

О. Л. Шевченко

Київський національний університет ім. Тараса Шевченка

E-mail: shevch_ol@mail.ru

Методика оцінки бар'єрної стійкості водозборів щодо забруднюючих речовин

(Представлено академіком НАН України В. М. Шестопаловим)

На прикладі Чорнобильської зони відчуження, з використанням геоінформаційних систем та статистичних методів доведено визначальну роль природних та техногенних характеристик ландшафту у формуванні вторинного радіоактивного забруднення поверхневих вод, об'ємів водного винесення радіонуклідів (^{90}Sr) та бар'єрної стійкості водозбірних басейнів. Представлено методику оцінки бар'єрної стійкості та моделювання сценаріїв її посилення для мінімізації водного винесення радіонуклідів за межі зон відчуження.

Ключові слова: водозбірні басейни, ^{90}Sr , чинники забруднення, водне винесення, бар'єрна стійкість.

У свій час дослідженнями в зоні відчуження ЧАЕС вдалось з'ясувати багато питань щодо процесів, форм, закономірностей міграції радіоактивних речовин тощо. Однак найголовніші проблеми залишаються практично не вирішеними. Це захист від розподіленого радіоактивного забруднення поверхневих і підземних вод та прогнозування концентрації і винесення радіонуклідів поверхневим стоком. Якщо для підземних вод існує поняття захищеності від забруднення [1], то для поверхневих — чіткі критерії відсутні. Оціночною шкалою для цього може стати градація за ступенем *бар'єрної стійкості всієї площі водозбору* відкритого водотоку.

В результаті Чорнобильської катастрофи розподіл початкового радіоактивного забруднення по поверхні, а з плином часу — і по розрізу зони аерації, відбувся вкрай нерівномірно, що значно ускладнило прогнозування забруднення водотоків. Після переважного виходу ^{90}Sr із твердофазної матриці, його поведінка значною мірою підпорядковується природним геохімічним (термодинамічним) законам і близька до поведінки стабільних типоморфних елементів (Fe) [2]. Цю поведінку та надходження радіонуклідів у ґрунтові води на усій площі їх інфільтраційного живлення визначає біогеохімічна обстановка середовища міграції, тобто ті ознаки ландшафту та всього водозбору, які у певній ґрунтово-кліматичній зоні залишаються довгий час стабільними. Отже, під час побудови прогностичних моделей водного винесення радіонуклідів до уваги слід приймати *ландшафтно-геохімічні умови на всій площі водозбору водотоку*. А кількісно оцінювати вплив кожного з ландшафтних чинників на водне винесення слід не через визначення геохімічних констант або параметрів міграції в межах безлічі однорідних ландшафтних одиниць, а шляхом встановлення кореляційних зв'язків між значеннями цього чинника, що відповідають характеру його поширення на площі кожного водозбору, і винесенням у статистично значущій виборці (по 9–12 малих водозбірних басейнах).

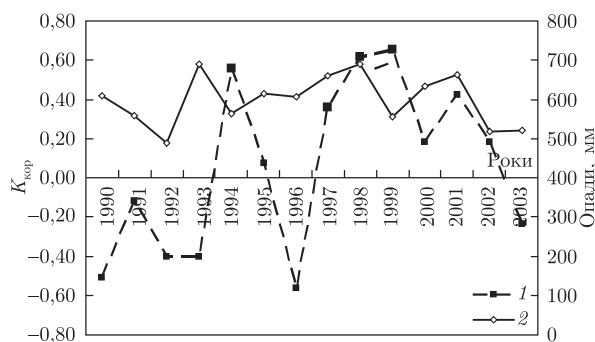


Рис. 1. Характер хронологічної залежності винесення ^{90}Sr від ступеню меліорованості водозборів (1) у співставленні із кількістю опадів (2) ($N = 9$)

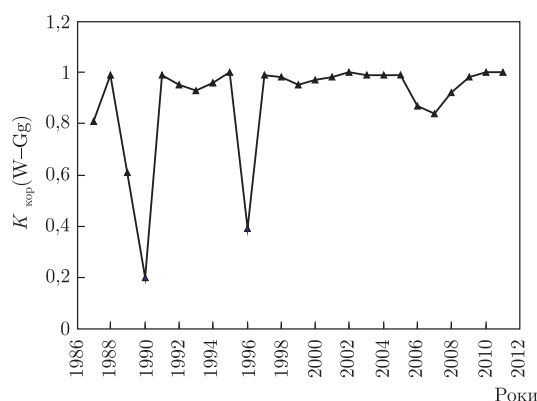


Рис. 2. Зміни характеру впливу щільності гідрографічної мережі (Gg) на винесення ^{90}Sr (W) за період після аварії на ЧАЕС ($N=11$)

