

ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

УДК 629.039.58 + 004.942

О.В. КОВАЛЕНКО, О.О. КРЯЖИЧ

ІНФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ МІГРАЦІЇ ТРИТІЮ

***Анотація.** У статті подано інформаційну модель міграції техногенного тритію. Використано підхід опису просторів пов'язаних різномасштабних моделей стану системи та модель переносу у середовищі водонасичених ґрунтів. Досліджено питання розповсюдження тритію та його міграції за харчовими ланцюгами. Представлено алгоритм побудови інформаційної моделі міграції тритію. Наведено дані вимірів тритію у стічних водах, сніговому покриві та березовому соку. Зроблені висновки про можливе використання моделі.*

***Ключові слова:** ізотоп, міграція, модель, система, забруднення.*

Вступ

Біогеохімічний кругообіг речовин є основою самопідтримки функціонування навколишнього середовища. У природі всі елементи знаходяться в постійній міграції, що забезпечує розвиток живих організмів у біосфері. Різні рівні організації міграції радіоактивних речовин та їх хімічних сполук майже нічим не відрізняються від механізму міграції інших елементів. У більшості випадків деякі особливості міграції радіонуклідів обумовлені фізико-хімічними властивостями радіоактивного елемента.

Враховуючи те, що вода є основою всіх живих організмів, тривалий час особливою увагою в дослідженнях міграції елементів у біосфері користується водень та його ізотопи. Унаслідок ізотопного обміну важкі ізотопи водню можуть легко і швидко включатися у біохімічні процеси та заміщувати атоми водню на тритій. Зовнішнє опромінення β -елекtrонами тритію практично відсутнє. Проте основну частину своєї енергії β -електрони тритію витрачають на взаємодію з електронними оболонками атомів речовини середовища, в якому вони рухаються, що призводить до її іонізації. Бета-електрони тритію мають найвищу іонізаційну здатність у порівнянні з іншими ізотопами – 1900 пар іонів на 1 см проникнення. Основні фізико-хімічні властивості тритію

повністю аналогічні властивостям водню, тому живий організм не розрізняє, які атоми водню є присутніми аж до виникнення критичного стану організму.

Метою роботи є розробка інформаційної моделі міграції тритію в навколишньому середовищі.

Мета розкривається за допомогою наступних завдань:

- розглянути фізико-хімічні властивості водню та його ізотопів;
- дослідити особливості техногенної міграції тритію в навколишнє середовище та організм людини;
- представити та обґрунтувати інформаційну модель біогеоміграції тритію, на основі якої, в подальшому, можна розробити методи забезпечення територій від забруднення та певний програмний продукт для прогнозування можливого викиду техногенного тритію.

Дослідженню процесів міграції тритію у доквіллі присвячена значна частина роботи [1] за авторства В.В. Доліна, О.В. Пушкарьова, І.Ф. Шраменка та інших дослідників, деякі аспекти моделювання кругообігу тритію розглянуті в [2] Г.Д. Коваленком, В.В. Турбаєвським та В.А. Седневим [3]. Частково зазначена тематика була представлена у статтях [4–5], де були представлені підходи до моделювання події локального забруднення техногенним тритієм.

1. Фізико-хімічні властивості водню та його ізотопів

Міграція хімічних елементів, їх сполук та радіонуклідів відбувається внаслідок природних явищ – при паводках, пожежах, дощах, ураганах, повенях, снігопадах. Техногенна міграція виникає за наявності людського фактора – при небезпечних ситуаціях та аваріях на підприємствах, вибухах, скиді сміття, хімічній обробці полів. При цьому міграція радіонуклідів у доквіллі відбувається внаслідок ядерних випробувань, при роботі ядерних установок, підприємств ядерної енергетики, видобуванні і переробці урану, кам'яного вугілля, руди.

