

ШЛЯХИ МІГРАЦІЇ НАНОЧАСТИНОК НАЗЕМНИМИ І ВОДНИМИ ЕКОСИСТЕМАМИ

Войціцький В.М.¹, Корнієнко В.І.¹, Хижняк С.В.¹, Мідик С.В.¹,
Березовський О.В.¹, Таран Т.В.¹, Полтавченко Т.В.²

¹Національний університет біоресурсів і природокористування України
вул. Героїв Оборони, 15, 03041, м. Київ

²Національний університет водного господарства та природокористування
вул. Соборна, 11, 33028, м. Рівне
khs2014@ukr.net

У статті надана загальна характеристика наночастинок, поділ на природні та штучні джерела, застосування у різних галузях промисловості, сільському господарстві, медицині. Наночастинкам притаманні комплекси фізичних, хімічних властивостей і біологічна дія, які дозволяють віднести їх до нових видів матеріалів та продукції. Значна кількість наночастинок, які забруднюють довкілля, створені штучно.

Наночастинки в залежності від кількості, розмірів, форми, складу, властивостей, механізмів дії проявляють токсичний вплив на живі організми, уражуючи практично всі органи і системи. Крім структурно-функціональних особливостей цих частинок, на міграцію наночастинок через наземні та водні екосистеми впливають комплексні абіотичні та біотичні чинники. Накопичення наночастинок організми рослин і тварин спричиняє негативний вплив на їх життєздатність, призводить до забруднення продуктів харчування для людей і кормів для сільськогосподарських тварин. З огляду на необхідність зниження навантаження наночастинками об'єктів довкілля (повітря, ґрунту, води, біоти) та їх вмісту в питній воді, харчових продуктах для людей і в кормах для свійських тварин, актуальним є прогнозування міграції цих речовин екосистемами. Основна увага приділена визначенню шляхів міграції наночастинок в наземних і прісноводних екосистемах, можливості їх потрапляння до організму людини.

На основі аналітичних досліджень запропонована схема основних шляхів міграції наночастинок наземними і прісноводними екосистемами. Для кількісного прогнозування процесів міграції цих екоотоксикантів рекомендовано метод камерних моделей. Встановлення шляхів міграції наночастинок в об'єктах довкілля (атмосферному повітрі, ґрунті та воді) лежить в основі розробки науково-обґрунтованих заходів попередження та мінімізації їх негативного впливу на довкілля і здоров'я людей. *Ключові слова:* наночастинки, екосистеми, міграція.

Ways of migration of nanoparticles by terrestrial and aquatic ecosystems. Voitsitskiy V., Korniyenko V., Khyzhnyak S., Midyk S., Berezovskiy O., Taran T., Poltavchenko T.

The article provides a general description of nanoparticles, their division into natural and artificial sources, and their use in various industries, agriculture, and medicine. Complexes of physical, chemical properties and biological action are characteristic of nanoparticles, which make it possible to attribute them to new types of materials and products. A significant number of nanoparticles that pollute the environment are created artificially (anthropogenically).

Depending on the number, size, shape, composition, properties, mechanisms of action, nanoparticles have a toxic effect on living organisms, affecting almost all organs and systems. In addition to the structural and functional features of these particles, complex abiotic and biotic factors affect the migration of nanoparticles through terrestrial and aquatic ecosystems. The accumulation of nanoparticles in the organisms of plants and animals negatively affects their viability, leads to the contamination of food products for humans and fodder for farm animals. Given the need to reduce the nanoparticle burden of environmental objects (air, soil, water, biota) and their content in drinking water, food products for humans, and feed for domestic animals, forecasting the migration of these substances through terrestrial ecosystems is relevant. The main attention is paid to determining the migration paths of nanoparticles in terrestrial and freshwater ecosystems, the possibility of their entry into the human body.

On the basis of analytical studies, a scheme of the main pathways of nanoparticle migration through terrestrial and freshwater ecosystems is proposed. For quantitative forecasting of migration processes of these ecotoxicants, the method of chamber models is recommended. Establishing the migration paths of nanoparticles in environmental objects (atmospheric air, soil, and water) is the basis for the development of science-based measures to prevent and minimize their negative impact on the environment and human health. *Key words:* nanoparticles, ecosystems, migration.

