

Метаболізм радіонуклідів в організмі тварин

Тварини, як складова частина екосистеми, в своїй життєдіяльності включаються до найважливіших процесів, що протікають в ній. За всього різноманіття впливу тварин на екосистему їх діяльність може бути зведена до декількох основних форм, зокрема це утворення в екосистемах вторинної біологічної продукції та участь, у зв'язку з цим, тварин в кругообігах основних біогенних елементів. Крім цього, досить різноманітними є механічні форми діяльності, які призводять до відповідних змін навколишнього середовища.

Участь тварин в біологічному кругообігу речовини і в процесах формування ландшафтів проявляється головним чином в накопиченні, переміщенні речовини і енергії по трофічним рівням. Основним матеріалом для визначення балансу тваринної речовини і оцінки ролі тварин у формуванні ландшафту, його біологічної продуктивності є вивчення структури тваринного населення, зокрема його чисельності і біомаси. Знаючи рівні накопичення хімічних елементів окремими представниками зооценозу, не виникає проблем у розрахунку вмісту цих елементів в структурних компонентах екосистеми.

В радіоекології виділяються декілька категорій істотного впливу тварин на компоненти екосистем:

- участь консументів-фітофагів у кругообігу радіонуклідів,
- участь консументів-сапрофагів у кругообігу радіонуклідів,
- зоогенна горизонтальна міграція радіонуклідів,
- міграція радіонуклідів внаслідок ґрунтоутворювальної діяльності тварин.

Зрозуміло, що вплив тваринного світу на функціонування екосистем і кругообіг в них речовини (у тому числі і радіоактивних) значно ширший, проте наведені категорії є найхарактернішими видами взаємозв'язку і взаємовпливу в екосистемі.

Перерозподіл енергії в екосистемі від її джерела – рослин через ряд організмів здійснюється шляхом поїдання одних організмів іншими. Це варіант згаданого вище трофічного ланцюга. Кожний черговий перенос по трофічному ланцюгу характеризується тим, що більша частина (80–90%) потенційної енергії втрачається внаслідок переходу у тепло. Це обмежує можливе число етапів, або ланок ланцюга, зазвичай до чотирьох–п'яти. Чим коротший трофічний ланцюг (або чим ближчий організм до його початку) тим більша кількість енергії йому доступна. Трофічні ланцюги поділяються на два основних типи:

- пасовищні ланцюги – це такі, які починаються від рослин (продуцентів) та йдуть далі до рослиноїдних організмів (консументи 1-го порядку) і через ряд тварини з мішаним типом живлення (консументи 2-го порядку) до хижаків – тварин, що живляться іншими тваринами (консументи 3-го порядку);
- детритні ланцюги – такі, що починаються від мертвої органічної речовини та йдуть до мікроорганізмів, які нею живляться, а також в ланках від детритофагів до їх хижаків.

Цілком закономірно, що радіонукліди, включаючись до метаболізму рослин, перерозподіляються по трофічних рівнях, спричиняючи цим самим інтенсивне перенесення радіоактивного забруднення.

Закономірності надходження ^{137}Cs і ^{90}Sr до тварин по трофічних рівнях і ланцюгах залежать від екологічних особливостей різних видів організмів, характеру їх живлення, розподілу в екосистемі, фізико-хімічних властивостей радіонуклідів. Для певних груп тварин з однаковим характером живлення відзначаються подібні закономірності в концентрації радіонуклідів під час їх міграції по ланкам трофічних ланцюгів. З іншого боку, коефіцієнти концентрування виявляють більшу відмінність в ступені акумуляції нуклідів видами з близьким типом живлення. Істотне значення в перерозподілі радіонуклідів мають і природні умови мешкання тварин (табл. 1).

