



УДК 504.5: 502.3.7

ШЛЯХИ МІГРАЦІЇ СТІЙКИХ ПЕСТИЦИДІВ ТРОФІЧНИМИ ЛАНЦЮГАМИ НАЗЕМНИХ І ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ

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

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

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

О. А. ЛАПОША, кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник

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

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: khs2014@ukr.net

Проблема впливу пестицидів на природні екосистеми та здоров'я людей особливої актуальності набула внаслідок зростання обсягів їх застосування у сільському господарстві. Стаття присвячена дослідженню процесу міграції стійких до розпаду пестицидів трофічними ланцюгами наземних та водних екосистем. Відмічено основні чинники, які впливають на переміщення стійких забруднювачів у довкіллі. Для наземних екосистем акцентується увага на ролі позакореневого і кореневого накопичення пестицидів рослинами. Для прісноводних водоймищ характерна акумуляція основної кількості пестицидів в донних відкладеннях. Запропонована схема основних шляхів міграції стійких до розпаду пестицидів трофічними ланцюгами наземних і водних екосистем та взаємозв'язків між ними. Розглянуто існуючі математичні моделі для опису міграції пестицидів в агроценозах. Акцентується увага на можливість застосування для міграційного процесу методу камерних моделей на прикладі чотирьох камерної моделі: ґрунт–рослина–тварина–людина, який базується на визначенні коефіцієнту переходу між окремими камерами. Представлений підхід, опираючись на результати експериментальних (лабораторних та польових) досліджень, можливий для оцінки екологічної небезпеки пестицидів.

Ключові слова: пестициди, міграція, трофічні ланцюги, екосистеми

Актуальність. Потенційні ризики використання пестицидів зумовлені їх різнобічним негативним впливом на біосферу, що становить загрозу як для навколишнього середовища, так і для людини зокрема. Головним джерелом розповсюдження пестицидів є агроценози. Крім того, загрозу довкіллю становлять заскла-

довані заборонені, а також ті, що втратили термін придатності агрохімікати та пестициди, які не утилізовані та зберігаються з порушенням правил.

Таким чином, особливої актуальності набула проблема дослідження наслідків впливу стійких до розпаду пестицидів на природні екосистеми та здоров'я людей



внаслідок їх застосування у сільському господарстві.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У разі потрапляння до ґрунту пестициди забруднюють його токсичними сполуками, пригнічують біологічну активність, породжують небезпеку для популяційного складу біоценозів, сприяють появі мутацій, що порушує генетичну чистоту високопродуктивних сортів та погіршує якість сільськогосподарської продукції, з'являється небезпека інтоксикації тварин і людини [1].

Можливі різні шляхи міграції пестицидів, яка починається з диспергування препаратів у повітрі у разі обробці посівів, осадженні на поверхні ґрунту та рослин. Переміщення пестицидів залежить від розподілення за ґрунтовим профілем. Так, знаходячись у поверхневому шарі ґрунту, пестициди більш активно мігрують у повітря, а з поверхневими стоками вони потрапляють у водойми, де, накопичуючись у глибинних горизонтах, забруднюють ґрунтові та підземні води, а також транспортуються через кореневу систему в рослини. Таким чином, ґрунт є середовищем загального накопичення і початковою точкою переміщення пестицидів. Крім того, забруднення водойм чи рослин може відбуватися внаслідок безпосереднього впливу на них токсичних речовин, а також переносу їх повітряними потоками за межі територій, що обробляються [2, 3].

Стійкість пестицидів та їх метаболітів у довкіллі визначає можливість їх негативного впливу на рослини, тварини, людей у разі проникнення до організму із продуктами харчування, водою і повітрям.

Як правило, оцінюють міграцію тих пестицидів, які за класифікацією дуже стійкі (час розпаду більше 2 років), стійкі (в межах 0,5–2 роки), помірно стійкі (1–6 місяців). Для малостійких (час розпаду протягом 1 місяця та менше) не має потреби оцінювати їх міграційну здат-

ність. Зокрема висока стійкість хлорорганічних пестицидів до розпаду є важливою передумовою їхньої міграції у ґрунті, а також у суміжні середовища (рослини, повітря, воду), що становить небезпеку для природних біоценозів і, відповідно, здоров'ю людини.