Постановка проблеми. Наночастинки широко використовуються у найрізноманітніших галузях [1–4]. У хімічній промисловості, сільському господарстві (як каталізатори для ремедіації забрудненого довкілля); у харчовій промисловості для забезпечення кращих властивостей харчових продуктів; у косметичних засобах; як сенсори для виявлення токсикантів і патогенів в об'єктах довкілля,

харчових продуктах і питній воді. Без них уже неможливо уявити сучасну медицину та ветеринарію (лікарські та діагностичні засоби, зв'язування і виведення з організму різноманітних токсичних речовин тощо) [5].

У дослідженнях з використанням експериментальних тварин та культур тканин, а також за клінічними спостереженнями пацієнтів, які зазнали

впливу наночастинок (наприклад, при їх наявності у повітрі робочих приміщень), встановлено, що як і інші токсиканти, вони проявляють токсичну дію в залежності від дози, хімічної будови, механізму біологічної дії, шляху потрапляння до організму, терміну дії, біологічної особливості організмів тощо [1, 4]. Наночастинок здатні уражати всі органи та їх системи, впливати на метаболізм клітин, викликати оксидативний стрес, спричинювати запалення, викликати ушкодження ДНК, генні та хромосомні мутації, проявляти канцерогенну, тератогенну, ембріотоксичну дію та призводити до інших патологій [6–8].

Відносно висока токсичність наночастинок обумовлена:

1) великою концентрацією у довкіллі при відносно незначній кількості речовини, наприклад, при розпилюванні у повітрі наночастинок розміром 20 нм і концентрації речовини 100 мкг/м³ у повітрі міститься більше ніж 10⁻⁶ частинок/см³;

2) здатністю до трансдермального, транснейронального та ентерального проникнення у будь-які тканини і органи людини;

3) високою лабільністю та біодоступністю: наночастинок розміром менше 40 нм здатні проникати в ядро клітини, до 70 нм – проникати через капіляри кровоносної системи.

Поряд з дослідженнями токсичної дії наночастинок існує необхідність визначення основних шляхів міграції наночастинок у довкіллі з метою захисту біоти та здоров'я людей.

Актуальність дослідження. Остаточо не сформовані уявлення щодо шляхів міграції наночастинок у довкіллі через особливості їх розмірів і властивостей, зокрема, що пов'язані з мобільністю, біотрансформації, здатністю до адсорбції об'єктами довкілля тощо. Дослідження шляхів міграції лежить в основі розробки методів та засобів зменшення чи запобігання потрапляння наночастинок у довкілля.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Забруднення наночастинок об'єктів довкілля (повітря, ґрунту, води, біоти), харчових продуктів для людей і кормів для тварин спричинює загрозу всій біоті, у тому числі здоров'ю людей. Для зменшення або навіть попередження такого забруднення необхідно визначити шляхи міграції наночастинок у довкіллі, що й висвітлено в даній статті на основі аналізу наукової літератури та особистих доробок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Публікації стосовно нанотехнологій і наноматеріалів наночастинок стосуються, в основному, їх використанню в різних галузях промисловості та сільському господарстві [2, 3, 9], у медичній практиці для профілактики, діагностики та лікування різних захворювань [5, 10]. Питанню токсичності наночастинок присвячена велика кількість наукових публікацій [5–8, 11].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Наночастинок широко використовуються у найрізноманітніших галузях промисловості, сільському господарстві, медицині [9]. При цьому, відсутня однозначна відповідь з приводу небезпеки наночастинок, оскільки немає повного розуміння як їх фізико-хімічних властивостей, так і механізмів надходження до об'єктів довкілля, процесів біотрансформації та транслокації в органах і тканинах. Практично відсутні відомості стосовно шляхів міграції наночастинок в ланцюгах та ланках екосистем, накопичення у питній воді, продуктах харчування та кормах.

Новизна. З метою прогнозування шляхів міграції наночастинок, на основі узагальненого аналізу даних наукової літератури, створена схема щодо основних шляхів міграції наночастинок у довкіллі (наземними і водними екосистемами) та запропоновано математичний спосіб опису міграційних процесів цих речовин в екосистемах.

