УДК 504.5:502.3/.7:546.95 doi: https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2019.163246

МОДЕЛЮВАННЯ МІГРАЦІЇ ЕКОТОКСИКАНТІВ У КОМПОНЕНТАХ АГРОЕКОСИСТЕМ

В.М. Войціцький, С.В. Хижняк, В.В. Данчук, С.В. Мідик, В.О. Ушкалов

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Розглянуто основні шляхи міграції екотоксикантів у агроекосистемах та запропоновано блок-схему для їх опису. Акцентується увага на шляхах позакореневого та кореневого накопичення екотоксикантів рослинами, а також надходження екотоксикантів до агроекосистем з поливною водою за зрошувального землеробства. Для опису міграційних шляхів екотоксикантів у агроекосистемі запропоновано метод камерних моделей. Міграція речовин між камерами визначається коефіцієнтами переходу. Наведений підхід, спираючись на результати експериментальних досліджень, є адекватним щодо оцінки екологічної небезпеки екотоксикантів для агроекосистем.

Ключові слова: *екотоксиканти, шляхи міграції, агроекосистема, камерні моделі.*

Фундаментальною властивістю екосистем є здатність накопичувати і утримувати речовини, які до них надходять. До того ж для речовин, що насамперед підтримують надійність і продуктивність екосистеми, порушення такої властивості означає, зокрема, деструкцію трофічних зв'язків між її ланцюгами, руйнування шляхів міграції елементів живлення і, зрештою, деградацію. У разі надходження до екосистеми екотоксикантів, які є полютантами для біоти (залежно від дози та тривалості впливу), їх дія може бути руйнівною — щонайгірше призвести до незворотної заміни початкової екосистеми на нову, більше пристосовану до змінених умов існування.

Серед чисельних аспектів екології на особливу увагу заслуговують відповідні проблеми сільського господарства, зумовлені взаємовідносинами сільськогосподарських рослин і тварин, а також мікроорганізмів і грибів (які використовуються в сільському господарстві) з довкіллям. Питання антропогенної діяльності, як-от: обробіток ґрунту, застосування хімічних засобів захисту рослин, надмірне внесення добрив, інтродукція нових видів рослин тощо також викликає стурбованість наукових кіл і потребує обґрунтованих підходів до їх вирішення. Важливим об'єктом агроекосистеми є агроценоз — біотичне угруповання, створене людиною з метою отримання сільськогосподарської продукції і регулярно підтримуване нею; має високу врожайність певних видів і сортів рослин, але незначну екологічну надійність (здатність забезпечувати енергопродуктивну функцію, самовідновлюватися і саморегулюватися за певний проміжок часу) [1, 2]. Дослідження екологічних проблем, зокрема щодо шляхів міграції екотоксикантів у агроекосистемах, є надзвичайно важливими для розуміння небезпеки як для біоти довкілля [3], так і людини. Це стосується, зокрема, використання засобів захисту рослин та стимуляторів росту рослин, добрив, а також промислових викидів та скидів токсичних хімічних речовин тощо.

Мета досліджень — розглянути можливі шляхи міграції екотоксикантів агроекосистемами та запропонувати уніфіковану модель їх переміщення, що може бути використано для розробки заходів із запобігання негативним екологічним наслідкам або їх мінімізації.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

В основу запропонованої моделі міграції речовин у агроекосистемах покладено розробки, які були застосовані під час вивчення шляхів міграції екосистемами радіонуклідів [4, 5] і стійких пестицидів [6]. Для оцінки міграції речовин в агро-

© В.М. Войціцький, С.В. Хижняк, В.В. Данчук, С.В. Мідик, В.О. Ушкалов, 2019

екосистемах, опираючись на основні положення камерної моделі, були використані такі показники: коефіцієнти затримування, накопичення і переходу екотоксикантів, ефективний час напіввтрат, питома кількість накопичення і виносу з урожаєм екотоксикантів, місткість агроценозу.

