрам (W) та Іридій (Ir). Усі ці хімічні елементи, як і попередньо наведені, здатні спричинювати у певних концентраціях токсичну дію на організм [2, с. 227; 4, с. 13; 5, с. 5].

Важкі метали приймають участь у кругообігу речовин у довкіллі, впливаючи на живу природу. Їх вилучення із цього процесу можливо тільки внаслідок захоронення, але і це не виключає потрапляння ВМ у довкілля, оскільки не існує «вічних» сховищ, не виключена можливість їх руйнування як за рахунок «старіння», так і можливих різнобічних тектонічних катастроф.

Забруднення довкілля ВМ відбувається внаслідок їх міграції від різноманітних джерел. Це, насамперед, дегазація земної кори, тектонічні рухи – різні за напрямленнями та інтенсивністю рухи земної кори, які викликають деформації або розриви її шарів. Джерелами ВМ є вулканічні викиди, вивітрювання і вимивання гірських порід, добування корисних копалин, спалювання палива, промислові та міські відходи, викиди в атмосферу та забруднення стічних вод внаслідок діяльності металургійної, хімічної, електротехнічної промисловості. Все це, а також використання металовмісних пестицидів, добрив, стоки із забрудненого ґрунту призводить до забруднення ВМ харчових продуктів, кормів та питної води.

Суттєвим є те, що накопичення ВМ компонентами екосистем стало результатом швидкого індустріального розвитку суспільства, посилення хімізації сільськогосподарства і використання металовмісних побутових засобів.

Наслідком міграції ВМ, як і будь-яких інших речовин, може бути їх розсіювання і концентрування. Розсіювання ВМ обу-

мовлюється їх розбавленням або осадженням з транспортних потоків, а концентрування – у випадках, коли через певні причини швидкість транспортуючого потоку в цілому або швидкість переміщення яких-небудь частинок потоку різко зменшується. Такі природні ділянки у довкіллі є так званими геохімічними бар'єрами, а, в свою чергу, геохімічна міграція хімічних елементів – це нерозривний комплекс процесів, що призводить до їх перерозподілу в об'єктах довкілля. Вся система від джерела хімічних елементів до геохімічного бар'єру – це міграційний потік (ланцюг розповсюдження) [1, с. 56]. Переміщення хімічних елементів відбувається у транспортуючому середовищі у міграційних фізичних потоках, а також шляхом біогенного поглинання живими організмами і далі трофічними ланцюгами до інших організмів.

Хімічні елементи, зокрема ВМ, можуть потрапляти до живих організмів різними шляхами. Для людини це:

1) через легені із вдихуванням повітрям, яке забруднене парами елементів, аерозолями, або частинками;

2) через шлунково-кишковий тракт із продуктами харчування, питною водою і напоями; кількість хімічних елементів, що потрапляють до організму через травну систему, може варіювати в широких межах у залежності від їх вмісту у продуктах споживання, хімічної природи, віку і харчового статусу індивідууму тощо;

3) контактним шляхом – через шкірний покрив, очі, слизові оболонки рота і носа.

Після надходження до організму людини ВМ розподіляються у тканинах і органах. Їх виділення з організму, зазвичай, здійснюється через нирки і травний тракт, але метали здатні акумулюватися в деяких органах, зокрема, таких як печінка, нирки і кістки та зберігатися в них протягом багатьох років. Аналіз прояву негативної дії на організм людини ВМ



свідчить, що через високу біологічну активність вони здатні порушувати функціонування систем організму людини (травної, м'язової, кровотворної, нервової, ендокринної, імунної тощо), призводити до ураження тканин і органів: крові, серця, печінки, нирок, легенів, м'язів, кісток, мозку, слизових оболонок, очей і шкіри. Більшість з них володіють мутагенною, канцерогенною, тератогенною, ембріо- і гонадотоксичною дією.

**Мета дослідження** – уніфікувати підходи щодо аналізу шляхів міграції важких металів наземними і водними екосистемами для обґрунтування моделей прогнозування їх міграції, що може бути використано для розробки заходів попередження та мінімізації негативних екологічних наслідків.