Техногенна міграція підсилюється природною міграцією, в результаті чого хімічні елементи, у тому числі і радіонукліди, переносяться вертикально при випарах вологи після дощу, зростанні дерев і так далі та горизонтально – за течією річок, вітром, потрапляння з водою у харчові ланцюги живих організмів з переміщенням далеко за межі забруднення.

Останнє є найцікавішим з точки зору розповсюдження ізотопу водню – тритію. Трофічні ланцюжки є рядом послідовних етапів, по яких здійснюється трансформація речовини і енергії в екосистемі. При забрудненні одного з ланцюгів радіоактивним ізотопом тритію відбувається міграція, яку дуже важко спрогнозувати і відслідкувати, навіть з врахуванням накопичення небезпечного елемента в живому організмі.

Проблема виявлення і прогнозування розповсюдження тритію у навколишньому середовищі полягає у фізико-хімічних особливостях водню, який знаходиться у доквіллі та організмі живих істот майже лише у вигляді сполук. Чистий водень у незначній кількості знаходиться в атмосфері і збільшується з висотою. Найпоширенішою сполукою водню є вода.

Водень H_2 є двохатомним найлегшим газом без кольору, запаху і смаку. Електронна конфігурація атому водню ($1s^1$) визначає його основні властивості. Атом має один електрон з $Z = (-1)$, який обертається по орбіті навколо ядра, що містить один протон з одиничною масою і позитивним зарядом (+1).

Процес віддачі електрону ріднить водень з металами, а маленька маса і розмір атомів обґрунтовують його здатність проникати через різні речовини.

Фізичні властивості водню найбільш яскраво проявляються особливостями речовин, до яких входять різні ізотопи водню. Зокрема, якщо до води замість найпоширенішого атому ^1H входить ^2H – його ізотоп з двома елементарними частинками (позитивною і незарядженою), то утворюється важка дейтерована вода. Тритій (T) ^3H має в ядрі два нейтрона і один протон, є радіоактивним елементом і, відповідно, утворює тритіровану воду. Тритій може розпадатися до моноатомного газу з випроміненням електрону і антинейтрино із свого ядра.

Основні фізико-хімічні властивості тритію за [1] наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Основні фізико-хімічні властивості тритію

Показник	Значення
Атомна маса	3,01605
Молекулярна маса	6,03210
Приблизний діаметр атома тритію, нм	0,11
Спін	1/2
Магнітний момент	2,975
Енергія зв'язку ядра, МеВ	8,1–8,4
Максимальна енергія β -частинок, кеВ	18,61
Енергія дисоціації T_2 до 2T , еВ	4,59
Іонізаційна енергія T до T^+e , еВ	13,55
Період піврозпаду, роки	12,34
Питома активність, ГБк/г	$3,59 \cdot 10^5$
Густина потужності, В/г	0,328
Густина активності (T_2 газ, 1 атм, 0°C), Бк/см ³	$9,5 \cdot 10^{10}$
Густина активності (T_2 газ, 1 атм, 25°C), Бк/см ³	$8,7 \cdot 10^{10}$

Завдяки високому коефіцієнту дифузії, тритій легко проникає крізь пористі матеріали, а також метали, з утворенням тритидів металів. Різна глибина проникнення β -частинок обумовлена їх різною енергією (табл. 2) [1].

Таблиця 2 – Глибина проникнення β -частинок тритію

Матеріал	E (β), кеВ	Глибина проникнення
T_2 , газ, стандартні умови (0°C , 101 325 Па)	5,7	0,24 см
T_2 , газ, стандартні умови	18,6	3,2 см
Повітря, стандартні умови	5,7	0,036 см
Повітря, стандартні умови	18,6	0,45
Вода, м'які тканини, масла	5,7	0,42 мкм
Вода, м'які тканини, масла	18,6	5,2 мкм
Нержавіюча сталь	5,7	0,06 мкм

І хоча електронна конфігурація тритію аналогічна конфігураціям дейтерію і протію, хімічні властивості мають деякі відмінності, що обумовлено різницею атомних мас. Ця електронна конфігурація сприяє і легкому обміну з атомом водню органічної молекули. А враховуючи те, що атоми водню

містяться майже всюди, атоми тритію легко заміщують атоми протію або дейтерію і утворюють тритіровані молекули.

