

ШЛЯХИ МІГРАЦІЇ ПОЛІЦИКЛІЧНИХ АРОМАТИЧНИХ ВУГЛЕВОДНІВ НАЗЕМНИМИ І ВОДНИМИ ЕКОСИСТЕМАМИ

Войціцький В.М.¹, Хижняк С.В.¹, Мідик С.В.¹, Березовський О.В.¹,
Якубчак О.М.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 наведена загальна характеристика розповсюдженням екотоксикантам – поліциклічним ароматичним вуглеводням (ПАВ): їх хімічній будові, джерелам виникнення, токсичності. Токсична дія ПАВ, як і інших токсикантів, визначається рядом чинників. Це, насамперед, фізико-хімічні властивості цих речовин (у залежності від їх структури), доза, термін дії, інтенсивність та частота впливу, шляхи потрапляння до організму та механізм їх біологічної дії. Нині вже відомо більше тисячі ПАВ. Вони відрізняються між собою за кількістю і розміщенням бензольних кілець. Переважна більшість ПАВ проявляє не тільки загальнотоксичну дію, але є також канцерогенами, мутагенами і тератогенами. Визначення ПАВ в об'єктах дослідження проводиться методом високоефективної рідинної хроматографії (ВЕРХ) та методом тонкошарової хроматографії.

Встановлення шляхів міграції ПАВ наземними і водними екосистемами, прогнозування цього процесу на основі запропонованої моделі дає можливість оцінити екологічну небезпеку цих екотоксикантів, сприяє розробці методів зменшення або навіть запобігання їх накопиченню в певних ланцюгах екосистем при надходженні до організму людини.

Основна увага приділена опису шляхів міграції цих речовин в наземних і водних екосистемах, можливості їх потрапляння до організму людини. З огляду на необхідність зниження навантаження ПАВ на об'єкти довкілля (атмосферне повітря, ґрунт, воду, біоту) та їх вмісту в харчових продуктах для людей, кормах для свійських тварин і питній воді, актуальним є прогнозування міграції цих речовин наземними і водними екосистемами.

Оскільки в процесі природного і антропогенного забруднення довкілля, харчових продуктів та питної води утворюються різноманітні екотоксиканти, то для прогнозування шляхів їх міграції екосистемами необхідна розробка методів (моделей) з урахуванням особливостей даних речовин. Запропоновано відносно простий в користуванні, зручний і ефективний метод камерних моделей, який дає змогу наочно відобразити процес міграції ПАВ в екосистемах, визначити критичні ланки в міграційних ланцюгах, за встановлення коефіцієнтів переходу між ланками і накопичення ПАВ в цих ланках. *Ключові слова:* міграція, поліциклічні ароматичні вуглеводні.

Ways of migration of polycyclic aromatic hydrocarbons by terrestrial and aquatic ecosystems. Voitsitskiy V., Khyzhnyak S., Midyk S., Berezovskiy O., Yakubchak O., Poltavchenko T.

The article presents a general description of common ecotoxins - polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH): their chemical structure, sources, toxicity. The toxic effect of PAH, like other toxicants, is determined by a number of factors. These are, first of all, physicochemical properties of these substances (depending on their structure), dose, duration of action, intensity and frequency of exposure, ways of getting into the body and the mechanism of their biological action. More than a thousand PAH are now known. They differ in the number and location of benzene rings. The vast majority of PAH have not only a general toxic effect, but are also carcinogens, mutagens and teratogens. The determination of these substances in the objects of research is carried out by the method of high-performance liquid chromatography (HPLC) and the method of thin-layer chromatography.

Establishing migration routes of polyaromatic hydrocarbons in terrestrial and aquatic ecosystems, forecasting this process based on the proposed model makes it possible to assess the environmental hazards of these ecotoxins, helps to develop methods to reduce or even prevent their accumulation in certain chains of ecosystems.

The main attention is paid to the description of the ways of migration of these substances in terrestrial and aquatic ecosystems, the possibility of their entry into the human body. Given the need to reduce the load of PAH on the environment (air, soil, water, biota) and their content in human food, pet food and drinking water, it is important to predict the migration of these substances by terrestrial and aquatic ecosystems.