**Матеріали та методи дослідження.** Одним із комплексних показників, який використовують для оцінки міграційної здатності речовин ланцюгами екосистем є коефіцієнт переходу ( $K_{\Pi}$ ) [6, с. 70; 7, с. 384]. Так, наприклад, для оцінки переходу речовини з ґрунту до рослин, цей показник розраховують як відношення кількості речовини в мг або мкг на 1 кг сухої маси рослин до його кількості (мг або мкг) в 1 кг повітряно-сухого ґрунту, на якому ці рослини вирощено:

$$K_{\Pi} = \frac{C_1}{C_2},$$

де  $K_{\Pi}$  – коефіцієнт переходу речовини;  $C_1$  – вміст речовини в 1 кг сухої маси рослин;  $C_2$  – вміст речовини в 1 кг ґрунту (на якому рослини вирощено).

Для водних екосистем – під час оцінки переходу речовини з водного середовища до рослин коефіцієнт переходу ( $K_{\Pi}$ ) розраховують як відношення концентрації речовини (в мг або мкг на 1 кг сухої маси рослин) –  $C_1$  до концентрації речовини (мг або мкг на 1 м<sup>3</sup>) води, у якому мешкають водні організми –  $C_2$ . Відповідно, для організмів, які мешкають у ґрунті водойм або на ньому (бентосу)  $C_2$

– це концентрація речовин в мулі (мг або мкг в 1 кг мулу).

Зручною моделлю для оцінки міграції ВМ в екосистемах може бути метод камерних моделей, який показав свою ефективність під час дослідження шляхів міграції радіонуклідів [6, с. 73; 7, с. 388; 8, с. 26] та стійких до розпаду пестицидів ланцюгами наземних і водних екосистем [9, с. 41]. За використання цього методу ланцюг перенесення ВМ поділяють на камери (в англійській літературі *box* – коробка), а взаємодія між камерами обумовлюється коефіцієнтом переходу.

**Результати дослідження та їх обговорення.** В угрупованні організмів (біоценозі) зазвичай існує кілька паралельних ланцюгів міграції речовин, між якими можливий взаємозв'язок.

Стосовно наземних екосистем, надходження ВМ у рослини відбувається внаслідок поверхневої адсорбції листям і стеблом, а також поглинання кореневою системою, тобто існує позакореневий і кореневий типи надходження речовин. Кореневий шлях надходження ВМ до рослин обумовлений фізико-хімічними властивостями цих речовин, ґрунту, видом рослин тощо. Позакореневий шлях надходження ВМ до рослин обумовлюється їх адсорбцією та здатністю до накопичення. Подальша міграція речовин у рослинах залежить як від їх фізико-хімічних властивостей, так і біологічних особливостей рослин. Позакореневе надходження речовин до рослин можливе також унаслідок вторинного вітрового підймання з ґрунту (дефляції), що залежить, насамперед, від властивостей повітряних потоків та поверхні ландшафту і ґрунту.

Наступне надходження ВМ до організму людини відбувається, зокрема, як внаслідок безпосереднього споживання у їжу забруднених ВМ рослин або їх плодів чи насіння, та і з продуктами тваринництва, які отримані від тварин, що харчувалися забрудненими рослинами.



У разі надходження ВМ до прісноводних водойм вони розподіляються між водою, донними відкладеннями (мулом) і біотою з можливістю взаємного переходу. Вода у водоймах відіграє роль сполучної ланки в ланцюзі міграції речовин до донних відкладень і організмів, що в ній мешкають. Важкі метали можуть міститися у воді в складі різних хімічних сполук, у водорозчинній формі чи у вигляді суспензій.

У звичайних непроточних водоймах із сапропелевими (складається, в основному, з органічних речовин – залишків водних організмів) донними відкладеннями ВМ концентруються, як правило, у верхньому шарі мулу завтовшки 10–20 см. Висока поглинаюча здатність цього шару донних відкладень зумовлена великою кількістю органічних речовин, що містяться в ньому і перебувають у вискодисперсному колоїдному стані. Саме завдяки цьому донні відкладення у водоймі відіграють роль депо, у якому концентруються речовини, що потрапили до нього.

Концентраційна рівновага між водою і донними відкладеннями може зміщуватися в той чи інший бік. Одними з найважливіших чинників, що впливають на цей процес, є мінералізація та значення рН (водневого показника) води водойми.