Тритій може існувати у вигляді молекулярного тритію T_2 , утворювати молекули прототритію HT з іншими ізотопами, дейтеротритію DT , існувати у формах оксидів тритію DTO , HTO , T_2O , TMe та органічно зв'язаного тритію O_3T .

Найактивнішими є водні форми. А найбільш розповсюдженим виступає оксид тритію HTO , що утворюється з тритій-газу в результаті обмінних реакцій з водою чи окислення.

2. Техногенна міграція тритію в навколишнє середовище та організм людини

В Україні діють п'ять АЕС та п'ять регіональних сховищ радіоактивних відходів, серед яких сховища Харківського та Київського спецкомбінатів, які мають високий рівень зносу та виступають найбільшими вмісниками тритію. Після аварії на Чорнобильській АЕС у навколишнє середовище потрапило близько 10^{14} Бк тритію. Крім того, в країні працюють наукові лабораторії та підприємства, які у своїй роботі використовують та викидають тритій у вигляді оксидів або тритій-газу.

Взаємодія ізотопу водню тритій-газу з заміщенням атомів водню у відкритій воді і повітрі відбувається за хімічним рівнянням обміну з вивільненням водню та утворенням оксиду тритію:



Реакція відбувається в обох напрямках за відповідної температури в межах $(16-20,2)^\circ C$. Частина HTO може утримуватися у насиченому парі, що утворюється над поверхнею води або ґрунту.

Водна та парова фаза оксиду тритію легко вбирається рослинами та просочується в ґрунтову вологу. Далі, за трофічними ланцюгами, тритій проходить до організму людини, де при тривалому впливі може накопичуватися або виділятися з передачею в повітря, до води та іншим живим істотам.

Наявні моделі переносу тритію здебільшого представлені у площині водного середовища та водонасичених ґрунтах і потребують детальних розрахунків по гідрогеології досліджуваного елементу. Наприклад, у процесі аналізу концентрації тритію розробками МАГАТЕ використано спрощений підхід з використанням функції Гріна [6], завдяки чому визначається концентрація тритію як функція від часу і простору при точковому використанні ін'єктування тритію. Концентрація тритію при горизонтальній координаті x від початку потоку й глибині z при часі t визначається рівнянням:

$$c(x, z, t) = \int \int g_1(\xi, \tau; x) g_3(\xi, \tau; z) \exp(-\lambda \tau) d\xi d\tau \quad (1)$$

де g_1 , g_3 – функції Гріна для горизонтального та вертикального переміщення; τ – час від початку скидання, с; ξ – відстань від джерела до елементу $d\xi$ (точки скиду), м. Крім того, функція g_1 описує необмежене горизонтальне переміщення тритію, а функція g_3 – переміщення тритію у вертикальному напрямку, але має обмеженість за висотою пористопружного насиченого рідиною середовища (ПНРС).

У цьому випадку слід врахувати параметри ґрунтів. Для цього пропонується використовувати ступені зв'язаності між твердою і рідкою фазами ґрунту – граничні випадки ПНРС [6]. Середовище «без зв'язків» буде характеризуватися тим, що рідина вільно циркулюватиме між зернятами твердої фази ґрунту. Прирошення напруги, яке виникає при проходженні пружних хвиль ПНРС, не буде змінювати напруги заповнювача, а відбиватиметься тільки на скелеті середовища (це маловологі середовища піску або пісковика). У середовищі «з довершеними зв'язками» заповнювач не може циркулювати у порах і виштовхуватися з них під тиском динамічної напруги (глини, вапняки). Розрахунки для граничних випадків середовища «без зв'язків» та середовища «з довершеними зв'язками» можуть проводитися на основі моделі пружного однорідного напівпростору з відповідним коефіцієнтом Пуассона матеріалу основи [6].