За потрапляння речовини до агроекосистем з атмосфери її частка, що осаджується на рослинах, вираховується за формулою:

$$К_з = C \cdot P/m,$$

де $К_з$ — коефіцієнт затримування речовини (частка затриманої речовини у біомасі рослин; C — вміст затриманої речовини у біомасі рослин, г/кг; P — урожай біомаси на одиницю площі, кг/км^2; m — маса речовини, що випала на одиницю площі, г/км^2.

Для прогнозування кількості речовини, яка може надійти до рослини з поверхні, необхідно знати час, упродовж якого видаляється речовина з листків і пагонів до моменту незворотної адсорбції. Для цього вирізняють дві фракції речовини: слабкофіксовану ($Т_1$) та міцнофіксовану ($Т_2$).

За цими показниками можна визначити ефективний проміжок часу напіввтрат речовини ($Т_{еф}$):

$$Т_{еф} = (Т_1 + Т_2)/2.$$

Рівні забруднення екотоксикантами рослин у агроекосистемах за різної поверхневої щільності випадінь можна розрахувати у такий спосіб:

Для разових випадінь:

$$C_t = m/P \cdot К_з \cdot \exp(-t/Т_{еф}),$$

де C_t — питома кількість речовини у рослині (г/кг) до моменту збирання врожаю — часу (t); m — щільність випадінь, г/км^2; P — урожай біомаси на одиницю площі, кг/км^2; $К_з$ — коефіцієнт затримання речовини; $Т_{еф}$ — ефективний проміжок часу напіввтрат речовини.

Для хронічних випадінь:

$$C_t = \int I/P \cdot K_з \cdot \exp(-t/Т_{еф})dt,$$

де I — інтенсивність хронічних випадінь.

Комплексним показником, що використовується для характеристики накопичення речовини у компонентах екосистеми, є коефіцієнт накопичення ($К_н$):

$$К_н = C_1/C_2,$$

де *для рослин*: C_1 — уміст речовини в одиниці маси рослин, мг (мкг)/кг повітряно-сухої маси рослин, C_2 — уміст речовини в повітрі, мг (мкг)/м^3 приземного шару, чи ґрунті, мг (мкг)/кг повітряно-сухої маси ґрунту (залежно від надходження до рослин); *для тварин*: C_1 — кількість речовини в одиниці маси тканин (наприклад, м'яса) або продукції (наприклад, молока), мг (мкг)/кг продукції; C_2 — уміст цієї речовини в повітрі, мг (мкг)/м^3 приземного шару, чи кормах, мг (мкг)/кг кормів.

Іншим показником щодо накопичення речовини, у т.ч. екотоксиканта, у компонентах екосистем, є коефіцієнт переходу з одного компонента до іншого ($К_П$):

$$К_П = C_1/C_3,$$

де *для рослин*: C_1 — уміст речовини в одиниці маси рослин, мг (мкг)/кг повітряно-сухої маси рослин; C_3 — уміст речовини (залежно від її місцезнаходження): у приземному шарі повітря, мг (мкг)/м^3; поверхневий уміст речовини в орному шарі ґрунту, мг (мкг)/м^2; уміст речовини у товщі орного шару ґрунту, (мг (мкг)/кг повітряно-сухої маси ґрунту.

Накопичення екосистемою екотоксикантів обумовлюється, насамперед, їх хімічною стійкістю в довкіллі та фізико-хімічними властивостями.

Загальна частка виходу речовини з урожаєм за перший вегетаційний період рослин, наприклад з ґрунту, розраховується за формулою:

$$A_В = К_{П_о} \cdot C_0 \cdot B_0/A_0,$$

де $A_В$ — частка виносу речовини за перший вегетаційний період (у розрахунку на 1 км^2); $К_{П_о}$ — коефіцієнт переходу речовини, наприклад, до рослини з ґрунту; C_0 — питома кількість речовини в ґрунті, мг (мкг)/кг ґрунту; B_0 — урожай біомаси з одиниці площі, кг/км^2; A_0 — кількість речовини, що первинно випала на територію (у розрахунку на 1 км^2).