За розподілу ВМ у водоймах надзвичайно суттєву роль відіграє біота (гідрофауна і гідрофлора). Основну масу живих організмів у природних водоймах становить планктон (сукупність організмів, які мешкають у товщі води і пасивно переносяться водними течіями) і мікробентос (сукупність мікроорганізмів, які мешкають у ґрунті водойм). Саме у мікроорганізмів (бактерій, одноклітинних водоростей, мікроскопічних грибів і найпростіших) швидкість розмноження максимальна і тому їх продуктивність набагато вища від такої у всіх інших

представників біоти. Речовини, які утримуються в детриті (зважаючи у воді органічні речовини, які складаються з частинок тіла тварин і обривків рослин), разом із ним переходять у донні відкладення. Частина водорозчинних речовин, які первісно є у воді, накопичується як рослинами, так і тваринами безпосередньо з води, інша – надходить до цих організмів із донних відкладень. Для тварин також суттєвим є їх надходження до організму трофічними (харчовими) ланцюгами.

Принциповим для міграції ВМ у річках є як їх кількість, що потрапила з повітрям, поверхневими стоками, підземними водами тощо, так і фізико-хімічними властивостями ВМ та їх сполук. Також важливими чинниками є швидкість течії води, рельєф дна, наявність плес, заплав і гідротехнічних споруд, можливість утворення донних відкладень тощо.

Необхідно підкреслити, що надзвичайно небезпечним для здоров'я людини є споживання питної води, яка містить ВМ, що потрапили до неї в місцях забору з водосховищ і річок, з поверхневими та підземними водами.

Таким чином, міграція ВМ у прісноводних екосистемах контролюється складними фізико-хімічними і біологічними процесами. Одні з них можуть зумовлювати розсіювання ВМ, а інші – їх концентрування в окремих ланках екосистеми. Значна частина ВМ утримується в донних відкладеннях, а певна – у воді, також може інкорпороватися організмами, що мешкають в цих екосистемах.

У випадку каскаду з кількох прісноводних водойм спостерігається така закономірність: чим більша кількість таких водойм, то вищий чинник накопичення ними ВМ. На цій властивості каскадів побудована система водойм-очищувачів від різноманітних токсичних речовин, в





тому числі ВМ, на екологічно небезпечних підприємствах.

До морів та океанів ВМ потрапляють з атмосфери, з водою річок, у разі вимивання з підводних і берегових гірських порід, за дегазування поверхні дна і тектонічних подій, особливо під час підводних землетрусів і вулканічних викидах, тощо. Навіть ті викиди ВМ, які відбулися у відкритому морі (океані), внаслідок течій або хвиль, що виникли унаслідок підводних землетрусів і вивержень вулканів, можуть досягати як континентального шельфу, з його багатою біотою, так і берега.

Важкі метали, що потрапили до морських (океанічних) екосистем повітряним шляхом, відносно рівномірно розподіляються серед їх основних компонентів – води і морської біоти (рослини, тварини, мікроорганізми). Ті з них, які потрапили до моря із стоками річок, концентруються, насамперед, у місцях їх стоку на відносно малих ділянках шельфу.

Водні рослини накопичують ВМ із ґрунту та води. Водні тварини здатні накопичувати ВМ як безпосередньо з води (а ті, що мешкають на ґрунті, також із ґрунту), так і трофічними ланцюгами. Для тварин найбільша здатність накопичення притаманна фільтрувальним організмам (зоопланктону, губкам, кишково-порожнинним, червам, моллюскам та ін.), які здатні до накопичення як у розчинній, так і нерозчинній (суспензії) формі.

У відкритому морі (океані) біота незначно впливає на перерозподіл ВМ, оскільки її чисельність значно менша у порівнянні з такою на континентальному шельфі. Крім того, концентрація ВМ теж суттєво менша із-за величезного об'єму води. Важливим є також те, що морські (океанічні) організми (зокрема, риби) поглинають менше ВМ, ніж прісноводні, що обумовлено різним хімічним складом морської та прісної води. Разом із цим, наприклад, в акваторії

виверження підводних вулканів (їх кількість складає майже 90 % від усіх діючих вулканів на Землі) накопичення ВМ біотою значно зростає із-за їх високої концентрації у воді цієї акваторії.

До організму людини ВМ, які містяться в морських (океанічних) системах, потрапляють із морепродуктами (водорості, морські ссавці, риба, молоски, ракоподібні та ін.).

Узагальнююча схема основних шляхів міграції ВМ ланцюгами наземних і водних екосистем представлена на рисунку 1.

