

УДК: 556.01: 574.4.

О.Л. Шевченко

ВИЗНАЧЕННЯ БАР'ЄРНОЇ СТІЙКОСТІ ВОДОЗБІРНИХ БАСЕЙНІВ НА ОСНОВІ СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ ЛАНДШАФТНИХ ЧИННИКІВ

На основі статистичного аналізу визначено характер залежності водного винесення ^{90}Sr від гідрометеорологічних і ландшафтних чинників, доведено можливість прогнозування концентрації та винесення радіонуклідів водотоками за сторонніми показниками. Показано, що ландшафтні природні та техногенні характеристики є визначальними у формуванні бар'єрних здатностей водозборів. Запропоновано покласти критерій бар'єрної стійкості в основу оцінки захищеності водотоків від забруднення.

Ключові слова: водозбірний басейн, показники бар'єрної стійкості, ландшафтні чинники, водне винесення ^{90}Sr , коефіцієнти кореляції, меліорованість.

Теоретичне обґрунтування і методика визначення бар'єрної стійкості водозборів

У 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. Останніми роками, після переважного виходу із твердофазної матриці, поведінка ^{90}Sr значною мірою підпорядковується геохімічним (термодинамічним) законам і близька до поведінки стабільних елементів-носіїв (Ca, Sr) та типоморфних для Полісся елементів (Fe). На доволі пласких водозборах річок зони відчуження, за відсутності поверхневого площинного стоку, міграцію та обсяги надходження ^{90}Sr у ґрунтові води визначає біогеохімічна обстановка на всій площі їх інфільтраційного живлення, тобто ті ознаки ландшафту, які довгий час лишаються стабільними (щільність гідрографічної мережі, кількість западин, тип ґрунтів, площа лісу тощо). Їхня комбінація для кожного водозбору є індивідуальною, що визначає й різну міграційну активність радіонукліда, та різні об'єми його водного винесення з водозбору. Отже, під час побудови прогностичних моделей водного винесення радіонуклідів до уваги треба брати *ландшафтно-геохімічні умови на всій площі водозбору водотоку*. А кількісно оцінювати вплив кожного з ландшафтних чинників на водне винесення краще не шляхом визначення геохімічних констант або параметрів міграції в межах безлічі однорідних ландшафтних одиниць, а шляхом встановлення кореляційних зв'язків між чисельним значенням цього чинника (відповідає характеру його поши-

рення на водозборі) і винесенням. Найвпливовіші чинники, як предиктори, використовуються для побудови епігнозно-прогнозних регресійних моделей. Для реалізації цієї методики зручно застосовувати *басейновий підхід* за наявності не менше ніж 9 досконало вивчених (за ландшафтними характеристиками та параметрами забруднення) водозбірних басейнів, які лежать в одній ландшафтно-кліматичній зоні, тобто підпорядковані однаковим метеорологічним чинникам. Забезпечити таку кількість басейнів можна, використовуючи меліоровані водозбори річок, у межах яких виділяється багато малих водозборів окремих магістральних каналів (МК). При цьому необхідно вести спостереження за стоком і винесенням забруднювача в гирлових створах цих каналів.

Використання добре відомих, практично незмінних ландшафтних, тобто сторонніх чинників для прогнозування винесення забруднювача є непрямым методом, що дозволяє, за наявності тривалого ряду спостережень за винесенням, виконувати його прогноз для року, з метеорологічним сценарієм, подібним до тих, що спостерігались. Оскільки для мінімізації вторинного забруднення річок і водного винесення радіонуклідів за межі зони відчуження, нас цікавлять більшою мірою чинники, що відповідають за утримання радіонуклідів, то *кінцевою метою* застосування цієї методики є *оцінка бар'єрних функцій водозбірних басейнів* та можливостей їх посилення. Високі бар'єрні функції визначаються здатністю водозбору утримувати максимальну кількість забруднювальної речовини в багатоводні періоди завдяки природним (а іноді й антропогенним)

ландшафтним характеристикам. Техногенне порушення цих функцій (наприклад, шляхом облаштування додаткової дренажної мережі) може викликати посилення протидіючих їм мобілізаційних функцій і збільшення водного винесення радіонуклідів. Звідси, обсяги водного винесення радіонуклідів відображають *природну* стримувальну (бар'єрну) стійкість водозборів або ступінь її порушення. Загалом, *градація водозбірних площ*, що потерпають від техногенних забруднень, *за ступенем бар'єрної стійкості* може стати оціночною шкалою для визначення *ступеня* вразливості або *захищеності водотоків від забруднення*. Подібний підхід широко використовують для оцінки захищеності підземних вод [1].