As various ecotoxins are formed in the process of natural and anthropogenic pollution of the environment, food and drinking water, it is necessary to develop methods (models) taking into account the peculiarities of these substances to predict the ways of their migration by ecosystems. A relatively easy-to-use, convenient and efficient method of chamber models is proposed, which allows to visualize the process of PAH migration in ecosystems, identify critical links in migration chains, by establishing transition coefficients and PAH accumulation in these links. *Key words:* migration, polycyclic aromatic hydrocarbons.

Постановка проблеми. Одним з розповсюджених екотоксикантів, тобто речовин природного чи антропогенного походження, які забруднюють довкілля і харчові продукти рослинного й тваринного походження та можуть спричиняти негативний вплив на здоров'я

людини [1] є поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ, англ. polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs). Це органічні речовини для яких характерна наявність у хімічній структурі двох і більше конденсованих бензольних кілець, які мають загальну формулу C_nH_{2n-6} [2].

Нині вже відомо більше тисячі ПАВ. Вони відрізняються між собою за кількістю і розміщенням бензольних кілець (див. поширені в таблиці). Переважна більшість ПАВ проявляє не тільки загальнотоксичну дію, але є також канцерогенами, мутагенами й тератогенами [2].

Токсична дія ПАВ, а також інших токсикантів, визначається рядом чинників. Це, насамперед, фізико-хімічні властивості цих речовин (залежать від їх структури), доза, термін дії, інтенсивність та частота впливу, шляхи потрапляння до організму та механізм біологічної дії [3].

В Україні максимально допустимі рівні (МДР) ПАВ у харчових продуктах визначені Державними гігієнічними правилами і нормами (ДСанПіН) "Регламент максимальних рівнів окремих забруднюючих речовин у харчових продуктах" [4], які встановлені з метою контролювання цих речовин та гармонізації законодавства України з подібним регламентом ЄС.

У залежності від харчового продукту МДР для, наприклад, одного з високотоксичних ПАВ бензо(а)пірену встановлено в межах від 1,0 мкг/кг продукту (продукти прикорму для дітей), 2,0 мкг/кг (копчене м'ясо і риба) до 10,0 мкг/кг (страви сушені за використання деревного диму).

Визначення ПАВ в об'єктах дослідження проводиться методом високоефективної рідинної хроматографії (ВЕРХ) та методом тонкошарової хроматографії. Останній є менш чутливим і точним [5–8].

У природі ПАВ зустрічаються: в геологічних відкладаннях, повітрі, ґрунті, воді, в тканинах рослин і тварин тощо. Ці речовини вперше з'явилися в результаті таких природних процесів як вулканічна активність, лісові пожежі, мікробіологічний синтез. ПАВ входять до складу нафти, природного газу, вугілля, відкладень вугільної смоли (дьогтю) і ще деяких паливних природних матеріалів.

Антропогенними джерелами ПАВ є, насамперед, підприємства, де застосовуються високотемпературні (вище 700 °С) процеси: виробництво енергії за рахунок спалювання вугілля, нафти, газу, торфу, сланцю, деревини; виплавка металів (чугунку, сталі, міді, алюмінію та ін.); піроліз органічних речовин; очищення і переробка нафти; високотемпературний хімічний синтез.

Джерелами ПАВ можуть бути також промислові виробництва, що забруднені цими речовинами, недосконалість технологій знищення або захоронення побутового і промислового сміття, обробка сільськогосподарських угідь пестицидами, діючою речовиною яких є ПАВ, викиди транспортних двигунів, асфальтове покриття доріг у жарку погоду, функціонуючі котельні. Деякі ПАВ (зокрема, бензо(а)пірен) потрапляють в дим не тільки при горінні палива (вугілля, газу, нафти тощо), але і горінні деревини (деревного вугілля).

В таблиці 1 наведені відомості про деякі високотоксичні ПАВ.

Актуальність дослідження. Встановлення шляхів міграції ПАВ наземними і водними екосистемами, прогнозування цього процесу на основі запропонованої моделі дає можливість оцінити екологічну небезпеку цих екотоксикантів, сприяє розробці методів зменшення або навіть запобігання їх накопиченню в певних ланцюгах екосистем при надходженні до організму людини.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Оскільки в процесі природного і антропогенного забруднення довкілля, харчових продуктів та питної води утворюються різноманітні екотоксиканти, то для прогнозування їх шляхів міграції екосистемами необхідна розробка методів (моделей) з урахуванням особливостей даних речовин. Запропонований у статті метод камерних моделей показав високу ефективність при прогнозуванні шляхів міграції радіоізотопів [9], пестицидів [10, 11], важких металів [12]. Саме цей метод запропоновано для оцінки міграції ПАВ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вирішенню проблеми міграції екотоксикантів ланцюгами (ланками) екосистем присвячена велика кількість досліджень. Узагальнюючий аналіз цього питання викладено за посилками [3, 9, 13–16].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на наявність певних наукових розробок стосовно можливої міграції екотоксикантів екосистемами, нині відсутні узагальнюючі відомості стосовно ПАВ, що потребують аналізу, а особливо – створення моделей прогнозу можливих шляхів цього процесу.