Індивідуальні ландшафтні ознаки басейнів віднесемо до відносно стабільних або *сталих* чинників (щільність гідрографічної мережі, кількість западин, тип ґрунтів, площа лісу тощо). Більш *динамічні* зовнішні (метеорологічні) та внутрішні (гідрологічні: характер повені, річний поверхневий стік, хімічний склад поверхневих та ґрунтових вод, а також їх рівень, стан русла) чинники обумовлюють суттєву мінливість об'ємів винесення з одного басейну в різні роки. Для вивчення ролі і ступеню впливу динамічних чинників слід порівнювати їх значення по роках із відповідними значеннями винесення для кожного із басейнів окремо, а для оцінки сталих характеристик басейнів — порівнювати вибірку значень винесення з кількох басейнів ($N \geq 9$) із вибіркою відповідних ландшафтних показників окремо за кожен рік спостережень (рис. 1, 2). Причини часової мінливості коефіцієнтів кореляції визначаються за допомогою *ретроспективного аналізу* хронологічних графіків [3] та наукової інформації щодо можливих трансформацій забруднюючої речовини [4, 5].

Таким чином, головною метою розробки нової методики є *оцінка бар'єрних функцій* водозбірних басейнів та можливостей їх посилення для мінімізації водного винесення забруднюючих речовин за межі зон відчуження. Додатково, за різкими змінами коефіцієнтів кореляції на хронологічних графіках зв'язку винесення з його чинниками, встановлюються екстремуми (переломні фази) масових змін фізико-хімічного стану забруднювача.

Бар'єрною функцією водозбору будемо називати сукупну утримуючу дію його природних (а іноді й антропогенних) ландшафтних чинників по відношенню до радіонукліда

(або іншого забруднювача). Бар'єрні функції визначаються здатністю водозбору утримувати максимальну кількість забруднюючої речовини в багатоводні періоди [2]. Техногенне порушення цих функцій (наприклад, шляхом облаштування додаткової дренажної мережі) може викликати збільшення водного винесення радіонуклідів (див. рис. 1, 2), тобто посилення мобілізаційних функцій.

Отже *обсяги водного винесення радіонуклідів* відображають природну бар'єрну (утримуючу) стійкість водозборів або ступінь її порушення. Про високу бар'єрну стійкість водозбору свідчить мінімальна кількість винесеної під час високої повені активності (з урахуванням запасу радіонукліду на водозборі). Бар'єрну стійкість формує комплекс природних ландшафтно-геохімічних та техногенних характеристик водозбірної басейну, які слід оцінити кількісно. Показником такої оцінки бар'єрної стійкості може бути відношення фактичного водного винесення (W , ГБк/рік) до запасів радіонукліду на водозборі (Z_{Sr} , ГБк) (тобто частка винесення b , %) і/або модуль винесення (M_B) (табл. 1), що являє собою відношення W до площі водозбору водотоку (F , км²) [6]:

$$M_B = \frac{W}{F} = \frac{\sum_{i=1}^{365} Q \cdot C \cdot 86400}{F}, \quad (\text{ГБк/рік/км}^2), \quad (1)$$

де Q — витрати водотоку, м³/с; C — об'ємна активність води, кБк/м³.

Ці показники між собою тісно пов'язані рівнянням (1), а в нашому випадку ще й мають ступінь зв'язку (коефіцієнт кореляції) 0,98–1,0, тобто їх коливання цілком синхронні [6]:

$$b = \frac{W}{Z_{Sr}} \cdot 100\%. \quad (2)$$

Для градування M_B можна використати модуль гранично допустимої концентрації ($M_{ГДК}$) [6] (табл. 1). Позитивне значення різниці M_B і $M_{ГДК}$ (рівняння (3)) демонструє перевищення нормативів радіаційної безпеки і вичерпання бар'єрних функцій водозбору, від'ємне — свідчить про задовільний рівень забруднення та/або перевагу бар'єрних функцій над мобілізаційними. Отримане значення різниці модулів назовемо модулем бар'єрних та мобілізаційних функцій ($M_{БМ}$), що засвідчує перевагу утримання або мобілізації радіонукліду:

$$M_{БМ} = M_B - M_{ГДК}, \quad \text{де} \quad M_{ГДК} = ГДК \cdot Q/F, \quad (3)$$

де Q — річковий стік, м³/рік.