Міграція ВМ ланцюгами екосистем – це доволі складний процес, який залежить від багатьох чинників. Це, зокрема, фізико-хімічні властивості самих ВМ та їх сполук, ґрунту, води тощо, дія абіотичних (температура, вологість тощо) і біотичних (ґрунтові і водні мікроорганізми та інші організми, які здатні накопичувати ВМ) чинників, шляхи надходження до живих організмів, швидкість їх метаболічних перетворень та багато іншого [10, с. 126].

Тому для оцінки міграції ВМ у наземних і водних екосистемах можна запропонувати метод камерних моделей [6, с. 73; 7, с. 388; 8, с. 26; 9, с. 41]. За засобом взаємодії між камерами моделі поділяються на стаціонарні та динамічні.

На рисунку 2 наведено приклад моделей, які складаються із чотирьох камер, що характеризують трофічний ланцюг ґрунт–рослина–тварина–людина.

Для стаціонарних камерних моделей (рис. 2а) приймається, що концентрація речовини в кожній камері рівномірна, а між ними існує стала статистична рівновага (коефіцієнти переходу речовини між камерами сталі). За цієї моделі міграція речовини між камерами речовини відбувається за законами кінетики першого порядку і описується наступною системою диференціальних рівнянь для 4-камерної стаціонарної моделі:

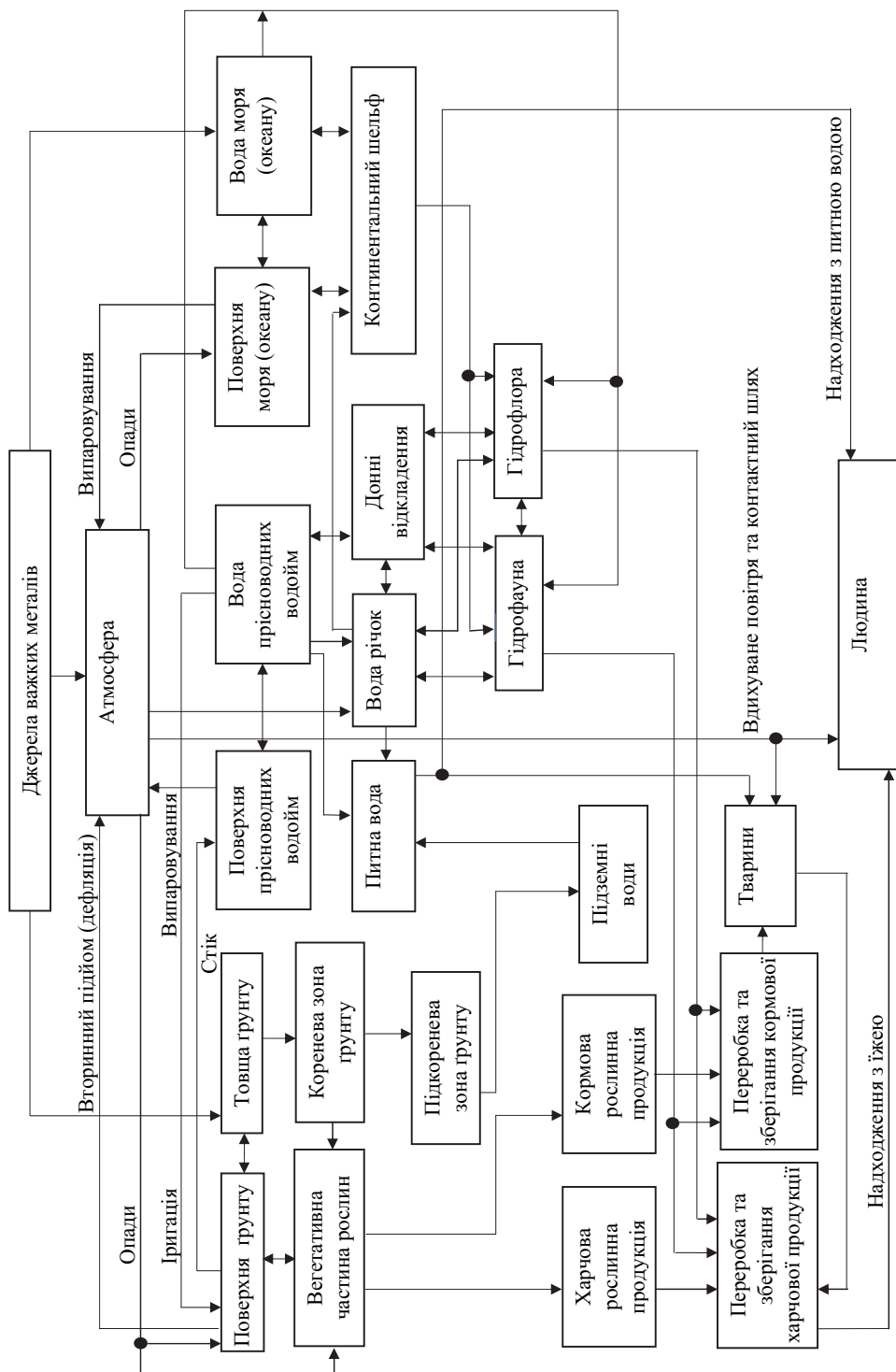


Рис. 1. Блок-схема основних шляхів міграції важких металів ланцюгами наземних і водних екосистем

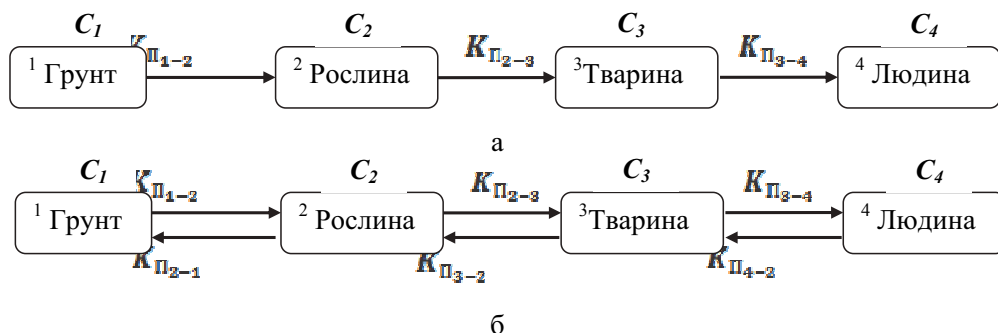


Рис. 2. Найпростіші стаціонарна (а) і динамічна (б) камерні моделі трофічного ланцюга ґрунт-рослина-тварина-людина: 1, 2, 3, 4 – номери модельних камер;  $C_1, C_2, C_3, C_4$  – концентрація речовин у відповідних камерах;  $K_{П1-2}, K_{П2-3}, K_{П3-4}$  – прямі коефіцієнти переходу речовини між камерами;  $K_{П2-1}, K_{П3-2}, K_{П4-3}$  – зворотні коефіцієнти переходу речовини між камерами.

**Примітка:** Двома цифрами з тире між ними як індекс біля коефіцієнту переходу (КП) позначено номери камер, між якими відбувається перехід речовини.

$$\frac{dC_1}{dt} = -K_{П1-2} \cdot C_1;$$

$$\frac{dC_2}{dt} = K_{П1-2} \cdot C_1 - K_{П2-3} \cdot C_2;$$

$$\frac{dC_3}{dt} = K_{П2-3} \cdot C_2 - K_{П3-4} \cdot C_3;$$

$$\frac{dC_4}{dt} = K_{П3-4} \cdot C_3,$$

де тут і далі:  $d$  ( $dC_1, dC_2, dC_3, dC_4$  і  $dt$ ) – символ диференціювання;  $t$  – час.

Динамічна камерна модель (рис. 2б) ґрунтується на таких основних твердженнях: 1) ланцюги екосистеми поділяють на камери, в яких речовина миттєво перемішується в усіх частинах камери однаково в будь-якому напрямку; 2) перенесення речовини з однієї камери до іншої відбувається, як і в стаціонарній моделі, за законами кінетики першого порядку, що описується системою диференціальних рівнянь. Водночас коефіцієнти переходу речовини між камерами є сталими величинами. За цими постулатами система диференціальних рівнянь, що описує міграцію речовини в 4-камерній динамічній моделі має вигляд:

$$\frac{dC_1}{dt} = K_{П2-3} \cdot C_2 - K_{П1-2} \cdot C_1;$$

$$\frac{dC_2}{dt} = K_{П2-1} \cdot C_1 - K_{П2-3} \cdot C_2 - K_{П3-2} \cdot C_2 + K_{П4-3} \cdot C_3;$$