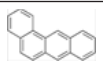
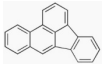
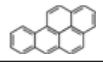
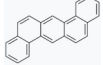
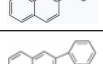
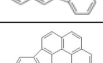
Новизна. Застосовано метод камерних моделей для прогнозування шляхів міграції ПАВ наземними і водними екосистемами. Створена схема цих шляхів з урахуванням фізико-хімічних властивостей екотоксикантів та стану об'єктів довкілля (атмосферного повітря, ґрунту, води), їх стійкості як у довкіллі, так і в організмах, у які вони потрапляють тощо).

Виклад основного матеріалу. Для прогнозування процесів міграції ПАВ у наземних і водних екосистемах застосовано метод камерних моделей [9–12]. У цьому методі для опису міграції речовин екосистемами їх ланцюги поділяють на камери (ланки), а перехід між ними речовин описується системою диференціальних рівнянь на основі законів кінетики першого порядку.

Для характеристики міграційних шляхів екосистем прийнято застосовувати коефіцієнти переходу (K_n), які свідчать про те, у скільки разів більшою чи меншою може бути кількість речовин в ланках (камерах) ланцюга екосистеми у порівнянні з довкіллям (для першої камери при постійному джерелі

Таблиця 1

Відомості про деякі поширені високотоксичні ПАВ за [5] з уточненням

Назва	Хімічна формула	Молекулярна маса, г/моль	Вміст вуглецю, % С	CAS-номер	Структура
Фенантрен	$C_{14}H_{10}$	178,23	94,50	085-01-8	
Флуорантен	$C_{16}H_{10}$	202,26	95,00	206-44-0	
Бензо(а)антрацен	$C_{18}H_{12}$	228,29	94,45	056-55-3	
Бензо(б)флуорантен*	$C_{20}H_{12}$	252,32	95,20	205-99-2	
Бензо(а)пірен*	$C_{20}H_{12}$	252,31	95,20	050-32-8	
Дибензо(а,һ)антрацен	$C_{22}H_{14}$	278,35	94,70	053-70-3	
Антрацен	$C_{14}H_{10}$	178,23	94,50	120-12-7	
Пірен	$C_{16}H_{10}$	202,26	95,00	129-00-0	
Хризен	$C_{18}H_{12}$	228,28	94,45	218-01-9	
Бензо(к)флуорантен*	$C_{20}H_{12}$	252,32	95,20	207-08-9	
Індено(1,2,3-сd)пірен*	$C_{22}H_{12}$	276,34	95,60	193-39-5	
Бензо(ghi)перилен*	$C_{22}H_{12}$	276,34	95,60	191-24-2	

Примітка. Вибрані ПАВ відповідають переліку Агентства екологічного захисту США (US EPA); * – сполуки, що визнані як сильно діючі канцерогени Директивою Ради ЄС 98/83.

забруднення) або з попередньою камерою у міграційному ланцюзі:

$$K_n = C_1 : C_2,$$

де C_1 – питомий вміст (концентрація) речовини у попередній камері (для першої – у довкіллі), а C_2 – в наступній камері.

Крім K_n для характеристики міграційних процесів використовується також коефіцієнт накопичення (K_n) – це показник, який становить співвідношення між кількістю речовини в одиниці елемента (камері) та її вмістом в об'єкті довкілля (повітрі, ґрунті, воді):

$$K_n = C_1 : C_3,$$

де C_1 – питомий вміст (концентрація) речовини в елементі (камері) міграційного ланцюга, а C_3 – в елементі довкілля.

На рисунку 1 наведено просту динамічну камерну модель міграційного ланцюга: ґрунт – рослинна харчова продукція – людина.