Вивчення шляхів міграції та токсичного впливу пестицидів для живих організмів біоценозу важливо, зокрема, під час організації необхідних заходів щодо охорони довкілля.

Мета дослідження – розглянути можливі шляхи міграції стійких до розпаду пестицидів трофічними ланцюгами наземних та водних екосистем для обґрунтування поточних та довгострокових моделей прогнозованого їх переміщення, що може бути використано при розробці засобів оцінки екологічної небезпеки пестицидів.

Матеріали та методи дослідження. Важливим комплексним показником, який можна використати для характеристики впливу токсиканта на об'єкт, є коефіцієнт його накопичення (K_n або KH) [4]. Він становить собою співвідношення між умістом речовини в організмі (як правило, mg або mkg на $1 kg$ маси) до її концентрації у середовищі або субстраті (mg або mkg на $1 kg$ маси):

$$K_n = \frac{C_1}{C_2},$$

де K_n – коефіцієнт накопичення речовини; C_1 – для рослин – це кількість речовини в одиниці маси рослини, а для тварин – в одиниці маси тканин чи органів (наприклад, м'яса) або продукції тваринництва (наприклад, молока); C_2 – вміст цієї речовини для рослин у ґрунті, а для тварин – у кормах.

Іншим показником, що обумовлює накопичення токсиканта є коефіцієнт переходу (K_p або $KП$) [4]. Так, наприклад, для оцінки переходу речовини з



ґрунту до рослин, цей показник розраховують як відношення кількості речовини в одиниці маси рослин (як правило, *мг* або *мкг* на 1 *кг* маси) в одному квадратному метрі (*м*²) орного шару ґрунту, на якому вирощуються рослини (*мг* або *мкг* на 1 *м*²):

$$K_n = \frac{C_1}{C_2},$$

де K_n – коефіцієнт переходу речовини; C_1 – концентрація речовини в 1 *кг* рослин; C_2 – поверхнева концентрація речовини в 1 *м*² орного шару ґрунту.

Результати дослідження та їх обговорення. Важливе значення мають закономірності міграції токсичних речовин трофічними (харчовими) ланцюгами [5]. В угрупованні організмів (біоценозі) зазвичай буває декілька паралельних ланцюгів живлення, між якими можливий взаємозв'язок, що забезпечує цілісність та динамічність біоценозу.

Стосовно наземних екосистем, зокрема лучних екосистем і агроценозів, надходження речовин (пестицидів) у рослини відбувається внаслідок поверхневої адсорбції листям і стеблами, а також поглинання кореневою системою. Таким чином, існує два основних типи надходження речовин до рослин: позакореневий і кореневий.

Позакореневий шлях надходження під час зрошення рослин обумовлюється їх адсорбцією та накопиченням. 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, що залежить, насамперед, від властивостей повітряних потоків та поверхні ландшафту і ґрунту.

Кореневий шлях надходження речовин до рослин обумовлений фізико-хімічними властивостями речовин, ґрунту, видом рослин тощо.

Накопичення в рослинах речовин, у тому числі пестицидів, унаслідок надходження позакореневим і кореневим шляхами, можна описати формулою (у спрощеному вигляді за умов надходження однієї речовини) [4]:

$$C = aC_a + bC_b,$$

де C – концентрація речовини в рослині; a – коефіцієнт переходу речовини повітря – рослина; b – коефіцієнт переходу речовини ґрунт – рослина; C_a – концентрація речовини, що випадає на рослину протягом періоду вегетації; C_b – концентрація речовини в кореневій зоні ґрунту.

Подальше надходження пестицидів до організму людини відбувається внаслідок безпосередного споживання у їжу рослин або їх плодів, а також із продуктами тваринництва, які отримані від тварин, що харчувалися забрудненими рослинами.