Запропоноване можна обґрунтувати математичною залежністю взаємодії двох різнорідних середовищ [6]. Так, використовуючи теорію взаємодії багатофазових середовищ, можна представити рівняння руху для твердої та рідкої фази у деякому контурі (тунелі, трубі) без врахування об'ємних сил:

$$\begin{aligned} \rho_1 \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} &= \frac{\partial \sigma_{ij}^s}{\partial x_i} - W_j \\ \rho_2 \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} &= \frac{\partial \sigma^f}{\partial x_i} - W_i, \end{aligned} \quad (2)$$

де u_i , U_i – компоненти векторів переміщення твердої та рідкої фаз відповідно; $\rho_1 = (1 - m)\rho_s$; $\rho_2 = mp_f$; ρ_s – густина твердої фази; p_f – густина рідкої фази; m – пористість; σ_{ij}^s – тензор напружень у пружному скелеті (трубі) при проходженні рідини; σ^f – сила, що діє на рідину; t – час; x – координата; W_i – міжфазова сила взаємодії при просуванні рідини у трубі. Ця сила фільтраційного тертя включає складову, що визначається в'язкими силами на міжфазовій поверхні, та пов'язана з інерційними силами, які обумовлюють прискорення фаз відносно одна одної.

За умов, коли на двофазну систему взаємодії двох різнорідних середовищ діє ряд сил на межах їх розділу, на межі взаємодії двофазного середовища та твердого тіла, а також взаємодії твердої та рідкої фази середовища, можна представити взаємодію всіх сил на систему наступною моделлю:

$$\dot{T} + \dot{W} + 2D = \int_s (\sigma_{ij}^s \dot{u}_i + \sigma^f \delta_{ij} \dot{U}_i) n_j dS, \quad (3)$$

де в лівій частині виразу – сума кінетичної та потенціальної енергії двофазної системи з врахуванням функції дисипації в одиниці об'єму, а поверхневий інтеграл в правій частині – робота всіх сил, що діють на двофазну систему.

За зазначеною моделлю (3) враховується обмеження тиску в рідкій фазі середовища системи. Це у підсумку дозволяє визначати коефіцієнти зрушення твердої фази відносно рідкої фази, тобто, визначити товщину створення певного шару твердої фази, що виштовхує, наприклад, тритієву воду з-під землі на поверхню, звідки вона потрапляє до рослин та організмів тварин, а також випаровується. Ці процеси вже частково були представлені в роботах [4–5, 7].

Таким чином, прослідковується процес перенесення ізотопів техногенного тритію, що у результаті аварійної ситуації потрапили у ґрунтові води. З цього моменту слід враховувати, що живий організм мешкає в деякому навколишньому середовищі, на яке впливають різні фактори. Існує багато моделей для розрахунку радіоактивних речовин в атмосфері, ґрунті, воді, але вони, в основному, торкаються міграційних проблем і не спрямовані на оцінку впливу на людину. Для вирішення задачі застосування системного підходу при дослідженні перенесення радіоактивних ізотопів у різних середовищах можна застосувати простори пов'язаних різномасштабних моделей стану системи [4], де підприємство, яке є небезпечне по викидах, представляється ділянкою площини $R, \Omega \subset R$ у адміністративно обмеженій території $\vec{r} \subset R$.

Простори, що моделюють стан системи, представляються у вигляді вектор-функцій стану підприємства, рівня забруднення, впливу на середовище, а також просторів операцій, що відбуваються у досліджуваній системі, можуть традиційно бути розглянутими, як контрзаходи на подію. Моделювання стану системи відбувається з акцентом керований режим функціонування підприємства, на повернення до якого і спрямовані зусилля осіб, що приймають рішення за ситуацією.