Таблиця 1

**Кількість радіонуклідів, що перерозподіляються тваринами різних природних зон
(Д.А. Криволуцький, В.Л. Усачов, 1989)**

| Природна зона | ⁹⁰ Sr , % від | ¹³⁷ Cs, % від |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|
| | загального запасу | загального запасу |
| Мішані ліси | 6 | 5 |
| Широколистяні ліси | 11 | 3 |
| Лісостеп | 16 | 4 |
| Напівпустеля | 0,6 | 0,4 |
| Пустеля піщана | 0,1 | 0,06 |
| Пустеля аридна | 0,03 | 0,02 |

Такі відмінності в першу чергу пов'язані з біомасою тваринного населення екосистем відповідних природних зон, а переважання в накопиченні і перерозподілі радіонуклідів, зокрема ⁹⁰Sr, обумовлене домінуванням (до 90% біомаси) в екосистемах кальцефільних тварин.

При вивченні біогенної міграції ⁹⁰Sr на території Східно-Уральського радіоактивного сліду (наслідок згаданої аварії 1957 р.) було встановлено, що тварини здатні "пропускати" крізь себе близько $1,7 \times 10^8$ Бк ⁹⁰Sr на 1 га за рік, тобто 0,6% його природного розпаду в екосистемі – при вмісті в ґрунті 120000 кБк/м² в рослинах його міститься 18000 кБк/м², а в комах-фітофагах і хижаках 0,33 і 0,04 кБк/м², відповідно (табл. 2). Тим не менше вплив навіть такої незначної активності на функціонування біотичної компоненти екосистеми досить істотний.

Таблиця 2

Загальний вміст кальцію і ⁹⁰Sr в деяких компонентах екосистеми на Східно-Уральському радіоактивному сліді (А.Д. Покаржевський, В.Л. Усачов, 1993)

| Компонент екосистеми | Маса, кг сухої | Са, г/га | ⁹⁰ Sr, Бк/га |
|----------------------------|------------------|------------------|-------------------------|
| | речовини/га | | |
| Ґрунт | 25×10^4 | 25×10^5 | $1,2 \times 10^{12}$ |
| Живі рослини | 10×10^4 | 5×10^5 | $1,8 \times 10^{11}$ |
| Рослинний опад і підстилка | 6×10^4 | 10×10^4 | $1,6 \times 10^{11}$ |

| Тварини | | | |
|---------------------|-------|-----|-------------------|
| Найпростіші | 10 | 80 | $1,3 \times 10^4$ |
| Нематоди | 5 | 40 | $7,4 \times 10^3$ |
| Енхітреїди | 5 | 40 | $7,4 \times 10^3$ |
| Дощові черв'яки | 7,5 | 88 | $1,4 \times 10^4$ |
| Мікроартроподи | 15 | 50 | $2,2 \times 10^6$ |
| Комахи | 25 | 75 | $3,7 \times 10^6$ |
| Інші безхребетні | 10 | 50 | $1,5 \times 10^6$ |
| Безхребетні (разом) | 77,5 | 420 | $7,4 \times 10^6$ |
| Гризуни | 0,85 | 30 | $1,1 \times 10^6$ |
| Копитні | 0,3 | 12 | $4,1 \times 10^5$ |
| Комахоїдні | 0,056 | 2 | $3,3 \times 10^4$ |
| Хижак | 0,028 | 1 | $1,8 \times 10^3$ |
| Інші ссавці | 0,056 | 2 | $3,7 \times 10^3$ |
| Птахи | 0,056 | 2 | $6,3 \times 10^4$ |
| Амфібії і рептилії | 0,056 | 2 | $6,3 \times 10^4$ |
| Хребетні (разом) | 1,4 | 50 | $1,7 \times 10^6$ |
| Тварини (разом) | 79 | 490 | $9,1 \times 10^6$ |

Приблизно така ж картина спостерігається в накопиченні ^{90}Sr водними і наземними молюсками з кальцієвою черепашкою після аварії на Чорнобильській АЕС. У водних молюсків K_{H} ^{90}Sr відносно води становить не менше 2000–4000, а коефіцієнт переходу ($K_{\text{П}}$) відносно забрудненого ґрунту для молюска ставковика складає $0,11 \text{ (кБк/м}^2\text{)}/\text{(кБк/кг)}$ та $2,7 \text{ (кБк/м}^2\text{)}/\text{(кБк/кг)}$ для виноградного равлика (Л.І. Францевич та ін., 1996).

За подібною закономірністю відбувається і перерозподіл ^{137}Cs між компонентами наземних екосистем, хоча в кількісному вираженні вміст радіонукліда в м'яких тканинах тварин різних систематичних груп дещо менший (табл. 3).