$$\frac{dC_3}{dt} = K_{П2-3} \cdot C_2 + K_{П4-3} \cdot C_4 - K_{П3-2} \cdot C_3 - K_{П3-4} \cdot C_3;$$

$$\frac{dC_4}{dt} = K_{П3-4} \cdot C_3 - K_{П4-3} \cdot C_4.$$





Практично для ланцюгів екосистеми будь-якої складності може бути розв'язана система диференціальних рівнянь (за використання математичних програм, наприклад, MAPLE 6) та отримані значення  $C_1, C_2, C_3$  та  $C_4$  в динаміці для будь-яких значень коефіцієнтів переходу ( $K_{\Pi}$ ) від моменту надходження речовини до першої камери.

За наявності постійного джерела забруднення, тобто якщо відбувається неперервне надходження речовини, наприклад, до камери 1 (грунту), що відображено на рисунку 2, до наведеної системи диференціальних рівнянь додається наступне:

$$\frac{dC_0}{dt} = K_{\Pi_0} C_0,$$

де  $C_0$  – концентрація речовини у джерелі на момент початку її міграції;

$K_{\Pi_0}$  – коефіцієнт переходу речовини від джерела до камери 1.

Таким чином, метод камерних моделей є простим і адекватним математичним способом опису міграційних проце-

сів речовин в екосистемах різної складності. Він може бути використаний в тому числі і для оцінки міграції ВМ екосистемами.

**Висновки.** З огляду на необхідність зниження екологічного навантаження на довкілля, проблема уніфікації підходів щодо аналізу природних і антропогенних джерел ВМ та вивчення процесів міграції цих забрудників в екосистемах є надзвичайно актуальною проблемою. Для прогнозування міграції ВМ в екосистемах запропоновано алгоритм, що базується на методі камерних моделей, в основі якого – визначення коефіцієнтів переходу ВМ між камерами-ланками ланцюгів екосистеми, а міграція ВМ до кожної із камер підпадає під закон кінетики першого порядку та описується системою диференціальних рівнянь. Представлений підхід, опираючись на результати експериментальних (лабораторних та польових) досліджень, можливий для адекватної оцінки небезпеки ВМ і розробки заходів зниження їх навантаження на екосистеми.

## Література

1. Медведев И. Ф., Деревягин С. С. Тяжелые металлы в экосистемах. Саратов: Ракус, 2017. 178 с.
2. Екологічна біохімія: навчальний посібник / В. М. Ісаєнко, В. М. Войціцький, Ю. Д. Бабенюк, С. В. Хижняк, В. М. Ільїн, С. А. Олійник. К.: Книжкове видавництво НАУ, 2005. 440 с.
3. Мусієнко М. М., Серебряков В. В., Брайон О. В. Екологія. Охорона природи: словник-довідник. К.: Знання, 2002. 550 с.
4. Біохімія / М. Є. Кучеренко, Ю. Д. Бабенюк, О. М. Васильєв, Р. П. Виноградова, В. М. Войціцький, М. Д. Курский, В. К. Рибальченко, Б. О. Цудзевич. К.: ВПЦ Київський університет, 2002. 480 с.
5. Хижняк С.В. Клітинні механізми токсичності Кадмію. К.: Видавництво „LAT&K”, 2010. 213 с.
6. Кутлахмедов Ю. О., Корогодін В. І., Кольтовер В. К. Основи радіоекології: навчальний посібник / За ред. В.П. Зотова. К.: Вища школа, 2003. 319 с.
7. Кутлахмедов Ю. О., Войціцький В. М., Хижняк С. В. Радіобіологія: підручник. К.: ВПЦ Київський університет, 2011. 543 с.
8. Радіоекологія. Камерні моделі / Ю. О. Кутлахмедов, І. В. Матвеева, В. П. Петрусенко, В. В. Родіна. К.: Книжкове видавництво НАУ, 2013. 84 с.
9. Шляхи міграції стійких пестицидів трофічними ланцюгами наземних і водних екосистем / С. В. Хижняк, В. М. Войціцький, В. М. Данчук, С. В. Мідик, О. А. Лапоша, В. О. Ушкалов // Біоресурси і природокористування. 2018. Т.10, №1–2. С. 36–43.
10. Кутлахмедов Ю. А., Матвеева И. В., Гроза В. А. Надежность биологических систем: учебное пособие. К.: Украинский фитосоциологический центр, 2018. 352 с.