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

У звичайних непроточних водоймищах з донними відкладаннями сапропелевого (складається, в основному, з органічних речовин – залишків водних організмів) типу токсиканти, які потрапили, концентруються, як правило, у верхньому шарі завтовшки 10 – 20 *см*. Висока поглинаюча здатність цього шару донних відкладань зумовлена великою кількістю органічних речовин, що містяться в ньому і перебувають у високодисперсному колоїдному стані. Саме завдяки цьому донні відкладання у водоймищі відіграють роль депо, у якому концентруються токсиканти, що потрапили до нього.



Концентраційна рівновага між водою і донними відкладаннями може зміщуватися в той чи інший бік. Одним із найважливіших чинників, що впливає на цей процес, є значення рН (водневого показника) води водоймища.

Під час розподілу пестицидів у водоймищах надзвичайно суттєву роль відіграє біота (гідрофауна і гідрофлора). Основну масу живих організмів у природних водоймищах становлять планктон (сукупність організмів, які мешкають у товщі води і пасивно переносяться водними течіями) і мікробентос (сукупність мікроорганізмів, які мешкають у ґрунті водоймищ). Речовини, які утримуються в детриті (зважені у воді органічні речовини, які складаються з частинок тіла тварин і обривків рослин), разом із ним переходить у донні відкладання. Частина водорозчинних токсикантів накопичується як рослинами, так і тваринами, інша частина надходить до цих організмів із донних відкладень.

Стан забруднення водоймища пестицидами за умов сталої рівноваги між водою і донними відкладаннями може описуватись наступною формулою (у спрощеному вигляді за умов надходження однієї речовини) [4]:

$$A = C \cdot S(H + k \cdot h),$$

де A – концентрація речовини у водоймищі; C – об'ємна концентрація речовини у воді; S – площа поверхні водоймища, що приблизно дорівнює площі його дна; H – глибина водоймища; k – коефіцієнт накопичення речовини верхнім шаром донних відкладень; h – товщина верхнього шару донних відкладень.

Принциповим для міграції пестицидів у річках є як їх кількість, що потрапили з повітря, поверхневих стоків, підземних вод тощо, так і фізико-хімічні властивості пестицидів і води. Також важливим чинником є швидкість течії води, рельєф дна, можливість утворення донних відкладень

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

До морів та океанів пестициди потрапляють з повітря та, в основному, з водою річок. Пестициди, що потрапили до морських (океанічних) екосистем повітряним шляхом відносно рівномірно розподіляються серед їх основних компонентів – води і морської біоти (рослини, тварини і мікроорганізми). Ті з них, які потрапили до моря зі стоками річок, зосереджуються, насамперед, в місцях їх стоку. Водні рослини накопичують пестициди з ґрунту та води, а для водних тварин найбільша здатність накопичення притаманна фільтрувальним організмам (зоопланктону, губкам, кишковопорожнинним, червам, молоскам та ін.), які здатні до накопичення як в розчинній, так і нерозчинній (суспензії) формі. У відкритому океані біота незначно впливає на перерозподіл пестицидів. До організму людини пестициди, які містяться в морських (океанічних) екосистемах, потрапляють з морепродуктами (водорості, морські ссавці, риба, молюски, ракоподібні та ін.).

Узагальнююча схема основних шляхів міграції пестицидів трофічними ланцюгами в наземних і водних екосистемах представлена на рис. 1.

Міграція пестицидів трофічними ланцюгами – це доволі складний процес, який залежить від багатьох чинників. Це, зокрема, фізико-хімічні властивості самих речовин та ґрунту, води, повітря тощо, дія абіотичних (температура, вологість тощо) і біотичних (ґрунтові і водні мікроорганізми та інші організми, які здатні накопичувати чи трансформувати пестициди) чинників, шляхи надходження речовин до організму, включення до метаболізму та багато іншого [6]. Трофічні ланцюги

можуть бути короткими (наприклад, рослина–людина) і довгими (наприклад, ґрунт–рослина–людина; вода–рослина–тварина–людина). Чим довший трофічний ланцюг, тим менше токсичних речовин надійде до організму людини.