Проста динамічна камерна модель ґрунтується на наступних постулатах: 1) міграційні ланцюги поділяються на камери, в яких переміщення речовини є миттєвим у всіх частинах камери в будь-якому

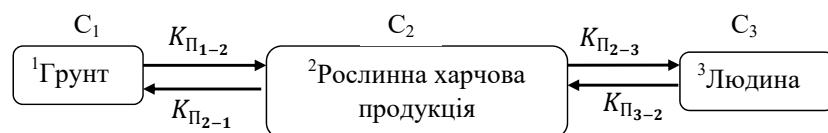


Рис. 1. Проста динамічна камерна модель міграційного ланцюга ґрунт – рослинна харчова продукція – людина

Примітка. 1, 2, 3 – номер модельної камери; C_1, C_2, C_3 – концентрація речовини (зокрема, екотоксична) у відповідних камерах; K_{n1-2} і K_{n2-3} – це прямі коефіцієнти переходу речовини між камерами; K_{n2-1} і K_{n3-2} – зворотні коефіцієнти переходу речовини між камерами.

напрямку; 2) перенесення речовини з однієї камери до іншої відбувається за законами кінетики першого порядку, що описується системою диференціальних рівнянь; 3) коефіцієнти переходу речовини між камерами є сталими величинами. За цими постулатами система диференціальних рівнянь, що описує міграцію речовини в 3-х камерній динамічній моделі (рис. 1), наступна:

$$\begin{aligned}\frac{dC_1}{dt} &= K_{П2-3} \cdot C_2 - K_{П1-2} \cdot C_1; \\ \frac{dC_2}{dt} &= K_{П2-1} \cdot C_1 - K_{П2-3} \cdot C_2 + K_{П3-2} \cdot C_3; \\ \frac{dC_3}{dt} &= K_{П2-3} \cdot C_2 - K_{П3-2} \cdot C_3;\end{aligned}$$

де d (dC_1 , dC_2 , dC_3) – символ диференціювання; t – час.

Практично для міграційних шляхів екосистеми будь-якої складності може бути розв'язана система диференціальних рівнянь та отримано значення концентрації речовини для будь-яких значень коефіцієнтів переходу ($K_{П}$) від моменту надходження речовини до першої камери.

Узагальнююча схема основних шляхів міграції ПАВ наземними і водними екосистемами наведена на рисунку 2. В результаті викидів у довкілля ПАВ зазвичай потрапляють в атмосферу, а з деяких підприємств (металургійної, хімічної та інших галузей, шахт) зі стічними водами (як правило після відстійників) – у вододіли і річки. Атмосфера сприяє міграції ПАВ та можливому перенесенню їх на значні відстані. Провідну роль у цьому процесі відіграють дисперсність викинутих частинок, що містять екотоксиканти, висота викиду, рух повітря та атмосферні опади.

Хоча викинуті частинки (їх діаметр зазвичай варіює від сотих часток до десятків мікрометрів) можуть переноситися на значні відстані (тисячі кілометрів), але в силу дії гравітації все ж таки випадають на поверхню Землі. Суттєво прискорюється випадання частинок з атмосферними опадами (дощем, снігом).

З поверхні ґрунту екотоксиканти, зокрема ПАВ, перерозподіляються у вертикальному і горизонтальному напрямку. Їх міграційна здатність у ґрунті та включення у біологічні цикли обумовлюється властивостями власне екотоксикантів, ґрунту та іншими чинниками довкілля.

Виділяють дві основні групи чинників, які ведуть до зміни рухливості речовин у ґрунті та біологічної доступності. Перша з них – впливають на стійкість речовин, яка може змінюватися внаслідок утворення комплексних сполук із речовинами ґрунту, агрегації, тощо. Стосовно ПАВ необхідно відмітити, що ці речовини здатні руйнуватися під впливом сонячного світла.

Друга група чинників, призводить до зростання рухливості речовин, в тому числі ПАВ, у ґрунті

та їх біологічної рухливості. Так, під впливом води, кисню та діяльності мікрофлори ґрунту високодисперсні частинки з часом здатні руйнуватися і переходити у більш доступні форми, які добре розчиняються у ґрунтовому розчині, що посилює їх засвоєння рослинами. Суттєве значення для міграції речовин у ґрунті мають механічний стан і мінеральний склад ґрунту та хімічна характеристика ґрунтового розчину.