## References

1. Medvedyev, Y. F., Derevyagin, S. S. (2017) Tyazhelyie metallyi v ekosistemah [Heavy metals in ecosystems]. Saratov: Rakus.
2. Isaenko, V. M., Voitsitskiy, V. M., Babenyuk, Yu. D., Khyzhnyak, S. V., Il'yn, V. M., Oliynik, S. A. (2005) Ekologichna biokhimiya [Ecological biochemistry]. Kyiv: Knyzhkove vydavnytstvo NAU.
3. Musienko, M. M., Serebryakov, V. V., Brayon, O. V. (2002) Ekologiya. Ohorona prirodi: slovník-dovidnik [Ecology. Nature Conservation: Dictionary-Directory]. K.: Znannya.
4. Kucherenko, M.E., Babenyuk, Yu.D., Vasilev, O.M., Vinogradova, R.P., Voytsitskiy, V. M., Kurskiy, M.D., Ribalchenko, V.K., Tsudzevich, B.O. (2002) Biohimiya: pidruchnik [Biochemistry: a textbook]. K.: VPTs Kiyivskiy unyversitet.
5. Khyzhnyak, S. V. (2010) Klitynni mekhanizmi toksichnosti kadmiyu [Cellular mechanisms of cadmium toxicity]. Kyiv: „LAT&K”.
6. Kutlakhmedov, Yu.O., Korogodin, VI, Koltover, V.K. (2003) Osnovi radioekologii: navchalniy posibnik [Fundamentals of Radioecology: Textbook]. K.: Vischa shkola.
7. Kutlakhmedov, Ju.O., Voitsitskiy, V.M., Khyzhnyak, S.V. (2011) Radiobiologhija [Radiobiology]. Kyiv: VPC Kyiv University.
8. Kutlakhmedov, Yu.A., Matveeva, I.V., Petrusenko, V.P., Rodina, V.V. (2013) Radioekologiya. Kamerni modeli [Radioecology. Box- models]. Kyiv: NAU.
9. Khyzhnyak, S. V., Voitsitskiy, V. M., Danchuk V. V., Midyk S. V., Laposha O. A., Ushkalov V. O. (2018) Shlyahi migratsiyi stiykih pestitsidiv trofichnimi lantsyugami nazemnih i vodnih ekosistem [Pathways of migration persistent pesticides through chains of terrestrial and aquatic ecosystems]. Bioresources and nature use, 10 (1–2), 36–43.
10. Kutlakhmedov, Ju.O., Matveeva I.V., Groza V.A. (2018) Nadezhnost biologicheskix sistem: uchebnoe posobie [Reliability of biological systems: a manual]. Kyiv: Ukrainian Phytosociological Center.

## SUMMARY

*Voitsitskiy V. M., Khyzhnyak S. V., Danchuk V. V., Midyk S. V., Kepple O. Yu., Ushkalov V. O. The intake and migration heavy metals of terrestrial and aquatic ecosystems. Biological Resources and Nature Managment. 2019. 11, №1–2. – P.59–68. <https://doi.org/10.31548/bio2019.01.007>*

*In this study we present various interpretations of “heavy metals” definition and indicate the main sources of heavy metals. The article summarizes results the study of possible heavy metals migration paths by terrestrial and aquatic ecosystems including trophic chains. The chamber model method has been offered for heavy metals migration efficiency estimation in ecosystem chains.*

**Keywords:** heavy metals, sources, migration, ecosystem chains, method of chamber models

## АННОТАЦІЯ

*Войціцький В. М., Хижняк С. В., Данчук В. В., Мидик С. В., Кеппл О. Ю., Ушкалов В. А. Поступление и миграция тяжелых металлов наземными и водными экосистемами // Биоресурсы и природопользование. 2019. 11, №1–2. P.59–68. <https://doi.org/10.31548/bio2019.01.007>*

*Наведені різносторонні трактування относительно определения понятия «тяжелые металлы» и указаны основные их источники. Обобщены результаты исследований возможных путей миграции тяжелых металлов наземными и водными экосистемами, в том числе трофическими цепями. Для оценки миграционной способности тяжелых металлов цепями экосистем предложено использовать метод камерных моделей.*

**Ключевые слова:** тяжелые металлы, источники, миграция, цепи экосистем, метод камерных моделей

*Отримано 26.12.2018 р.*