Методологічне або загальнонаукове значення. Широке застосування наночастинок у різних сферах діяльності людини зумовлює потребу вивчення їх токсичності, а також міграції у довкіллі та шляхів потрапляння до біоти, в тому числі до організму людини. Таким чином, питання дослідження міграції наночастинок, зокрема, наземними і водними екосистемами є актуальним і має загальнонаукове значення.

Викладення основного матеріалу. Наночастинок за походженням поділяють на природні та штучні. Природними джерелами наночастинок є лісові пожежі (утворення порошкоподібного залишку від неповного згоряння та термічного розкладання вуглеводнів в неконтрольованих умовах з утворенням частинок різного розміру), виверження вулканів (утворення у викинутих газах наночастинок); вітрове та водне диспергування, наприклад, рідин, які не змішуються, зокрема, води і розливи нафти з утворенням наноемульсій і наноплівки тощо.

Існують також біогенні (пов'язані з живими організмами) джерела наночастинок. Це, зокрема, вірус-опосередкований синтез наночастинок: вірусом тютюнової мозаїки; синтез деякими водоростями і бактеріями металомісних наночастинок тощо [12].

Штучно створені наночастинок використовуються у нанотехнологіях для покращення властивостей матеріалів та продукції, що, у свою чергу, призводить до штучного (антропогенного) забруднення довкілля. Це, насамперед, недоочищені викиди і скиди підприємств з виробництва наноматеріалів, особливо за аварійних ситуацій; внаслідок недосконалості технологій знешкодження, захоронення та утилізації побутового і промислового сміття; транспортні викиди тощо. Надзвичайну небезпеку становлять військові дії з використанням сучасних вибу-

хових матеріалів, що спричиняють пожежі тощо. Наночастинки, які утворюються поряд з іншими токсичними речовинами, за рахунок синергічної взаємодії посилюють токсичні властивості цих речовин.

Наночастинки виступають як екотоксиканти, що забруднюють довкілля і шкідливо впливають на його об'єкти – повітря, ґрунт, воду, в тому числі живі організми, що мешкають у цих об'єктах довкілля. Форма, розміри, фізико-хімічні властивості, а також стан об'єктів довкілля та вплив абіотичних чинників (температура, вологість повітря і ґрунту, сила вітру та ін.) визначають міграційні процеси наночастинок. Однак, залишається відкритим питання щодо модифікації наноматеріалів у довкіллі, у тому числі біомодифікації (тобто зміні їх властивостей під впливом живих організмів) і відповідно вплив модифікованих наночастинок на біоту. Також дуже мало відомостей щодо міграції наночастинок у довкіллі.

Наночастинки, що потрапили в атмосферу з джерел утворення переміщуються з потоками повітря. Під час руху повітряних мас ці екотоксиканти залежно від умов погоди, висоти викиду, турбулентного переміщення потоків, гравітації тощо поступово розсіюються і випадають з атмосфери на поверхню землі та концентруються в об'єктах довкілля. Особливістю вітрового переносу наночастинок є те, що вони здатні переноситися на великі відстані внаслідок дуже малої маси.

Міграційна здатність наночастинок у ґрунті та їх включення у трофічні ланцюги визначаються як властивостями самих цих екотоксикантів, так і ґрунту та різними чинниками довкілля. Основне – здатність до утворення агрегатів, що приводить до зменшення рухливості у ґрунті, або ж, навпаки, посилення біологічної доступності для рослин завдяки кращій розчинності у ґрунтовому розчині.

Екотоксиканти надходять до рослин двома основними шляхами: через наземні органи (позакореневе надходження) і через кореневу систему з ґрунту (кореневе надходження). Наночастинки через їх здатність до абсорбції мають відносно велику спроможність закріплюватися на надземних органах рослин і не здуватися вітром або змиватися дощем.