Важливу роль у процесах міграції речовин у ґрунті відіграють погодні-кліматичні умови: температура довкілля, атмосферні опади, рух вітру (особливо дефляція, вторинний вітровий підйом), а також поверхневі та ґрунтові води, рельєф місцевості, наявність на ній рослинності, сезон року.

Рослини здатні накопичувати екотоксиканти, внаслідок чого може статися забруднення сільськогосподарської продукції та кормів для годівлі тварин. Екотоксиканти, зокрема ПАВ, надходять в рослини двома основними шляхами: через наземні органи (позакореневе надходження) і через кореневу систему (кореневе надходження). Позакореневе їх надходження можливе з атмосфери і поливі забрудненою дощовою водою. Найактивніше при позакореновому надходженні екотоксиканти адсорбуються листям (листокове поглинання), квітками (флоральне поглинання), а також можливе поглинання стеблами чи поверхневими коренями. До позакоренового поглинання здатні тільки ті екотоксиканти, що міцно адсорбуються на наземних органах рослин, оскільки у протилежному випадку вони можуть здуватися вітром або змиватися дощем. Обов'язковою умовою для проникнення в рослини є наявність вологи на частинах рослин, які поглинають ці речовини.

ґрунт, особливо поверхневий шар, є сильним поглиначем різних речовин, в тому числі екотоксикантів [13]. Здатність коренів поглинати речовини залежить від ряду причин, основні з яких – міцність зв'язку цих речовин з частинками ґрунту; фізико-хімічні властивості як речовин, так і ґрунту; вологість ґрунту і наявність в ньому речовин та ґрунтової біоти, яка здатна впливати на сорбційну здатність коренів; вид рослин та їх фізіологічний стан.

Сполуки ПАВ (див. таблицю 1) – це ліпофільні і неполярні речовини, що, як правило, погано розчиняються у воді. У той же час при заміні зовнішніх атомів Гідрогену в молекулі ПАВ на гідроксильні групи ($-OH$), наприклад, за хімічних реакцій, які спричинені дією ультрафіолетового випромінювання у певній фазі, розчинність ПАВ у воді збільшується.

Дослідження потрапляння екотоксикантів до прісноводних екосистем має важливе значення. Оскільки ці екосистеми є не тільки джерелом харчових продуктів для людини і певних кормів для сільськогосподарських тварин, але й питної та води для поливу. При надходженні речовин, зокрема, ПАВ до прісноводних водойм вони розподіляються між