Таблиця 1. Граничні значення модулів винесення ⁹⁰Sr, які визначають різну бар'єрну стійкість водозбірних басейнів

Діапазон значень M_B , ГБк/рік/км ²	Бар'єрна стійкість басейну
< 0,03	Дуже добра
0,03–0,05	Добра
0,05–0,1	Середня (прийнятна), при $M_{ГДК} = 0,1$
0,1–1,0	Задовільна
1,0–3,0	Незадовільна
3,0–8,0	Дуже незадовільна (необхідні коригуючі заходи: розчищення русел, відокремлення бокових каналів, ліквідація підпірних споруд тощо)
> 8,0	Надзвичайно слабка і небезпечна, така що вимагає негайного втручання

Звичайно, на перших етапах забруднення M_b для всіх басейнів може бути значно вищим за $M_{ГДК}$, але за тим, наскільки стрімко $M_{бм}$ набуває від'ємних значень, тобто відбувається депонування або виведення забруднювача в геологічне середовище (розсіювання без відчутного збільшення водного винесення) можна судити про ступінь порушення бар'єрної стійкості водозбору.

Алгоритм методики. Природна бар'єрна функція водозбору може бути кількісно оцінена в балах, які еквівалентні впливу (коефіцієнту кореляції) кожного з ландшафтно-геохімічних чинників на водне винесення радіонукліда з водозбору. Підсумкова бальна оцінка, розроблена за принципами кваліметрії, виражає результат протидії бар'єрної та мобілізаційної функцій. Вона виконується за показником *бар'єрної стійкості* (добра — сума балів > 15 , достатня — $10 \dots 15$, середня — $0 \dots 10$ і т. д.) (табл. 2). Природна (за набором природних ландшафтних характеристик) та порушена (з врахуванням меліорованості водозбору, зарегульованості гідрографічної мережі тощо) бар'єрна стійкість оцінюються окремо. Такий підхід до оцінки бар'єрної стійкості водозборів можна порівняти із принципами індексно-рейтингових методів оцінки захищеності або вразливості підземних вод до забруднення [1]. Для реалізації даної методики зручно застосовувати *басейновий підхід* за наявності не менше 9 досконало вивчених водозбірних басейнів, які лежать в одній ландшафтно-кліматичній зоні (для того, щоб можна було нехтувати або прирівнювати вплив метеорологічних чинників).

Головні етапи реалізації методики. Оцінка бар'єрної стійкості водозбірних басейнів за алгоритмом “обґрунтування та кількісне визначення радіоекологічних показників бар'єрної стійкості → бальна оцінка ландшафтних чинників бар'єрної стійкості за ступенем впливу на ці показники” передбачає такі етапи:

збір інформації про винесення радіонукліда водотоками за окремі роки впродовж усього часу після його надходження на поверхню водозбору (не менше 15 років);

оцінка зв'язку між динамічними чинниками (обсяги стоку, кількість опадів) та водним винесенням радіонукліда за весь період спостережень та по окремих етапах;

виділення границь водозбірних басейнів, визначення їх площі; оцінка запасів радіонукліда в межах окремих басейнів;

визначення *показника* (вибрано модуль і частку винесення радіонукліда) для порівняння і диференціації утримуючих здатностей водозборів за небезпекою винесення забруднювача;

вибір провідних *сталих чинників* бар'єрної стійкості та винесення — характерних ознак ландшафту; класифікація цих ознак у межах виділених басейнів; параметризація і кількісна оцінка цих чинників (відносна площа, щільність, кількість тощо);

проведення парного кореляційного аналізу по окремих роках для вибору найбільш інформативних чинників винесення забруднювача; побудова хронологічних графіків змін коефіцієнтів кореляції з виділенням періодів максимального впливу чинника на винесення; вибір пріоритетних чинників впливу для кожного виділеного етапу;

виконання множинного кореляційного аналізу та вибір пріоритетних чинників або групування чинників для кожного виділеного етапу; побудова регресійних моделей з використанням вибраних чинників в якості незалежних предикторів;

епігнозне та прогнозне моделювання за формулами регресії;

вибір найбільш безпечних за радіаційними показниками режимів стоку шляхом підбору сталих та динамічних чинників впливу на винесення та концентрацію радіонуклідів;

формування системи оціночних балів для чинників впливу на водне винесення радіонукліда та визначення бар'єрної стійкості водозбірних басейнів за сумою балів.