Таблиця 3

Вміст ^{137}Cs та калію в різних компонентах наземної екосистеми на Східно-Уральському радіоактивному сліді (А.Д. Покаржевський, В.Л. Усачов, 1993)

| Компонент екосистеми | Маса, кг сухої речовини/га | ^{137}Cs , Бк/га | K, кг/га |
|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------|
| Ґрунт (0–5 см) | $2,5 \times 10^5$ | $1,9 \times 10^9$ | $1,9 \times 10^4$ |
| Рослинність | $1,0 \times 10^5$ | $5,5 \times 10^7$ | $8,7 \times 10^5$ |
| Підстилка | $6,0 \times 10^3$ | $5,5 \times 10^7$ | $2,0 \times 10^4$ |
| Безхребетні тварини | | | |
| Найпростіші | 10 | $1,9 \times 10^4$ | 160 |
| Нематоди | 5 | $9,5 \times 10^3$ | 25 |
| Енхітреїди | 2 | $3,7 \times 10^3$ | 10 |
| Дощові черв'яки | 12 | $1,9 \times 10^4$ | 240 |
| Мікроартроподи | 15 | $3,3 \times 10^3$ | 180 |
| Комахи | 25 | $5,5 \times 10^3$ | 250 |
| Інші безхребетні | 10 | $1,9 \times 10^3$ | 80 |

Загальний вміст ^{137}Cs в усіх групах тварин не перевищує 63 кБк/га, що складає всього 0,003% від загального вмісту цього радіонукліду в екосистемі. На частку ж безхребетних тварин, особливо тих що мають велику живу біомасу, припадає переважна більшість – 97% накопиченого тваринами ^{137}Cs . Слід зазначити, що біомаса живих організмів в екосистемах різних природних зон різна і залежить від природних умов. Найбільшою біомасою характеризуються екосистеми тропічних лісів, найменшою – аридних пустель і тундри.

Як уже зазначалося, перерозподіл речовини і енергії під час переміщення вздовж трофічного ланцюга будь якого типу здійснюється відповідно до закону піраміди чисел. Зоогенна міграція радіонуклідів в загальних рисах відповідає цьому закону, але має певні особливості в залежності від типу трофічного ланцюга або його частини.

Найбільш детально вивчений трофічний ланцюг пасовищного типу, в якому радіонукліди надходять про шляху рослина → фітофаги → хижаки. Так, на шляху міграції ^{137}Cs і ^{90}Sr в ланці рослина → рослиноїдні безхребетні спостерігається зниження концентрації радіонуклідів в комах – K_{H} 0,8 для ^{137}Cs і 0,1 для ^{90}Sr . В наступній ланці рослиноїдні безхребетні → хижі безхребетні K_{H} також складає близько 0,8. Наступний трофічний рівень – ланка безхребетні → комахоїдні птахи характеризується дискримінацією радіонуклідів, а K_{H} в цій ланці знижується до 0,53. Така ж закономірність характерна і для ланки рослина → рослиноїдні птахи, в якій вміст ^{137}Cs в м'язах птахів нижчий ніж в кормових рослинах, але K_{H} ^{90}Sr в скелеті цих птахів більше одиниці.

Певні відмінності в концентруванні радіоактивних речовин притаманні ланці трофічного ланцюга, що веде до хижаків-міофагів. Перехід в ланці жертва → хижак відзначається зростанням K_{H} до величини більше одиниці як для ^{90}Sr , так і для ^{137}Cs (рис. 4.7).

Істотну роль в перерозподілі радіоактивних речовин по трофічних рівнях відіграє трофічна ніша, яку займає вид та рівень метаболізму тварин. Птахи, що живляться в кроні дерев, мають значно меншу концентрацію радіонуклідів ніж ті, що живляться на стовбурі або на поверхні землі. Не менше значення має і рівень метаболізму тварин. У тварин з високим рівнем метаболізму швидкість накопичення і концентрація радіонуклідів значно більша ніж у тварин з низьким рівнем обміну речовин.