З урахуванням ймовірності стоку речовини з орного шару поверхневими водами (коефіцієнт — a) і вітровим перенесенням (коефіцієнт — b) формула для розрахунку виносу речовини за перший вегетаційний період має вигляд:

$$A_{\text{В}} = \text{К}_{\text{П}_\text{о}} \cdot C_0 \cdot B_0/a \cdot b \cdot A_0.$$

Коефіцієнт місткості агроценозу, що характеризує частку залишкової речовини, наприклад у ґрунті, після виносу рослинами за перший вегетаційний період ($F_{\text{П}}$) становить:

$$F_{\text{П}} = 1 - A_{\text{В}}.$$

Загальний винос речовин ($A_{\text{з.в.}}$) з урожаєм рослин через n вегетаційних періодів та відповідний чинник місткості цього агроценозу ($F_{\text{П}n}$) становлять:

$$A_{\text{з.в.}} = \sum_{i}^{n} K_{\text{П}_i} \cdot C_i \cdot B_i / a_i \cdot \text{в}_i \cdot A_o(1 - F_{\text{П}_i});$$

$$F_{\text{П}_i} = 1 - A_{\text{з.в.}},$$

де i — номер вегетаційного періоду.

В умовах зрошувального землеробства необхідно враховувати також частку екотоксикантів, які переходять у рослини від забрудненої поливної води. Так наприклад, для розрахунку кількості екотоксикантів, що накопичуються у врожаї культур за умов поливу ($\text{А}_{\text{В.П.}}$), використовуємо формулу:

$$A_{\text{В.П.}} = \frac{(K_{\text{П}_o} \cdot C_0 \cdot K_{\text{П}_\text{в}} \cdot C_{\text{В}}) \cdot B_0}{(a \cdot b \cdot A_0 + C_{\text{В}} \cdot V_{\text{В}})},$$

де $\text{К}_{\text{П}_\text{В}}$ — коефіцієнт переходу «поливна вода — біомаса рослин»; $C_{\text{В}}$ — об'ємна концентрація речовини у поливній воді, мг (мкг)/дм^3); $V_{\text{В}}$ — об'єм поливної води за вегетацію, дм^3.

Отже, можна розрахувати рівень забруднення екотоксикантами посіву (у т.ч. за умов тривалого багаторічного поливу) та винос їх урожаєм, а також місткість сільськогосподарських угідь. Така місткість може бути оцінена як сума місткостей для певних сільськогосподарських культур на різних ґрунтах за різних рівнів забруднення і врожайності рослин.

Для оцінки міграційної здатності речовин в агроекосистемі запропоновано метод камерних моделей, що продемонстрував високу ефективність під час радіоекологічних досліджень [4, 5, 7] та вивчення можливих шляхів міграції стійких до розпаду пестицидів трофічними ланцюгами наземних і водних екосистем [6]. За використання цього методу шляхи міграції речовин умовно поділяються на камери (ланки), а перехід речовин між ними визначається коефіцієнтами переходу. За використання стаціонарної камерної моделі постулюється: 1) речовина у кожній камері розподілена рівномірно; 2) коефіцієнти переходу речовини між камерами є сталими; 3) перенесення речовини від однієї камери до іншої описується законами кінетики першого порядку за використання системи диференціальних рівнянь.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Основним компонентом наземних агроекосистем є ґрунт. Шляхи надходження екотоксикантів до рослин поділяються на: сорбцію з ґрунту кореневою системою рослин, випадіння з атмосфери на рослинність і ґрунт, поверхневий вітровий вторинний підйом з ґрунту (дефляція), водний твердий і рідкий стоки, у т.ч. для поливних — з дощувальною водою на рослини і ґрунт, а за поливу у борозни — на ґрунт.