Таблиця 2. Бальна оцінка порушеної бар'єрної стійкості водозбірних басейнів із врахуванням антропогенних надбудов

№	Водозбір	Сума балів по природних ландшафтних характеристиках	Площа меліоративних систем, км ²	Меліорваність		Щільність гідромережі		Зарегульованість*			Сума балів із врахуванням антропогенних чинників	Бар'єрна стійкість
				%	Бал (-22)	км/км ²	Бал (-26)	%	Бал для року 20-30% водності	Бал для року високої водності (< 15%)		
1	р. Глиниця	9	14,37	16,4	-5	0,58	-3	33	0	-2...-5	1	Середня
2	р. Сахан	16	80,92	40,7	-12	1,10	-10	32	0	-2...-5	-6	Задовільна
3	Каналу МК-1	4	72,34	62,2	-17	1,05	-10	54	-2	-4...-10	-25	Слабка
4	До прорану в дамбі № 7	-16	52,41	81,2	-20	2,09	-20	96	-3	-6...-13	-59	Незадовільна
5	МК-2 о.с. Усів	-25	3,85	84,1	-21	3,01	-26	91	-3	-5...-12	-75	Дуже незадовільна і небезпечна
6	МК-7 Прип'ятської о.с.	-17	15,19	73,0	-19	2,37	-25	72	-2	-4...-11	-63	-4-
7	МК-1 о.с. Усів	-27	8,44	84,6	-21	2,23	-24	89	-2	-5...-12	-74	-4-
8	МК-5 Прип'ятської о.с.	-6	15,21	78,5	-20	2,67	-26	74	-2	-4...-11	-54	Незадовільна
9	МК-6 Прип'ятської о.с.	5	9,72	99,5	-22	2,39	-25	98	-3	-6...-13	-45	Незадовільна
10	р. Брагінка	-6	95,23	27,5	-7	1,501	-15	40	1	-3...-5	-27	Дуже слабка
11	р. Ілля	11	55,97	14,2	-2	0,778	-4	27	2	0...-2	7	середня

Примітка: о.с. — осушувальна система, МК — магістральний канал; (-22) — максимальна кількість балів для даного показника, * — у даному випадку прийнято бал для 25% забезпеченості.

Окремі результати. На хронологічних графіках мінливості коефіцієнтів кореляції (R) між винесенням ^{90}Sr та ознаками ландшафту проявляються достатньо *різкі зміни значень* R , починаючи з 1997 р.: 1997 — з гідрографічною мережею, 1999 р. — з відносною площею сухих западин, 2000 р. — з рН ґрунтів, 2004 р. — з відносною площею лісу, що дає підстави казати про масовий якісний перехід форм цього радіонукліда до більш мобільного стану. Тобто *завершення деструкції (переважної більшості) паливних частинок* визначається термінами 1999–2004 рр.

Осушувальна мережа та став-охолоджувач ЧАЕС значно знижують стійкість водозборів до водного винесення радіонуклідів і мають більший вплив на винесення ніж природні чинники (див. табл. 2), що впливає з більших значень позитивних коефіцієнтів кореляції винесення ^{90}Sr з техногенними чинниками. За меліорованості порядку 40% стійкість водозбору р. Сахан погіршується в 3,7 рази і переходить із доброї у задовільну. За меліорованості від 60 до 70% стійкість водозбору зменшується від середньої із позитивним балом до слабкої із від'ємним балом; коли ж меліорованість більша 70%, бар'єрна стійкість погіршується до незадовільної і дуже незадовільної та небезпечної, що відбивається на стабільно підвищеному винесенні ^{90}Sr .

Меліорованість на рівні 10–20% суттєво не впливає на бар'єрну стійкість, яка може залишитись на тому ж якісному рівні (басейн р. Глиниці без врахування ставу-охолоджувача).