Перехід до цього режиму можна представити моделлю, за якою враховуються значення стану системи в конкретний момент часу:

$$\widetilde{R}_{tr}^+ : R_{os} \xrightarrow{U_{tr}} R_{sd}, \quad (4)$$

де \widetilde{R}_{tr}^+ – керований режим функціонування, який обумовлений множиною керуючих параметрів U_{tr} системи управління безпекою, які протягом періоду \widetilde{T}_{tr}^\pm призводять до переходу нештатного режиму R_{os} до штатного режиму R_{sd} . Це, фактично, вже динамічна модель, за якою узгодження за простором і часом досягає критичного моменту для достовірності ситуації, що моделюється.

До людського організму радіоактивні речовини надходять через дихальні шляхи, кишково-шлунковий тракт і шкіру. Через шкіру серед усіх ізотопів найбільш легко проникає тритій, який також потрапляє через органи травлення з водою, а при випаровуванні забрудненої тритієм води разом із повітрям надходить до органів дихання [8].

За характером розподілу ізотопів водню і вуглецю в організмі людини мікробіальний метан, який утворюється в процесі CO_2 редукції, відрізняється від метану, що виділяється в результаті ферментації ацетату. Проте конкретна роль активних організмів у фракціонуванні ізотопів водню не встановлена. Ізотопний склад водню і кисню, що в процесі фотосинтезу переходять до вуглеводів рослин із води, практично повністю визначається ізотопним складом води. Ізотопи водню фракціонуються під час перебігу процесів випаровування-конденсації води.

Виведення 3H з рослин визначається процесом водообміну. Основний період напіввиведення, характерний для 90% виведення водної форми тритію НТО, практично не залежить від кліматичних умов і коливається від декількох годин до (10–20) діб.

3. Модель біогеоміграції тритію

У роботі [1] наведена модель міграції НТО в системі атмосфера-рослина-грунт. Безумовно, позитивною стороною наведеної моделі є її базування на засвоєнні водної і парової фаз НТО рослинами з врахуванням горизонтальної та вертикальної міграції іонів тритію.

Зазначена модель орієнтована на те, що понад 90% водню асимілюється переважно рослинами. Тобто, основним утримувачем НТО виступають рослини. Проте рослини виступають лише частиною трофічного ланцюга, на вершині якого стоїть людина, як споживач не лише їжі рослинного та тваринного походження, а й води і повітря.

Є робота [9], в якій обґрунтовується модель, де людина виступає засобом переносу радіонуклідів тритію до інших людей, що не підпали під вплив викиду небезпечної речовини, а також виносу ізотопу тритію у своєму організмі із зараженням чистих територій власного помешкання, членів своєї родини, сусідів, знайомих. Особливості такої моделі – накопичення тритію та його перетік до інших площин. Це близько до того, що можна описати просторами пов'язаних різномасштабних моделей стану системи, про що зазначалося вище та досліджувалося у роботах [4–5, 7–8].

Враховуючи все викладене, схематично кругообіг тритію у навколишньому середовищі можна представити у вигляді схеми (рис. 1).