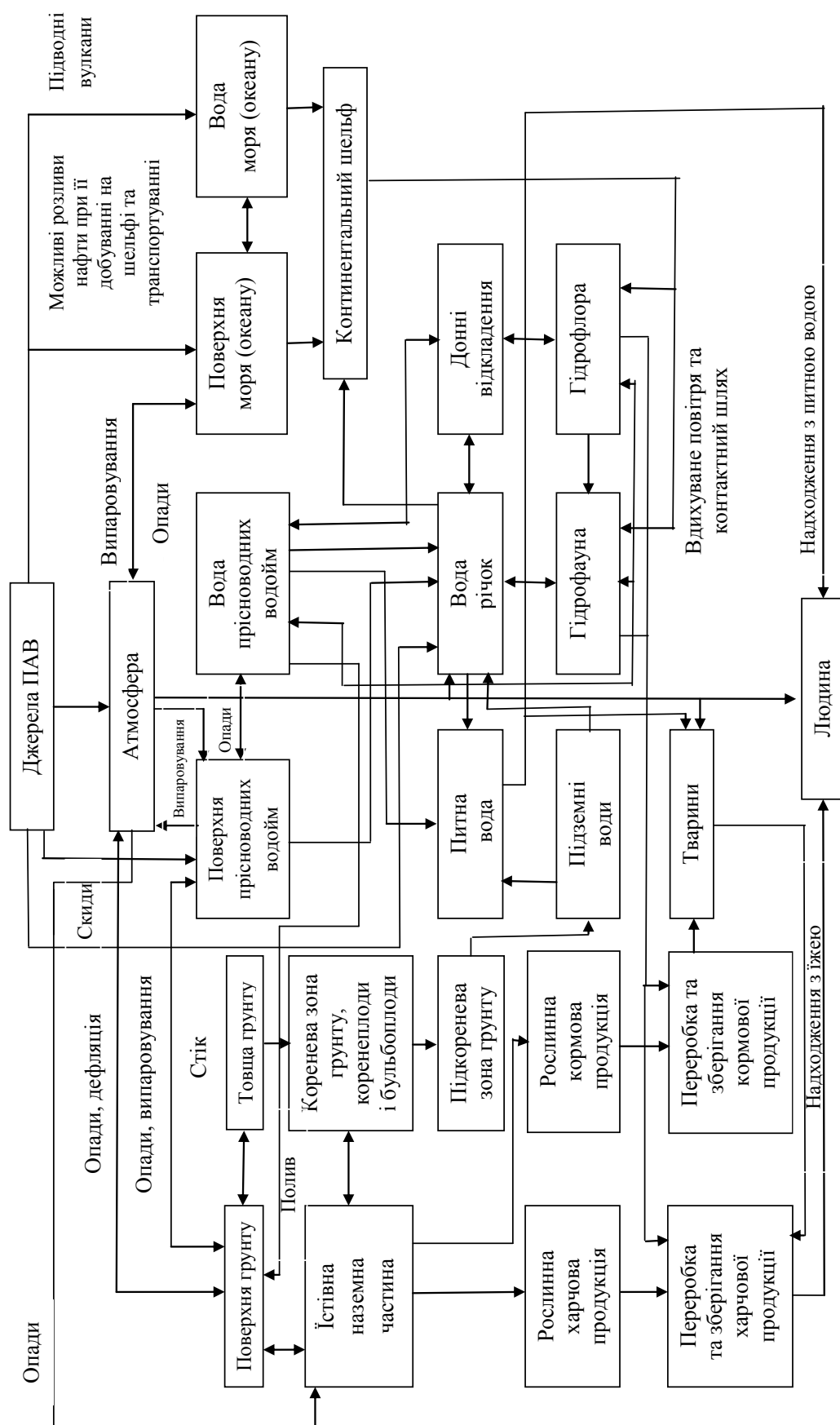


Рис. 2. Основні шляхи міграції ПАВ наземними і водними екосистемами

водою донними відкладеннями (мулом) і біотою з можливістю взаємного переходу. Вода у водоймах відіграє роль сполучної ланки в ланцюзі міграції речовин з неї до водних тварин (гідрофауни) безпосередньо з води, а також до донних відкладень й організмів, що в них мешкають. Для тварин також суттєвим є надходження екотоксикантів до організму трофічними (харчовими) ланцюгами.

Кінцевим депо накопичення стійких до розпаду екотоксикантів, в тому числі ПАВ, у природних умовах є моря і океани. Океан займає майже 60% поверхні Північної і 80% Південної півкуль Землі та містить близько $1,4 \times 10^9$ км³ води. Розчинність речовин у воді морів і океанів менша, ніж у прісноводній воді через хімічний склад цих вод. Це стосується також ПАВ, які взагалі є малорозчинними у воді сполуками. Суттєвим стосовно концентрації речовин у воді морів і океанів є те, що через величезний об'єм цих вод відбувається значне розведення речовин, які потрапляють до них. Наслідок всього цього – морські організми, в тому числі риба поглинають менше речовин з води, ніж прісноводні. У відкритому морі (океані), де мала кількість біоти, вона незначно впливає на перерозподіл речовин, зокрема і ПАВ, у воді. В той же час на континентальному шельфі (затопленою морем околиці материка, яка переходить у материковий схил, займає близько 6% поверхні морів) ситуація інша, оскільки шельф – найважливіше місце стосовно морської біологічної продуктивності.

На континентальний шельф екотоксиканти, в тому числі ПАВ, потрапляють, зокрема, з гирла

річок, а також при перенесенні хвилями і течією тих, які утворилися при діяльності підводних вулканів. А стосовно ПАВ – також з розливів нафти, особливо при аваріях тощо.

До організму тварин, в тому числі людини, екотоксиканти (ПАВ), можуть потрапляти, в основному, трьома шляхами: перорально – через шлунково-кишковий тракт з продуктами харчування і питною водою; інгаляційно – через дихальну систему зі забрудненим повітрям; перкутантно (контактно) – через зовнішні покриви тіла (шкіру, слизові оболонки носа, рота, очей).

Необхідно відмітити, що забруднення екотоксикантами вдихуваного повітря, рослинних і тваринних (особливо молока і м'яса) харчових продуктів і питної води формує основні фази навантаження організму людини цими речовинами.