Зниження стійкості добре проявляється через модулі винесення і, особливо, через зміни з часом модуля бар'єрних та мобілізаційних функцій щодо ^{90}Sr . На водозборах з достатньою і середньою природною стійкістю інтенсивність зменшення винесення ^{90}Sr більша, ніж на водозборах із слабкими та дуже слабкими природними бар'єрними функціями. Перехід до від'ємних значень $M_{\text{бм}}$ відбувається в першу чергу на тих водозборах, де сума балів, що визначають природну бар'єрну стійкість, більша 10, а меліорованість менша 20%, причому, *практично незалежно від ступеню радіоактивного забруднення*. Це свідчить про більше поширення та ефективну дію утримуючих чинників на таких водозборах, а можливо й більші об'єми надходження менш забруднених ґрунтових вод. Очевидно, що більша природна стійкість водозбору р. Сахан (див. табл. 2) значно зменшується при врахуванні техногенних чинників саме за рахунок більш високої меліорованості та щільності гідромережі, порівняно із водозбором р. Ілля, для якого значення стійкості дорівнює 11. Скоріш за все, що саме із цим пов'язано для нього запізнення переходу до від'ємних значень $M_{\text{бм}}$ (див. рис. 3, б). Отже швидкість досягнення прийнятних $M_{\text{бм}}$, коли концентрація ^{90}Sr у поверхневому стоці менша за ГДК, обернено пропорційна меліорованості та щільності гідромережі, що дозволяє прогнозувати терміни виходу значень винесення ^{90}Sr на безпечний рівень.

Визначений через коефіцієнти кореляції вплив тих чи інших ландшафтно-техногенних чинників на винесення та регресійні рівняння використовуються для регулювання цих чинників і розробки рекомендацій щодо посилення бар'єрних функцій водозборів. Під час моделювання сприятливих сценаріїв винесення по рівняннях регресії, виявилось, що на 1999 р. збільшення частки стоку ґрунтових вод в загальному стоці до 35% для всіх магістральних осушувальних каналів (без збільшення обсягів стоку) могло б забезпечити значне зменшення (на 13–55%) винесення ^{90}Sr ; проте збільшення дренажності на 25%, тобто збільшення стоку, могло привести до зростання винесення на 3–10%. Зменшення щільності штучної гідромережі на 20% веде до зменшення винесення на 25–85% (по різних водотоках за сценарієм 1999 р.); збільшення відносної площі лісу до 50% — до зменшення на 5–44%. До дієвих