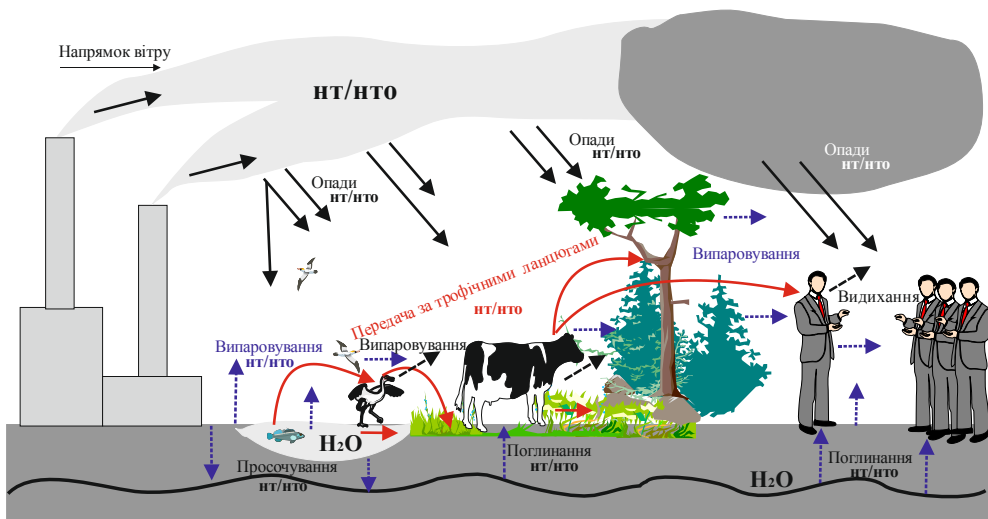


Рис. 1 – Кругообіг тритію в навколишньому середовищі

Схему (рис. 1) можна продемонструвати на прикладах. В табл. 3–5 наведені результати вимірів питомої активності тритію у скидних водах за період з лютого по листопад, у талій воді снігового покриву у лютому та у соку берез у березні 2014 року. Проби відбиралися у точках виміру, встановлених для підприємства, що використовує тритій у своїй діяльності.

Як можна помітити з табл. 3, активність тритію зростає в період танення снігу та навесні і восени, у дощовий період, що обумовлено додатковим проникненням у навколишнє середовище вод, що утримують НТО, з атмосфери та з поверхні ґрунту і рослин. Це можна підтвердити, аналізуючи

табл. 4, де представлена питома активність тритію у талій воді снігового покриву. Погода на дату відбору зразків (10.02.2014) була наступною: вночі температура не опускалася нижче 0°C, вдень складала +4°C. В перші дні лютого 2014 року температура була морозною, але вже 5 лютого вдень відбулося потепління (+5°C) з пониженням вночі (-8°C). З 7 лютого почалося потепління і температура вдень коливалася в межах 2–5°C. Тобто, на дату відбору розпочалося активне танення снігу.

Таблиця 3 – Питома активність тритію у скидних водах у 2014 р., Бк/л

№ п/п	Дата відбору	Вода (500 м від точки викиду тритію)	Погодні умови
1	06.02	321,1 ± 11,5	температура 0°C, вітер 6 м/с, південний, вологість повітря 71%, хмарно
2	03.03	223,4 ± 12,3	температура +3°C, вітер 4 м/с, північно-східний, вологість повітря 89%, мокрий сніг
3	01.04	590,9 ± 16,2	температура +7°C, вітер 7 м/с, північний, вологість повітря 34%, ясно
4	06.05	400,9 ± 12	температура +12°C, вітер 7 м/с, західний, вологість повітря 44%, ясно
5	06.06	78,1 ± 4,0	температура +26°C, вітер 5 м/с, північно-західний, вологість повітря 36%, ясно
6	27.06	70,9 ± 4,0	температура +21°C, вітер 6 м/с, північно-західний, вологість повітря 65%, дощ
7	30.07	88,4 ± 4,4	температура +33°C, вітер 4 м/с, південно-східний, вологість повітря 23%, ясно
8	03.10	156,1 ± 6,1	температура +15°C, вітер 2 м/с, північно-східний, вологість повітря 37%, ясно

Таблиця 4 – Питома активність тритію у талій воді снігового покриву у 2014 р.
Дата відбору зразків 10.02.2014 р.