Після осадження екотоксикантів на трав'янисту рослинність, частина з них змивається опадами і здувається вітром залежно від виду випадінь, типу і біомаси рослинного покриву, метеорологічних умов тощо. Розчинні екотоксиканти фіксуються на поверхні рослин, потім адсорбуються і накопичуються листками та пагонами. Подальшу їх міграцію в організмі рослин визначають як фізико-хімічні властивості самих речовин, так і біологічні особливості рослин. Це так званий позакореневий шлях міграції екотоксикантів до рослин. Екотоксиканти, що потрапили до ґрунту, сорбуються кореневою системою рослин і надходять до них. Це — кореневий шлях надходження речовин до рослин.

Накопичення екотоксикантів рослинами внаслідок надходження речовин позакореневим і кореневим шляхами можна розрахувати за формулою (у спрощеному вигляді за надходження однієї речовини) [4, 5]:

$$C = K_{\Pi a} \cdot C_a + K_{\Pi b} \cdot C_b,$$

де C — кількість екотоксикантів у рослинах; $K_{\Pi a}$ — коефіцієнт переходу екотоксиканта «повітря — рослина»; $K_{\Pi b}$ — коефіцієнт переходу екотоксиканта «ґрунт — рослина»; C_a — кількість екотоксикантів у приземному шарі повітря та C_b — у кореневій зоні ґрунту.

Надходження екотоксикантів до організму людини відбувається внаслідок безпосереднього споживання екологічно небезпечних рослин або їх плодів, а також з продуктами тваринництва, отриманих від тварин, що харчувалися забрудненими рослинами. Також це може відбуватися за вдихання токсичного повітря, споживання питної води та напоїв, що містять екотоксиканти, контактним шляхом через шкіру, очі, слизові оболонки рота і носа (рис. 1).