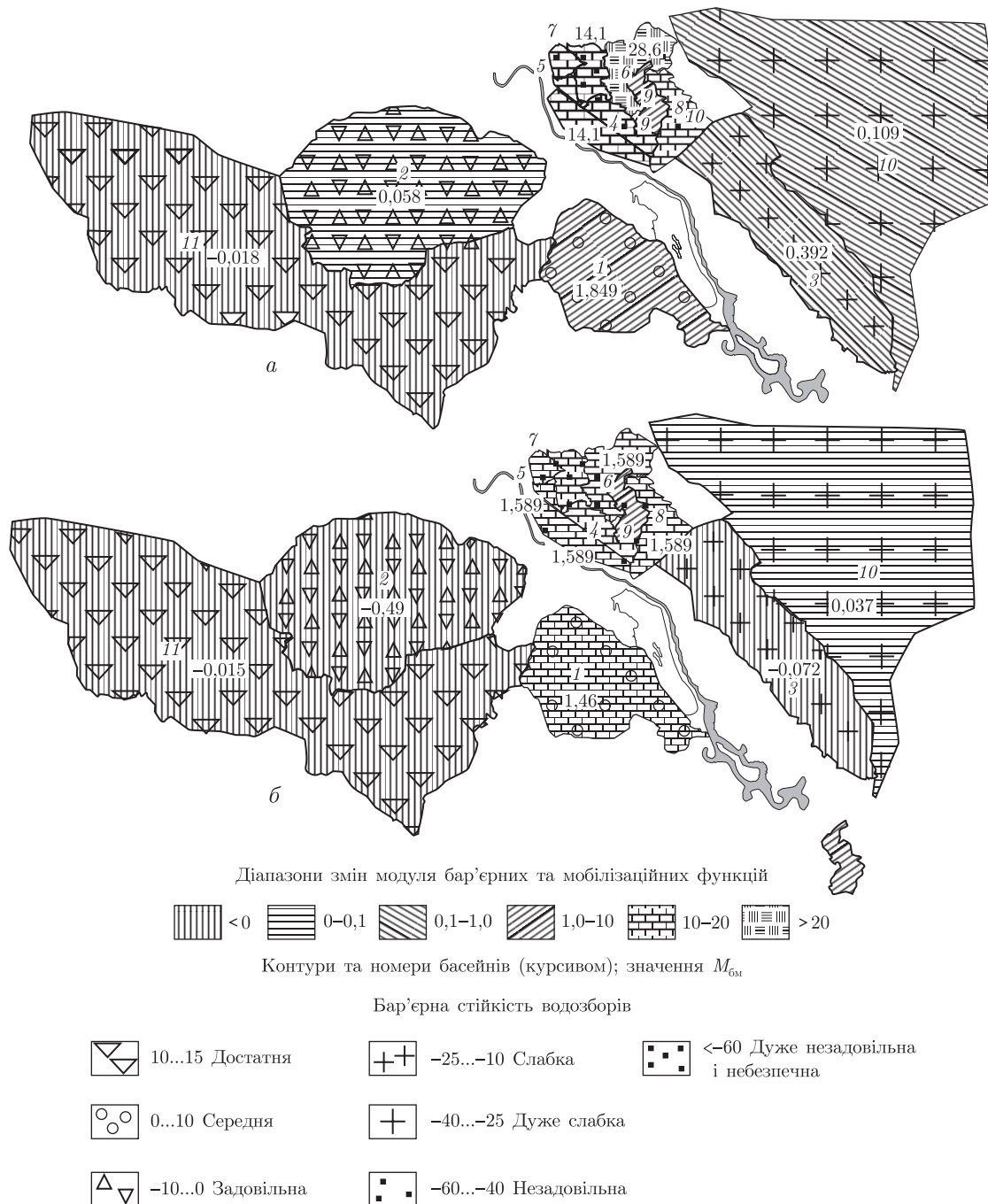


Рис. 3. Вплив техногенних надбудов на бар'єрну стійкість водозборів і зміни модуля бар'єрних та мобілізаційних функцій (M_{bm}) з 1998 р. (а) по 2012 р. (б). Водозбірні басейни пронумеровані відповідно до табл. 2

регулюючих чинників винесення та таких, що можуть коригуватись людиною, відносяться також меліорованість водозбору та зарегульованість гідрографічної мережі.

Таким чином, розроблено методика визначення природної та порушеної бар'єрної стійкості водозбірних басейнів по відношенню до забруднюючих речовин (ЗР) на основі ретро-

спективного статистичного аналізу значень водного винесення ЗР та її концентрації в порівнянні з динамічними (гідрометеорологічними) та ландшафтними характеристиками, які виступають в якості регуляторів бар'єрних функцій водозборів. Ця методика включає: виділення головних динамічних та ландшафтних чинників на основі кореляційного та факторного аналізів; визначення рівня бар'єрної стійкості різних водозборів виходячи із обсягів водного винесення ЗР; вирішення епігнозних і прогнозних задач; обґрунтування заходів з мінімізації винесення ЗР до головних водоприймачів (або, навпаки, — прискорення реабілітації водозбірної площі) на основі підбору сприятливих значень показників у рівняннях регресії. Бар'єрна стійкість оцінюється за бальною рейтинговою шкалою згідно з коефіцієнтами кореляції між значенням чинника та винесенням. Комплексні регресійні рівняння, що включають сталі та динамічні чинники, дозволяють передбачити реакцію водозбірної басейну на внесення забруднювача з врахуванням тієї чи іншої метеорологічної обстановки.

Встановлено чинники, які сприяють посиленню бар'єрних функцій водозбірних басейнів: лісова рослинність, приплив ґрунтових вод (до їх значного забруднення з 2001 р.), нейтральні та слаболужні ґрунти, меліорованість до 20% при зарегулюванні бічної мережі. Додаткові водоохоронні заходи доцільно проводити лише там, де природна система водозбору втратила утримуючі здатності, що проявляється через високі модулі винесення радіонуклідів (для $^{90}\text{Sr} > 3 \text{ ГБк/рік/км}^2$). Практичне значення розробленої методики полягає у можливості підбору значень сталих і динамічних чинників, які, згідно з регресійними рівняннями, забезпечують зниження винесення забруднювача. Тобто, можуть бути визначені ефективні на поточний час водоохоронні заходи, що сприяють посиленню бар'єрної стійкості водозбору, як то: збільшення або зменшення дренаваності, додаткове заліснення водозбору, вапнування кислих ґрунтів тощо.