Зокрема, саме за рахунок функціонування сапробної частини трофічного ланцюга пасовищного типу у легкодоступну для рослин форму переводиться значна кількість ^{137}Cs . За результатами польових експериментальних досліджень встановлено, що на 1 га пирійникового перелугу за середньої чисельності мишоподібних гризунів 60–80 особин на гектар за рахунок тварин-сапротрофів протягом року перерозподіляється близько 3,5 МБк ^{137}Cs .

Значення тварин як одного з депо накопичення радіонуклідів у біо- ценозі оцінюється тисячними частками процента від загальної кількості, що надійшли у навколишнє середовище. Роль тварин у горизонтальному перенесенні радіонуклідів може стати помітною лише в разі істотного локального підвищення K_n , щільності популяцій тварин або щільності випадань. З іншого боку, здатність тварин до міграцій, особливо міграцій птахів, ставить ряд запитань щодо перенесення радіонуклідів або до місць зимівлі восени, або до місць гніздування навесні. Саме зимові скупчення птахів можуть призвести до підвищення концентрації радіонуклідів за рахунок виведення з їх організму.

На території Центрального Полісся гніздують близько 90 видів мігруючих птахів. Головну ж групу мігрантів становлять птахи, які гніздують далі на північ і пролітають на зимівлю на південь Дніпровсько-басейновим міграційним шляхом і на південний захід широтним Приполіським шляхом (до 130 видів). Приблизна кількість птахів, що пролітають цими шляхами, складає близько 75 млн. особин, або ж 100 тис. особин щодобово через 1 км перерізу відповідного коридору.

Через територію зони відчуження Чорнобильської АЕС та її найближче оточення пролітають за сезон десятки мільйонів птахів загальною біомасою до 5–6 тис. т і затримуються на цій території, особливо восени, протягом кількох тижнів. Живлення птахів відбувається дуже інтенсивно: денний раціон складає близько 50% маси даної особини. Біомаса мігрантів у 100 разів перевищує масу місцевих птахів, їхня щільність відповідно становить 0,002 кг/м² (табл. 4).

Оцінка біомаси птахів, що перебувають постійно або тимчасово на території зони відчуження Чорнобильської АЕС (Л.І. Францевич та ін., 2001)

| Екологічна група (територія, км ²) | Характер перебування | Тривалість перебування, доби | Кількість особин, тис. | Сумарна біомаса, т |
|---|-----------------------------|------------------------------|------------------------|--------------------|
| Біляводні птахи (300) | Гніздуючі місцеві + приплід | 120–150 | 45 | 20–25 |
| | Пролітаючі навесні | 1–10 | 500–1500 | 250–750 |
| | Пролітаючі восени | 1–100 | 1500–2500 | 750–1250 |
| | Зимуючі | Нерегулярно | 0,01–10 | 0,5–50 |
| Лісові і степові птахи (1500) | Місцеві види | 150-180 | 300 | 30 |
| | Весняні мігранти | 1-15 | 10000 | 1000 |
| | Кочівні | До 100 | 1500 | 150 |
| | Осінні мігранти | До 60–75 | 25000–30000 | 2500–3000 |
| | Зимуючі | 90 | 100–150 | 10–15 |

Розрахувати загальну кількість радіонуклідів, що виносяться дикими птахами за межі зони відчуження Чорнобильської АЕС, досить складно, оскільки до великої строкатості радіоактивного забруднення місцевості додається велика різноманітність видового складу, способу життя і живлення птахів, особливостей поведінки, сезону, статевих і вікових відмінностей, осілості тощо. Інтегральну оцінку активності, що її виносять мігранти, одержують як добуток трьох величин: $K_{\text{п}}$, щільності зоомаси для даної групи тварин і запасу радіонукліда на місцевості, припускаючи, що мігранти набувають такого ж рівня забруднення, що й місцеві птахи (табл. 5).

Річне винесення не перевищує сотень гігабеккерелів. Більша частина винесених радіонуклідів розпорошується у природі на південь і південний захід від місця аварії. Розсіяне по величезній території, це винесення навряд чи може істотно вплинути на радіаційну обстановку поза межами зони основного забруднення.