№ точки відбору	Питома активність, Бк/л	№ точки відбору	Питома активність, Бк/л
Об'єкт А		Об'єкт В	
1	136,4 ± 5,9	1а	185,8 ± 7,2
2	138,9 ± 6,0	2а	144,2 ± 7,6
3	145,8 ± 6,0	3а	210,1 ± 7,8
4	154,4 ± 6,0	4а	220,9 ± 8,2
5	156,4 ± 5,9	5а	249,5 ± 8,2
6	170,1 ± 6,6	6а	230,7 ± 8,5
7	150,6 ± 6,2	7а	159,5 ± 6,5
8	163,6 ± 6,5	8а	183,3 ± 7,3
9	128,7 ± 5,5		
Реперна точка (відстань – 30 км)		–	74,5 ± 5,2

Враховуючи, що після танення снігу і активного просочування талих вод у ґрунт починається активний рух соку дерев, цікавим є спостереження питомої активності тритію у березовому соку (табл. 5).

Таблиця 5 – Питома активність тритію у березовому соку, Бк/л.
Дата відбору зразків 26.03.2014 р.

№№ точок відбору	Об'єкт А (20 м)	Об'єкт В (50 м)	Об'єкт С (100 м)
1	124,3 ± 5,5		
2	121,3 ± 6,8		
3	117,1 ± 5,3		
4		89,3 ± 4,6	
5		86,1 ± 4,5	
6		66,6 ± 4,0	
7			61,6 ± 4,1
8			85,7 ± 6,9
Реперна точка (відстань – 20 км) – 55,8 ± 3,3			

Хоча, виходячи з даних табл. 3–5, питома активність не перевищує припустимі показники, у порівнянні з реперною точкою по березовому соку у реперній точці на відстані 20 км від об'єктів дослідження (табл. 5), слід дослідити рух тритію в навколишньому середовищі на проміжку сніг – вода – березовий сік.

Для того, щоб побудувати цілісну картину міграції тритію в навколишньому середовищі, слід проаналізувати не лише процес руху НТО з атмосфери в гідросферу і через воду – до живого організму, а й розглянути обмін НТО живого організму з навколишнім середовищем та іншими живими організмами. Інформаційну модель такого дослідження можна побудувати за умов реалізації наступного алгоритму (рис. 2).

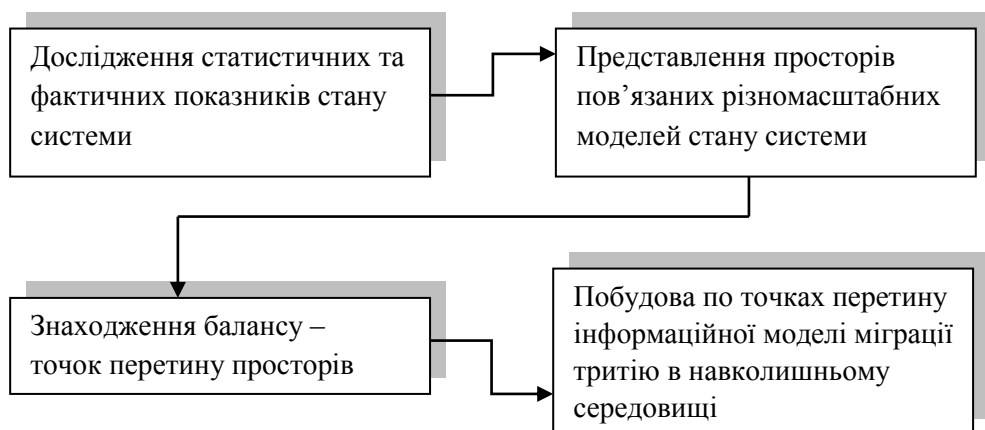


Рис. 2 – Побудова інформаційної моделі міграції тритію

Перехід до формалізованої моделі міграції тритію можливий за умов опису таких просторів стану системи, як:

- опис зони можливого розсіювання радіонуклідів при аварійному викиді;
- моделювання поглинання НТО рослинністю, тваринами і людиною на території імовірного забруднення;
- просочування і випаровування НТО в залежності від складу ґрунтів і особливостей руху ґрунтових і наземних вод;
- моделювання обмінних процесів в навколишньому середовищі;
- вимірювання концентрації НТО в повітрі робочих приміщень підприємства, що небезпечно за викидами тритію;
- контроль забруднення організму працівників підприємства та моделювання стану на основі отриманих даних;
- вимірювання концентрації НТО в житлових приміщеннях працівників підприємства, що працюють з тритієм;
- контроль рівня тритію в організмі тих, хто оточує працівника підприємства, що працює з тритієм (люди, тварини, рослини);
- опис динаміки руху радіонукліду в залежності від погодних умов, пори року, інших можливих станів системи, що досліджується.