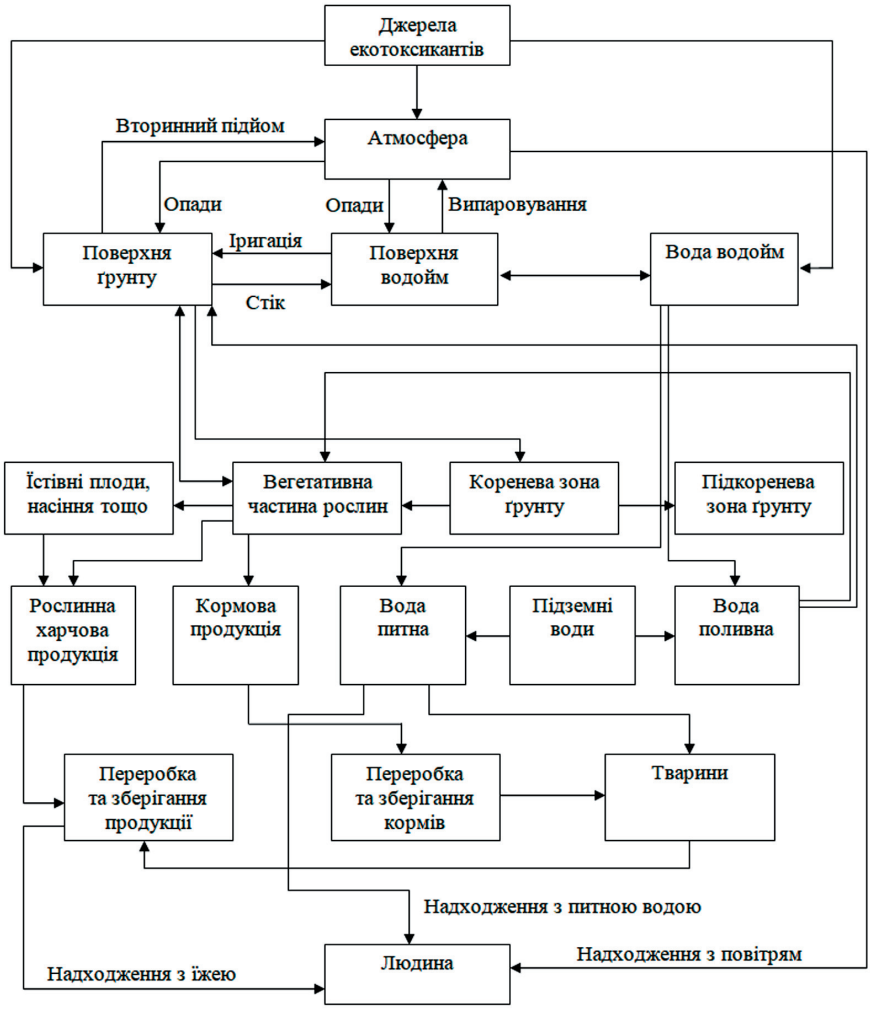

Рис. 1. Блок-схема основних шляхів міграції екотоксикантів у агроекосистемах

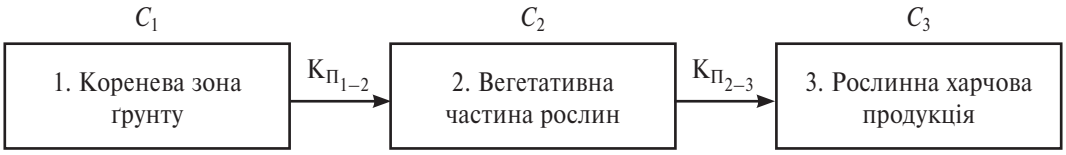

Рис. 2. Найпростіша стаціонарна камерна модель шляху міграції екотоксиканта у агроекосистемі: 1, 2, 3 — номери камер; C_1, C_2, C_3 — уміст екотоксиканта у відповідних камерах; $K_{П_{1-2}}$, $K_{П_{2-3}}$ — коефіцієнти переходу екотоксиканта до камер (цифрами позначено номери камер, між якими відбувається перехід екотоксиканта)

На основі методу стаціонарних камерних моделей [7] побудовано стаціонарну камерну модель найпростішої агроекосистеми, що складається з певних компонентів (рис. 2).

За цими даними міграція екотоксиканта агроекосистемою, на основі методу стаціонарної камерної моделі, описується системою диференціальних рівнянь, які можуть бути розв'язані за використання, наприклад, програми MAPLE 5-7:

$$\frac{dC_1}{dt} = -K_{П_{1-2}} \cdot C_1;$$

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

$$\frac{dC_3}{dt} = -K_{П_{2-3}} \cdot C_3.$$

За неперервного надходження екотоксиканта у 1-у камеру до наведеної системи диференціальних рівнянь додається рівняння:

$$\frac{dC_0}{dt} = K_{П_{0-1}} \cdot C_0.$$

де C_0 — уміст екотоксиканта на момент початку його міграції до 1-ї камери; $K_{П_{0-1}}$ — коефіцієнт переходу екотоксиканта до 1-ї камери; t — час.

Подібну схему диференціальних рівнянь можна скласти для будь-яких компонент міграційного шляху у агроекосистемах, а їх рішення дає можливість оцінити розподіл екотоксиканта в конкретній агроекосистемі.

ВИСНОВКИ

Міграція екотоксикантів у агроекосистемах є складним процесом, який залежить від багатьох чинників, зокрема: фізико-хімічних властивостей речовин та ґрунту, кількості опадів чи поливної води у разі її використання. Крім того, важливим є дія абіотичних (температура, вологість тощо) чи біотичних (зокрема ґрунтові мікроорганізми) чинників, а також шляхи надходження екотоксиканта до організму, включення його у метаболічні процеси.