Враховуючи складність процесу міграції токсичних речовин, для прогнозування цього процесу застосовують математичні моделі, як емпіричні (статистичні), так і імітаційні. На сьогоднішній день такі моделі як LEACHP, PESTLA, MACRO, CALF,

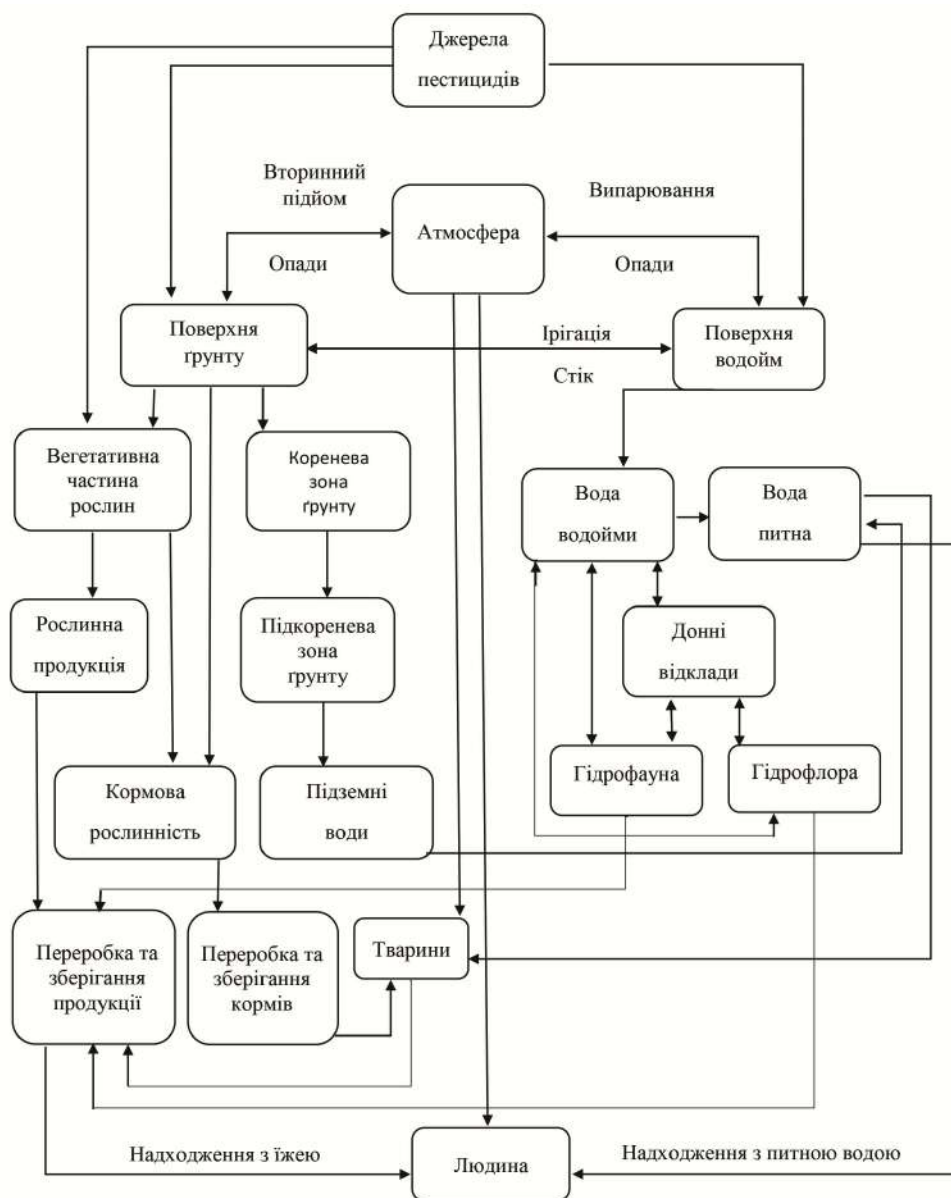


Рис. 1. Основні шляхи міграції пестицидів трофічними ланцюгами

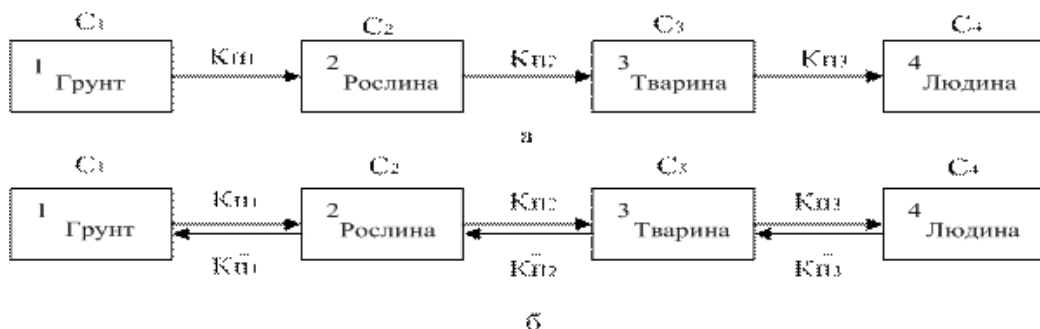


Рис. 2. Найпростіші стаціонарна (а) і динамічна (б) камерні моделі трофічного ланцюга ґрунт – рослина – тварина – людина: 1, 2, 3, 4 – номер модельної камери; C_1, C_2, C_3, C_4 – концентрація речовини у відповідних камерах; $K_{п1}, K_{п2}, K_{п3}$ – прямі коефіцієнти переходу речовини між камерами; $K_{п1}^{-1}, K_{п2}^{-1}, K_{п3}^{-1}$ – зворотні коефіцієнти переходу речовини між камерами.

GLEAMS, CMLS, PRZM, PLEMO використовуються для прогнозування поведінки пестицидів в агробіоценозах [7].

Зручною моделлю для оцінки міграції пестицидів в екосистемі може бути метод камерних моделей, який показав свою високу ефективність у радіоекології [4, 8]. Цей метод використовується для опису міграції речовин по трофічних ланцюгах, які поділяють на камери, а перехід між камерами обумовлюється коефіцієнтами переходу. За способом взаємодії між камерами моделі поділяють на стаціонарні та динамічні.