Наночастинки можуть включатися у транспортні системи рослин, мігрувати і накопичуватися. Кореневе надходження наночастинок до рослин визначається, насамперед, міцністю їх зв'язку з частинками ґрунту, а також здатністю поглинатися корінням рослин. Спроможність коренів рослин поглинати речовини залежить як від властивостей самих речовин, так і специфіки рослин, розвитку їх кореневої системи, фізіологічного стану рослин, фізико-хімічних властивостей ґрунту, наявності в ньому речовин і організмів, які здатні впливати на сорбційну здатність коренів.

Для водних екосистем особливо важливим є визначення шляхів міграції наночастинок у прісноводних екосистемах, які є джерелами питної і полив-

ної води. У той же час у морських екосистемах речовини, що потрапили до них, піддаються розведенню значними об'ємами морської води, що суттєво зменшує кількість їх потрапляння в організми морської біоти. У непроточних водоймах донні відкладення наночастинок концентруються у верхньому шарі цих відкладень.

З харчовими продуктами рослинного і тваринного походження, питною водою, а також з вдихуваним повітрям та контактним шляхом (через шкіру та слизові оболонки рота, носа, очей) наночастинки потрапляють до організму людини.

Узагальнена схема міграції наночастинок у довкіллі наведена на рис. 1.

Для кількісного прогнозування процесу міграції екотоксикантів в екосистемах з врахуванням його складності застосовуються математичні моделі. Зокрема, камерні моделі були запропоновані для оцінки міграції в об'єктах довкілля радіоізотопів [13], важких металів [14] та екотоксикантів у агроекосистемах [15].

Цей метод [13] використовується для опису міграції речовин по ланцюгах екосистеми, які поділяють на камери, а перехід між камерами обумовлюється коефіцієнтами переходу.

$$K_{п} = C_1/C_2,$$

де $K_{п}$ – коефіцієнт переходу; C_1 – питомий вміст (концентрація) речовини в попередній камері (для першої – в об'єкті довкілля); C_2 – питомий вміст (концентрація) речовини в наступній камері.

У методі динамічних камерних моделей (камери взаємодіють між собою і обмінюються речовиною) вважається, що перенесення речовин з однієї камери до іншої відбувається за законами кінетики першого порядку і описується системою диференціальних рівнянь.

Так, при потраплянні наночастинок з об'єкту довкілля (атмосфери, ґрунту, води) на початку його міграції у першу камеру диференціальне рівняння має вигляд:

$$\frac{dC_0}{dt} = K_{п0-1} \cdot C_0,$$

де C_0 – концентрація речовини у джерелі (об'єкті довкілля) на початку його міграції; $K_{п0-1}$ – коефіцієнт переходу від джерела до камери 1.

Для камерної моделі з трьох камер, що характеризує трофічний ланцюг ґрунт – рослина – тварина, диференціальні рівняння наступні:

$$\frac{dC_1}{dt} = K_{п2-3} \cdot C_2 - K_{п1-2} \cdot C_1;$$

$$\frac{dC_2}{dt} = K_{п2-1} \cdot C_1 - K_{п2-3} \cdot C_2 + K_{п3-2} \cdot C_2;$$