Головні висновки та перспективи використання результатів дослідження. З огляду на необхідність забезпечення зниження навантаження ПАВ на об'єкти довкілля (атмосферне повітря, ґрунт, воду, біоту) та їх вмісту в харчових продуктах для людей, кормах для свійських тварин і питній воді, актуальним є прогнозування міграції цих речовин наземними і водними екосистемами. Запропоновано відносно простий у користуванні, зручний та ефективний метод камерних моделей, який дає змогу наочно відобразити процес міграції ПАВ в екосистемах, визначити критичні ланки в міграційних ланцюгах за встановлення коефіцієнтів переходу між ланками і накопичення ПАВ в цих ланках.

Література

1. Агроєкологія: словник-довідник найбільш вживаних агроєкологічних термінів / В.В. Данчук, В.О. Ушкалов, В.М. Войціцький, та ін.; за ред. В.О. Ушкалова. К. : ФОП Ямчинський О.В., 2021. 494 с.
2. Едванс Н.Т. Полициклические ароматические углеводороды (ПАВ) в наземной окружающей среде. *Качество окружающей среды*. 1983. № 12. С. 427–441.
3. Екологічна біохімія : навчальний посібник / В.М. Ісаєнко, В.М. Войціцький, Ю.Д. Бабенюк, та ін. К. : Книжкове вид-во НАУ, 2005. 440 с.
4. Державні гігієнічні правила і норми «Регламент максимальних рівнів окремих забруднюючих речовин у харчових продуктах. Розділ 6. Поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ)» / Наказ МОЗ України № 368 від 13.05.2013 р. із змінами № 1238 від 22.05.2020 р. https://zakononline.com.ua/documents/show/347397___656916 (дата звернення: 20.05.2022).
5. ДСТУ ISO 17993:2008 Якість води. Визначення 15 поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАВ) у воді методом високо-ефективної рідинної хроматографії з флуоресцентним детектуванням після рідинно-рідинного екстрагування.
6. Войціцький В.М., Хижняк С.В., Грищенко В.А., Баранов Ю.С. Аналітичні методи досліджень. Хроматографічні та електрофоретичні методи аналізу: теоретичні основи і методики: навчальний посібник. К.: ЦП Компрінт, 2017. 268 с.
7. ДСТУ 4689:2006 Продукти харчові. Методи визначання масової частки бенз(а)пірену.
8. ДСТУ EN ISO 22959:2019 Жири тваринні і рослинні та олії. Визначення поліциклічних ароматичних вуглеводнів з використанням комплексної донорно-акцепторної хроматографії в режимі реального часу та високоефективної рідинної хроматографії з флуоресцентним детектуванням.
9. Кутлахмедов Ю.О., Матвеева І.В., Петрусенко В.П., Родіна В.В. Радіоекологія. Камерні моделі. К. : Книжкове видавництво НАУ, 2013. 84 с.
10. 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, № 12. С. 36–43.
11. Застосування моделювання для прогнозування міграції екотоксикантів наземними і водними екосистемами: науково-практичні рекомендації для установ України екологічного профілю / В.М. Войціцький, С.В. Хижняк, С.В. Мідик та ін. К. : РВВ НУБіП України, 2019. 31 с.
12. Надходження і міграція важких металів наземними і водними екосистемами / В.М. Войціцький, С.В. Хижняк, С.В. Мідик та ін. Біоресурси і природокористування, 2019. Т. 11, № 1–2. С. 23–31.

13. Жирнов В.В., Савченко Д.А. Біоконверсія відходів: підручник. Частина І. К. : РРП Експресо-Друк, 2017. 302 с.
14. Глобальне здоров'я, якість і безпека життя: довідник-монографія / В.М. Войціцький, С.В. Хижняк, В.В. Данчук, та ін.; заг. ред. В.О. Ушкалова. К. : ТОВ ЦП «Компринт», 2019. Т. 2. 640 с.
15. Пестициди та їх еколого-токсикологічна оцінка: монографія / С.В. Хижняк, Ю.С. Баранов, В.Ф. Демченко та ін. К. : РВД НУБіП України, 2019. 226 с.
16. Безпека. Методи контролю важких металів у довкіллі та сільськогосподарській продукції : навчальний посібник / В.М. Войціцький, С.В. Хижняк, С.В. Мідик та ін.; заг. ред В.І. Корнієнко. К. : ТОВ Прінтеко, 2022. 252 с.