Для стаціонарних камерних моделей приймається, що концентрація речовини в кожній камері рівномірна, а між ними існує стала статистична рівновага. На рисунку 2а наведено стаціонарну камерну модель із чотирьох камер, що характеризує трофічний ланцюг: ґрунт–рослина–тварина–людина. Концентрація токсичної речовини в кожній камері (C_1, C_2, C_3, C_4), а перехід речовини між камерами описується коефіцієнтом переходу ($K_{п1}$), відповідно $K_{п1}, K_{п2}, K_{п3}$.

При використанні стаціонарної камерної моделі концентрація речовини в 1-й камері (C_1) відома, а в інших камерах її концентрацію вираховують наступним чином:

$$\begin{aligned} C_2 &= K_{п1} \cdot C_1; \\ C_3 &= K_{п2} \cdot C_2 = K_{п1} \cdot K_{п2} \cdot C_1; \\ C_4 &= K_{п3} \cdot C_3 = K_{п1} \cdot K_{п2} \cdot K_{п3} \cdot C_1. \end{aligned}$$

Динамічна камерна модель (рис. 2б) ґрунтується на основних твердженнях: 1) трофічний ланцюг поділяють на камери, в яких речовина миттєво перемішуються в усіх частинах камери однаково в будь-якому напрямку; 2) перенесення речовини з однієї камери до іншої відбувається за законами кінетики першого порядку, що описується системою диференціальних рівнянь. При цьому коефіцієнти переходу речовини між камерами є сталими величинами. За цими постулатами система диференціальних рівнянь для накопичення речовини в 4-х камерах має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{dC_1}{dt} &= K_{п2} \cdot C_2 - K_{п1} \cdot C_1; \\ \frac{dC_2}{dt} &= K_{п1} \cdot C_1 - K_{п2} \cdot C_2 - K_{п2} \cdot C_2 + K_{п3} \cdot C_3; \\ \frac{dC_3}{dt} &= K_{п2} \cdot C_2 + K_{п4} \cdot C_4 - K_{п3} \cdot C_3 - K_{п3} \cdot C_3; \\ \frac{dC_4}{dt} &= K_{п3} \cdot C_3 - K_{п4} \cdot C_4, \end{aligned}$$