$$\frac{dC_3}{dt} = K_{п2-3} \cdot C_2 - K_{п3-2} \cdot C_3;$$

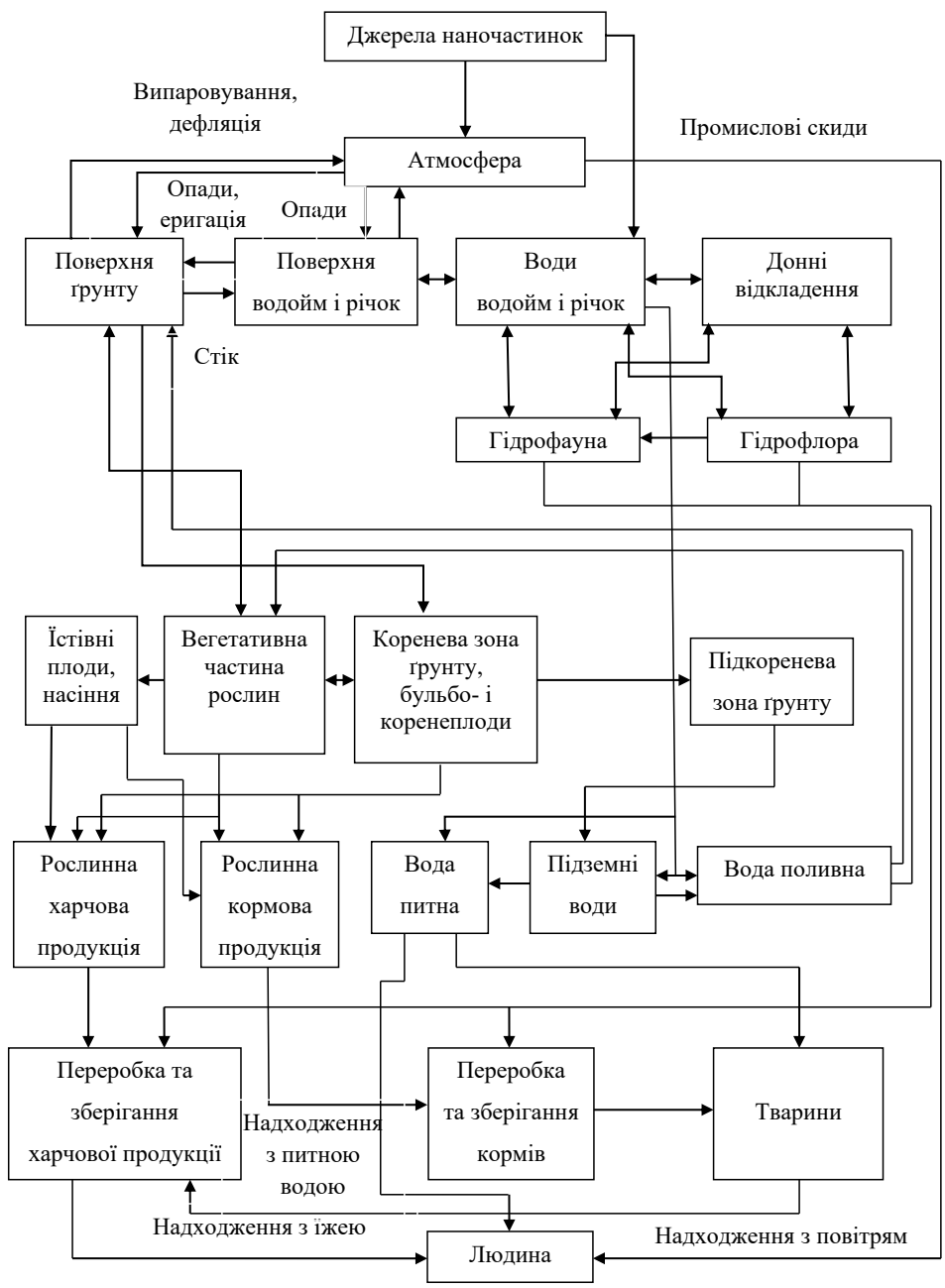


Рис. 1. Основні шляхи міграції наночастинок наземними і прісноводними екосистемами

де $d(dC_0, dC_1, dC_2, dC_3)$ – символ диференціювання; t – час; 1,2,3 – номер модельної камери; C_1, C_2, C_3 – концентрація наночастинок у відповідних камерах; $K_{П1-2}$ і $K_{П3-2}$ – прямі коефіцієнти переходу наночастинок між камерами; $K_{П2-1}$ і $K_{П3-2}$ – зворотні коефіцієнти переходу наночастинок між камерами.

Тобто, за відомих значень коефіцієнтів переходу (K_n) і концентрації досліджуваної речовини в попередній камері при рішенні системи простих диференціальних рівнянь розраховується можлива концентрація цієї речовини у наступних камерах.

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

ційних процесів речовин в екосистемах різної складності. Він може бути використаний, в тому числі, і для оцінки міграції наночастинок у екосистемах.