Оцінка винесення радіонуклідів перелітними птахами (Л.І. Францевич та ін., 2001)

| Параметр | Значення параметру для | |
|--|------------------------|-----------------------|
| | м'язів | скелету |
| Радіонуклід | ¹³⁷ Cs | ⁹⁰ Sr |
| $K_{\text{п}}$ | 0,0095 | 0,0107 |
| Щільність зоомаси, кг/м ² | 0,002 | 0,002 |
| Частина запасу в зоомасі | $1,9 \times 10^{-5}$ | $2,1 \times 10^{-5}$ |
| Запас нукліду у 40-кілометровій зоні, Бк | $1,33 \times 10^{16}$ | $3,15 \times 10^{15}$ |
| Запас нукліду в українській частині, Бк | $4,07 \times 10^{15}$ | $4,70 \times 10^{15}$ |
| Винесення нуклідів мігрантами, Гбк/рік | 75–250 | 67–100 |

Мисливсько-промислові птахи, що складають близько 15% маси у загальному потоці мігрантів, становлять об'єкт полювання і безпосередньо потрапляють до їжі людини. На осінньому прольоті в Україні відстрілюють до третини качок, тобто близько 300 т мігрантів через зону відчуження Чорнобильської АЕС, а за сезон полювання в середньому мисливці добувають 2 207 т, або 67,3% від загальної маси прольотних птахів.

Верхня оцінка кількості ^{137}Cs , що потрапляє в організм людини з м'ясом впольованих птахів, складає до 4–12 ГБк/рік, чому відповідає колективна еквівалентна доза 50–150 люд.-Зв. Необхідно підкреслити, що всі наведені оцінки є максимально можливими, оскільки отримані за припущення, що мігранти встигають набути тієї ж радіоактивності, що й місцеві птахи.

Якщо припустити, що радіоактивне забруднення із зони відчуження Чорнобильської АЕС виносять лише гніздувачі птахи, то внесок їх буде відповідно у 50 разів менше верхньої оцінки.

Поряд з глобальним явищем міграції птахів переміщення звірів менш помітні. Великі звірі (лось, косуля європейська, дикий кабан) переміщуються у пошуках укриття і кормових угідь лише на десятки кілометрів (окремі особини здатні подолати сотні кілометрів). Загалом на території обох частин зони відчуження – української і білоруської – біомаса копитних не перевищує 1600–3000 т. З них до зовнішніх міграцій схильні не більше 10%.

Може стати несподіваним той факт, що безхребетні також мігрують, особливо – комахи, причому маса комах-мігрантів іноді не поступається масі мігруючих хребетних. Так, травневі хрущі регулярно перелітають від місць виплоду до місць годівлі на відстань до кількох кілометрів. Біомаса травневих хрущів у роки масових розмножень перевищує 10 т/км². У багатьох видів бабок відомі масові перельоти на відстань до 60–70 км, їхня щільність у локальних місцях виплоду теж сягає 2–5 т/км². Втім, через обмеженість придатних для масового розмноження місць загальна біомаса перших сягає максимум 1–2 тис. т, других – декількох десятків тон.

Найпотужніше явище в міграціях тварин – переліт зграй сарани – не відбувався в останні десятиріччя через зміни агротехніки і завдяки інтенсивній боротьбі з цим шкідником в основних вогнищах. На території Київської області навали сарани регулярно спостерігалися, починаючи від першого літописного свідчення у 1099 р. до 1910 р. Останні локальні вогнища були відмічені у Чернігівській області у 1922 р.

Близько 2–5% комах (за біомасою) здатні до пошукових польотів звичайно на відстань декількох кілометрів. Зокрема, для комах, личинки яких розвиваються у воді, відбувається практично односпрямований потік речовини з води на суходіл на відстань близько 1 км. Враховуючи K_D прісноводних, який сягає до 100–250 за сухою речовиною, можна дійти висновку щодо значного винесення радіонуклідів на суходіл гідробіонтами. Винесення цим шляхом, наприклад зі ставу-охолоджувача Чорнобильської АЕС за концентрації ^{90}Sr і ^{137}Cs у воді 2–3 Бк/л радіоактивність комах може досягти 1 кБк/кг, а загальне винесення 200 МБк (Л.І. Францевич та ін., 2001).