де $d(C_1, C_2, C_3, C_4 \text{ і } dt)$ – символ диференціювання;

C_1, C_2, C_3 і C_4 – концентрація речовин у відповідних камерах;

Практично для будь-якої складної системи трофічних ланцюгів може бути розв'язана система диференціальних рівнянь (за використання програм, наприклад, MAPLE 6) та отримані значення C_1, C_2, C_3 і C_4 в динаміці для будь-яких значень коефіцієнтів переходу (K_n) при надходженні речовини до 1-ї камери. За наявності постійного джерела забруднення, якщо відбувається постійне надходження речовини до 1-ї камери (грунт), до наведеної системи диференціальних рівнянь додається наступна:

$$\frac{dC_o}{dt} = K_{Po} C_o,$$

де C_o – концентрація речовини у джерелі на момент початку його міграції;

K_{Po} – коефіцієнт переходу речовини від джерела до 1-ї камери.

Таким чином метод камерних моделей є простим і адекватним математичним способом опису міграційних процесів в екосистемах різної складності. Він може бути використаний, в тому числі, і для оцінки міграційних процесів пестицидів в біоценозах.

Висновки. З огляду на необхідність забезпечення зниження екологічного навантаження на довкілля, проблема вивчення міграції пестицидів в екосистемах є надзвичайно актуальною. Для прогнозування міграції пестицидів в біоценозах широко використовують математичні моделі, зокрема запропоновано метод камерних моделей, який базується на визначенні коефіцієнтів переходу між камерами. Представлений підхід, опираючись на результати експериментальних (лабораторних та польових) досліджень, можливий для адекватної оцінки екологічної небезпеки пестицидів і розробки засобів зниження їх небезпечного екологічного навантаження.

Література

1. Екологічна біохімія / Ісаєнко В.М., Войціцький В.М., Хижняк С.В. Бабенюк Ю.Д., Лільн В.М., Олійник С.А. Київ: Книжкове видавництво НАУ, 2005. 440 с.
2. Патица В.П., Макаренко Н.А., Моклярчук Л.І. Агроекологічна оцінка мінеральних добрив та пестицидів: монографія. Київ: Основа, 2005. 300 с.
3. Наземцева Я.О., Лазненко Д.О. Моделювання міграції пестицидів у ґрунтах: Східно-Європейський журнал передових технологій. 2013, №4/10 (64). С. 12–15.
4. Кутлахмедов Ю.О., Войціцький В.М., Хижняк С.В. Радіобіологія: підручник. Київ: ВПЦ Київський університет, 2011. 543 с.
5. Мусієнко М.М., Серебряков В.В., Брайон О.В. Екологія. Охорона природи: словник-довідник. Київ: Знання, 2002. 550 с.
6. Кутлахмедов, Ю.А., Матвеев И.В., Гроза В.А. Надежность биологических систем: учебное пособие. Киев: Фитосоциоцентр, 2018. 352 с.
7. Wagenet R.J., Rao P.S. Modeling pesticide fate in soils. Pesticides in the Soil Environment: Processes, Impacts and Modeling USA: Soil Science Society of America, 1990. P. 351–399.
8. Радіоекологія. Камерні моделі / Кутлахмедов Ю.А., Матвеев И.В., Петрусенко В.П., Родина В.В. Київ: НАУ, 2013. 84 с.

References

1. Isaenko, V.M., Voitsitskiy, V.M., Babenyuk, Yu.D., Khyzhnyak, S.V., P'yn, V.M., Oliynik, S.A. (2005) Ekologichna biokhimiya [Ecological biochemistry]. Kyiv: Knyzhkove vydavnyctvo NAU.
2. Patyka, V.P., Makarenko, N.A., Moklyarchuk, L.I. (2005) Aghroekologichna ocinka mineralnykh dobrovy ta pestycydiv. [Agroecological assessment of mineral fertilizers and pesticides]. Monograph (eds. V.P. Patyka). Kiev: Osнова.