Головні висновки та перспективи використання результатів дослідження. Встановлення шляхів міграції екотоксикантів в об'єктах довкілля (атмосферному повітрі, ґрунті та воді) лежить в основі розробки науково-обґрунтованих заходів попередження та мінімізації їх негативного впливу на довкілля і здоров'я людей. Це в повній мірі відноситься і до наночастинок для яких залишається ще певна невизначеність враховуючи їх форму, розміри (до 100 нм), фізико-хімічні властивості, мобільність,

модифікацію у довкіллі. Відмічені особливості міграції наночастинок трофічними ланцюгами та їх ланками будуть уточнюватися на основі подальших досліджень, що дозволить у певній мірі керувати заходами зменшення негативного впливу цих речовин на об'єкти наземної та водної екосистем.

Література

1. Леоненко Н.С., Демецька О.В., Леоненко О.Б. Особливості фізико-хімічних властивостей та токсичної дії наноматеріалів – до проблем оцінки їхнього впливу на живі організми (огляд літератури). *Сучасні проблеми токсикології, харчової та хімічної безпеки*. 2016. № 1. С. 64–76.
2. Чекман І.С. Наночастинки: властивості та перспективи застосування. *Український біохімічний журнал*. 2009. Т. 89. № 1. С. 122–129.
3. Нанотехнології в сучасному сільському господарстві / О.В. Ситар, Н.В. Новицька, Н.Ю. Таран та ін. *Фізика живого*. 2010. № 8. С. 113–116.
4. Трахтенберг І.М., Дмитруха Н.М. Наночастинки металів, методи отримання, сфери застосування, фізико-хімічні та токсикологічні властивості. *Український журнал з проблем медицини праці*. 2013. № 3. С. 5–14.
5. Розенфельд Л.Г., Москаленко В.Ф., Чекалін І.С. Нанотехнології, наномедицина: перспективи наукових досліджень та впровадження їх результатів в медичну практику. *Український медичний часопис*. 2008. Т. 67. № 5. С. 63–68.
6. Ferrari M. Cancer nanotechnology: opportunities and challenges. *Nat. Rev. Cancer*. 2005. Vol. 5 (3). P. 161–171.
7. Бандас І.А., Криницька І.Я., Куліцька М.І., Корда М.М. Наночастинки: важливість сьогодні, класифікація, використання в медицині, токсичність *Медична та клінічна хімія*. 2015. Т. 17. № 3. С. 123–129.
8. Jiang J., Oberdrster G., Elder A. Does nanoparticle activity depend upon size and crystal phase? *Nanotoxicology*. 2008. Vol. 2(1). P. 33–42.
9. Волков С.В., Ковальчук Є.П., Огієнко В.М. Нанохімія наносистеми наноматеріали. К.: Думка, 2008. 422 с.
10. Розенфельд Л.Г., Чекман І.С., Тертишна А.І. Нанотехнології в медицині, фармації та фармакології. *Фармакологія та лікарська токсикологія*. 2008. № 1–3. С. 3–7.
11. Чекман І.С., Говоруха М.О., Дорошенко А.М. Наногенотоксикологія: вплив наночастинок на клітину. *Український медичний часопис*. 2011. № 1 (81). С. 30–35.
12. Цехмістренко С.І., Бітюцький В.С., Цехмістренко О.С. Екологічні біотехнології «зеленого» синтезу наночастинок металів, оксидів металів, металоїдів та їх використання: наукова монографія / за ред. С.І. Цехмістренка. Біла Церква: СПДФО Пшонківський О.В., 2022. 270 с.
13. Кутлахмедов Ю.О., Матвеева І.В., Петрусенко В.П., Родіна В.В. Радіоекологія. Камерні моделі. К.: Книжкове видавництво НАУ, 2013. 84 с.
14. Войціцький В.М., Хижняк С.В., Данчук В.В., Мідик С.В., Кеппл О.Ю., Ушкалов В.О. Надходження і міграція важких металів наземними і водними екосистемами. *Біоресурси і природокористування*. 2019. Т. 11, № 1–2. С. 23–31. <http://dx.doi.org/10.31548/bio2019.01.007>
15. Войціцький В.М., Хижняк С.В., Данчук В.В., Мідик С.В., Ушкалов В.О. Моделювання міграції екотоксикантів у компонентах агроекосистем. *Агроекологічний журнал*. 2019. № 1. С. 36–41. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2019.163246>