Для прогнозування міграційної здатності екотоксикантів агроекосистемами запропоновано алгоритм на основі камерної моделі, що передбачає міграцію речовин між камерами, яка підпорядковується кінетичному закону реакції першого порядку і описується системою диференціальних рівнянь із використанням коефіцієнтів переходу. Такий підхід, опираючись на результати експериментальних досліджень, дає можливість адекватної оцінки екологічної небезпеки екотоксикантів і розробки засобів із запобігання їх негативній дії.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Мусієнко М.М.* Екологія. Охорона природи: словник-довідник / М.М. Мусієнко, В.В. Серебряков, О.В. Брайон. — К.: Знання, 2002. — 543 с.
2. *Гайченко В.А.* Екологія. Короткий тлумачний словник / В.А. Гайченко, В.М. Чайка. — К.: Компринт, 2017. — 238 с.
3. Екотоксикологічна оцінка сучасних гербіцидів за їх впливом на мезофауну ґрунту / С.В. Хижняк, С.В. Поліщук, О.П. Самкова та ін. // Агроекологічний журнал. — 2017. — № 4. — С. 100–106.
4. *Кутлахмедов Ю.О.* Основи радіоекології: навчальний посібник / Ю.О. Кутлахмедов, В.І. Корогодін, В.К. Кольтовер. — К.: Вища школа, 2003. — 319 с.
5. *Кутлахмедов Ю.О.* Радіобіологія: підручник / Ю.О. Кутлахмедов, В.М. Войціцький, С.В. Хиж-

няк. — К.: ВПЦ «Київський університет», 2011. — 543 с.
6. Шляхи міграції стійких пестицидів трофічними ланцюгами наземних і водних екосистем / С.В. Хижняк, В.М. Войціцький, В.В. Данчук та ін. // Біоресурси і природокористування. — 2018. — Т. 10, № 1–2. — С. 36–43.
7. *Кутлахмедов Ю.О.* Радіоекологія. Камерні моделі / Ю.О. Кутлахмедов, В.П. Петрусенко, В.В. Родіна. — К.: Книжкове видавництво НАУ, 2013. — 84 с.

REFERENCES

1. Musienko, M.M., Serebryakov, V.V., Brayon, O.V. (2002). *Ekologiya. Ohorona prirodi: slovnik-dovidnik [Ecology. Nature Conservation: Dictionary-Directory].* Kyiv: Znannya [in Ukrainian].
2. Haichenko, V.A, Chaika, V.M. (2017). *Ekolohiia. Korotkyi tlumachnyi slovnyk [Ecology. Short explanatory dictionary].* Kyiv: Komprynt [in Ukrainian].
3. Khyzhnyak, S.V., Polishchuk, S.V., Samkova, O.P., Konopol'skiy, O.P., Voitsitskiy, V.M. (2017). Ekotoksikologichna otcinka suchasnih gerbitsidiv za ih vplivom na mezofaunu hruntu [Ecotoxicity evaluation of modern herbicides by their effect on the soil mesofauna]. *Ahroekolohichnyi zhurnal — Agroecological Journal, 4*, 100–106 [in Ukrainian].
4. Kutlakhmedov, Yu.O., Korogodin, V.I., Koltover, V.K. (2003). *Osnovi radioekologiyi: navchalniy posibnik [Fundamentals of Radioecology: Textbook].* Kyiv: Vyshcha shkola [in Ukrainian].
5. Kutlakhmedov, Ju.O., Voitsitskiy, V.M., Khyzhnyak, S.V. (2011). *Radiobiologhija [Radiobiology].* Kyiv: VPTs «Kyivskyi universytet» [in Ukrainian].
6. 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]. *Bioresursy i pryrodokorystuvannya — Bioresources and nature use, 10 (1–2)*, 36–43 [in Ukrainian].
7. Kutlakhmedov, Yu.A., Matveeva, I.V., Petrusenko, V.P., Rodina, V.V. (2013). *Radioekologiya. Kamerni modeli [Radioecology. Box-models].* Kyiv: Knyzhkove vydavnycztvo NAU [in Ukrainian].

Отримано 14.01.2019