3. Nazemtzeva, Ja.O., Laznenko, D.O. (2013) Modeljuvannja mighraciji pestytsydiv u ghruntakh [Simulation of pesticide migration in soils] East European Magazine of Advanced Technology, 4/10 (64), 12-15.
4. Kutlakhmedov, Ju.O., Voitsitskiy, V.M., Khyzhnyak, S.V. (2011) Radiobiologhija [Radiobiology]. Kyiv: VPC « Kyiv University».
5. Musienko, M.M., Serebryakov V.V., Brayon O.V. Okhrona pryrody [Nature Conservancy: vocabulary]. Kyiv: «Znannya», KOO.
6. Kutlakhmedov, Ju.A., Matveev Y.V., Ghroza V.A. (2018) Nadezhnostj byologhycheskyj system [Reliability of biological systems]. Kyiv: Fytosocycentr.
7. Wagenet, R. J., Rao, P. S. C. (1990) Modeling pesticide fate in soils. Pesticides in the Soil Environment: Processes, Impacts and Modeling USA: Soil Science Society of America, 2, 351-399.
8. Kutlakhmedov, Yu.A., Matveev, I.V., Petrusenko, V.P., Rodina, V.V. (2013) Radioekologiya. Kamerni modeli [Radioecology. Box- models]. Kyiv: NAU.

SUMMARY

S. V. Khyzhnyak, V. M. Voitsitskiy, V. V. Danchuk, S. V. Midyk, O. A. Laposha, V. O. Ushkalov. Pathways of migration persistent pesticides through chains of terrestrial and aquatic ecosystems/ Biological Resources and Nature Management. – 2018. – 10, №1–2 – P.36–43.

The problem of the effect of pesticides on natural ecosystems and human health has become particularly relevant as a result of increasing the volume of their use in agriculture. The article is devoted to the research of the process of migration of terrestrial and aquatic ecosystems resistant to the disintegration of pesticides by trophic chains. The main factors influencing the movement of persistent pollutants in the environment are noted. For terrestrial ecosystems, attention is focused on the role of foliar and root accumulation of pesticides by plants. For freshwater reservoirs, accumulation of the main amount of pesticides in bottom sediments is characteristic. A scheme is proposed for the main migration routes of pesticide-resistant trophic chains of terrestrial and aquatic ecosystems and the interrelations between them. Existing mathematical models for describing the migration of pesticides in agrocenoses are considered. Emphasis is placed on the possibility of using the chamber model method for assessing the migration process using the example of the four chamber model: soil-plant-animal-man, based on determining the transition coefficient between individual chambers. The presented approach, based on the results of experimental (laboratory and field) studies, is possible for an assessment of the ecological hazard of pesticides.

Keywords: pesticides, migration, trophic chains, ecosystems

АННОТАЦІЯ

С. В. Хижняк, В. М. Войцицький, В. В. Данчук, С. В. Мидьк, Е. А. Лапоша, В. А. Ушкалов. Пути миграции устойчивых пестицидов трофическими цепями наземных и водных экосистем// Биоресурсы и природопользование. – 2018. – 10, №1–2 – С.36–43.

Проблема влияния пестицидов на природные экосистемы и здоровье людей особую актуальность приобрела в результате увеличения объема их применения в сельском хозяйстве. Статья посвящена исследованию процесса миграции устойчивых к распаду пестицидов трофическими цепями наземных и водных экосистем. Отмечены основные факторы влияния на перемещение стойких загрязнителей в окружающей среде. Для наземных экосистем акцентируется внимание на роли внекорневого и корневого накопления пестицидов растениями. Для пресноводных водоемов характерна аккумуляция основного количества пестицидов в донных отложениях. Предложена схема основных путей миграции устойчивых к распаду пестицидов трофическими цепями наземных и водных экосистем и взаимосвязей между ними. Рассмотрены существующие математические модели для описания миграции пестицидов в агроценозах. Акцентируется внимание на возможности применения для оценки миграционного процесса метода камерных моделей на примере четырехкамерной модели: почва–растение–животное–человек, основанного на определении коэффициента перехода между отдельными камерами. Представленный подход, опираясь на результаты экспериментальных (лабораторных и полевых) исследований, возможен для оценки экологической опасности пестицидов.

Ключевые слова: пестициды, миграция, трофические цепи, экосистемы