Цитована література

1. Шестопалов В. М., Богуславский А. С., Бублясь В. М. Оценка защищенности и уязвимости подземных вод с учетом зон быстрой миграции. – Киев: НИЦ РПИ НАНУ, 2007. – 120 с.
2. Шевченко О. Л. Проблеми, пов'язані з евтрофікацією водотоків, та біохімічні чинники формування сполук ^{90}Sr і ^{137}Cs у поверхневих водах // Бюлетень екологічного стану Зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення. – 2006. – № 28. – С. 60–69.
3. Шевченко О. Л. Ретроспективний аналіз пріоритетності чинників мобілізації забруднюючих речовин // Вісн. Київ. нац. ун-ту ім. Т. Шевченка. Геологія. – 2013. – Вип. 60. – С. 63–69.
4. Геохимия техногенных радионуклидов / Отв. ред. Э. В. Соботович, Г. Н. Бондаренко. – Киев: Наук. думка, 2002. – 332 с.
5. Долін В. В., Бондаренко Г. М., Орлов О. О. Самоочищення природного середовища після Чорнобильської катастрофи. – Київ: Наук. думка, 2004. – 221 с.
6. Шевченко О. Л. Кіреєв С. І. Метод інтегральної оцінки бар'єрної здатності водозборів // Екологія і ресурси. – 2005. – Вип. 11. – С. 77–86.

References

1. Shestopalov V. M., Bohuslavsky A. S., Bublasy V. N. Groundwater protectability and vulnerability zones, Kiev, Radioecological Center. Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, 2007 (in Russian).
2. Shevchenko O. L. Bulletin of ecological environment of the Exclusion Zone and the zone of unconditional (obligatory) resettlement, 2006, No 28: 60–69 (in Ukrainian).
3. Shevchenko O. L. Visnyk of Taras Shevchenko Kyiv National University. Geology, 2013, **60**: 63–69.
4. Geochemistry of artificial radionuclides. Ed. E., V. Sobotovich, G. N. Bondarenko, Kiev: Nauk. Dumka, 2002.

5. Dolin V. V., Bondarenko G. M., Orlov O. O. Environmental self-cleaning after the Chernobyl catastrophe, Kiev: Nauk. Dumka, 2004.
6. Shevchenko O. L., Kireev S. I. Environment and Resources, 2005, **11**: 77–86.

Надійшло до редакції 28.09.2015

А. Л. Шевченко

Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко

E-mail: shevch_ol@mail.ru

Методика оценки барьерной устойчивости водосборов по отношению к загрязняющим веществам

На примере Чернобыльской зоны отчуждения, с использованием геоинформационных систем и статистических методов, доказано определяющую роль природных и техногенных характеристик ландшафта в формировании вторичного радиоактивного загрязнения поверхностных вод, объемов водного выноса радионуклидов (^{90}Sr) и барьерной устойчивости водосборных бассейнов. Представлена методика оценки барьерной устойчивости и моделирования сценариев ее усиления для минимизации водного выноса радионуклидов за пределы зон отчуждения.

Ключевые слова: водосборные бассейны, ^{90}Sr , факторы загрязнения, водный вынос, барьерная устойчивость.

O. L. Shevchenko

Taras Shevchenko National University of Kiev

E-mail: shevch_ol@mail.ru

Methods of evaluation of the barrier sustainability of watersheds against the contaminants

By the example of the Chernobyl exclusion zone, using GIS and statistical methods, the crucial role of natural and man-made features of the landscape in the formation of a radioactive secondary contamination of the surface water, the volume of radionuclides (^{90}Sr) carried out by water, and the barrier resistance of watersheds is proved. A methodology for assessing the barrier stability and modeling the scenarios of its strengthening to minimize the entrainment of radionuclides by water outside of exclusion zones is presented.

Keywords: watersheds, ^{90}Sr , factors of contamination, water subtraction, barrier resistance.