Висновки

Враховуючи те, що тритій потрапляє в організми живих істот здебільшого за харчовим ланцюгом, а до людини – ще й через шкіру, моделювання розповсюдження і накопичення тритію необхідно проводити системно, через простори станів середовища, враховуючи особливості як середовища та живих організмів, так і поведінку радіонукліда за різноманітних умов. Лише тоді можна отримати цілісну картину розповсюдження тритію деякою територією та визначити вплив на біосферу.

У роботі запропонована описова інформаційна модель кругообігу тритію в навколишньому середовищі, яка побудована на основі статистичних спостережень та моделей переносу радіонукліду у воді, повітрі, ґрунті та за харчовими ланцюгами.

Інформаційна модель кругообігу тритію може бути використана при розробці програмних продуктів для моделювання стану навколишнього середовища у разі забруднення ізотопами тритію.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Долін В.В., Пушкарьов О.В., Шраменко І.Ф. та ін. Тритій у біосфері. – К.: Науково-виробниче підприємство «Видавництво «Наукова думка» НАН України», 2012. – 224 с.
2. Коваленко Г.Д., Турбаєвський В.В. Деякі питання моделювання розповсюдження тритію в ґрунтових водах // Ядерні й радіаційні технології – 2004 – т. 4, № 3. – С. 46–52.
3. Коваленко Г.Д., Седнев В.А., Турбаєвський В.В. Накопичення і міграція тритію в районах розташування АЕС з реакторами ВВЕР // Ядерна і радіаційна безпека. – 2004. – № 2. – С. 47–53.
4. Коваленко О.В. Моделювання події радіоактивного забруднення тритієм / О.В. Коваленко // Технічні науки та технології : науковий журнал / Черніг. нац. технол. ун-т. – Чернігів: Черніг. нац. технол. ун-т, 2015. – № 1 (1). – С. 199–205.

5. Кряжич О.О., Коваленко О.В. Моделювання події радіаційного забруднення локальних територій в умовах невизначеності // Екологічна безпека та природокористування: Зб. наук. праць / М-во освіти і науки України, Київ, Нац. ун-т буд-ва і архіт., НАН України, Ін-т телекомунікацій і глобал. інформ. простору; редкол. О.С. Волошкіна, О.М. Трофимчук (голов. ред.) [та ін.]. – К., 2015. – Вип. 3 (19). – С. 100–112.
6. Динамика пористоупругих насыщенных жидкостью сред / А.Н. Трофимчук, А.М. Гомилко, О.А. Савицкий – К.: Наук. думка, 2003. – 230 с.
7. Коваленко О.В. Підходи до моделювання забезпечення безпеки від джерел техногенного тритію / О.В. Коваленко // Штучний інтелект: науковий журнал. – К., 2015, – № 1–2(67–68) – С. № 1–2(67–68) – С. 99–105.
8. Коваленко О.В. Моделювання міграції тритію в навколишньому середовищі / О.В. Коваленко // Математичне моделювання в економіці. – 2015. – № 2. – С. 51–64.
9. Баталин Ю., Кречетова А. Модель переноса трития в окружающую среду персоналом ядерных объектов / Юрий Баталин, Алена Кречетова // Journal of Environmental engineering and Landscape management. – 2004, Vol. XII, Suppl 1, 25–30.

Стаття надійшла до редакції 18.02.2016