Чинники бар'єрної стійкості

Індивідуальні ландшафтні ознаки басейнів (площа западин, ґрунти певного типу, щільність гідрографічної мережі тощо) – це *сталі* чинники, а мінливі *зовнішні* (метеорологічні) та *внутрішні* (гідрологічні) чинники (характер повені, річний поверхневий стік, інтенсивність дренаваності, показники хімічного складу поверхневих та ґрунтових вод, а також їх рівень, стан русла тощо) – це *динамічні*. Для вивчення ролі й ступеня впливу динамічних чинників треба порівнювати їх значення по роках із відповідними значеннями винесення для кожного із басейнів окремо (рис. 1, табл. 1), а для оцінки сталих характеристик басейнів – порівнювати вибірки значень винесення і відповідних характеристик ряду басейнів ($N \geq 9$) окремо за кожен рік спостережень (рис. 2, 3).

Достатньо тривалий термін режимних спостережень після аварії на ЧАЕС забезпечує статистично значимі зв'язки між незалежними чинниками та показниками забруднення і коректність застосування регресійних рівнянь, заснованих на динамічних показниках. Наприклад, для каналу МК-1 Прип'ятської осушувальної системи із гідрометричним постом в с. Ладжиці прогнозне значення винесення ^{90}Sr за 2011 р. ($W = 11,6$ ГБк), визначене з рівняння (1), має лише 5,5 % відхилення від фактичного значення (11,0 ГБк) (дренованість Dr розраховано з прийнятого значення стоку 8,85 млн. м³); а прогнозне значення винесення ^{90}Sr за 2013 р. (40,5 ГБк) виявилось ще ближчим до фактичного (40,0 ГБк).

$$W = -63,456 + 0,0044 \cdot Dr + 0,0008 \cdot Z_{Sr} \quad (1)$$

Проте *зміни переважаючих форм радіонукліда* в середовищі викликають мінливість коефіцієнтів кореляції між винесенням і таким динамічним

зовнішнім чинником як сума атмосферних опадів (табл. 2), а також зі сталими ландшафтними характеристиками, що послаблює або спотворює справжній ступінь залежності винесення від певного чинника (див. табл. 1 рядок 1).

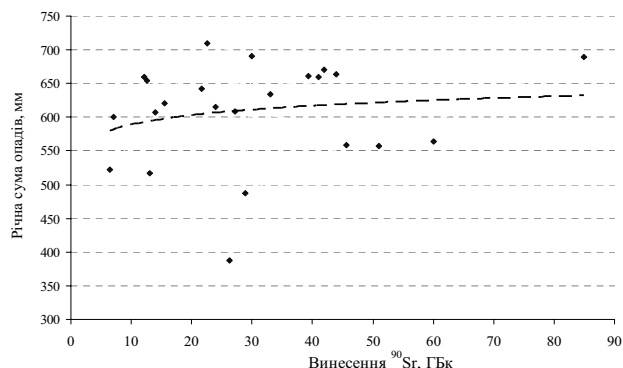


Рис. 1. Ступінь залежності річного водного винесення ^{90}Sr каналом МК-1 лівобережної Прип'ятської системи від суми річних опадів за 1987-2011 рр.

Таблиця 1
Коефіцієнти парної кореляції між винесенням ^{90}Sr (W) та динамічними чинниками за Спірменом для окремих водотоків (басейнів) за період 1987-2011 рр.

Показники	Коефіцієнти кореляції з винесенням по басейнах (їх площа)			
	р. Брагінка, площа (1390 км ²)	МК-1 (115,6 км ²)	Водозбір до прогону в дамбі №7 (94 км ²)	р. Са-хан, (184 км ²)
1 Сума атмосферних опадів за рік, P	0,58	0,36	0,5	0,54
2 Річний стік, Q	0,73	0,87	0,81	0,83
3 Запаси ^{90}Sr на площі водозбору, Z_{Sr}	-0,2	0,58	0,51	0,1
4 Дренованість, Dr	0,3	0,87	0,81	н.в.*

* – не визначали

Зрозуміло, треба враховувати, що на ступінь зв'язку сталих чинників із винесенням впливає також водність років. Установити ці важливі перехідні фази масових змін фізико-хімічного стану радіонукліда або суттєвого перерозподілу його в ландшафтах можна за найрізкішими змінами коефіцієнтів кореляції на хронологічних графіках зв'язку винесення з його чинниками [2]. Для пояснення причин цих змін необхідно брати до уваги наявні результати досліджень формоутворення радіонуклідів у різні роки після випадіння на поверхню [3, 4].

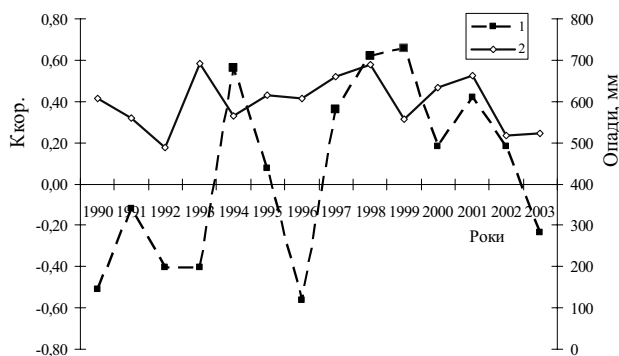


Рис. 2. Характер хронологічної залежності винесення ⁹⁰Sr від ступеня меліорованості водозборів (1) у зіставленні з кількістю опадів (2) (N=9)

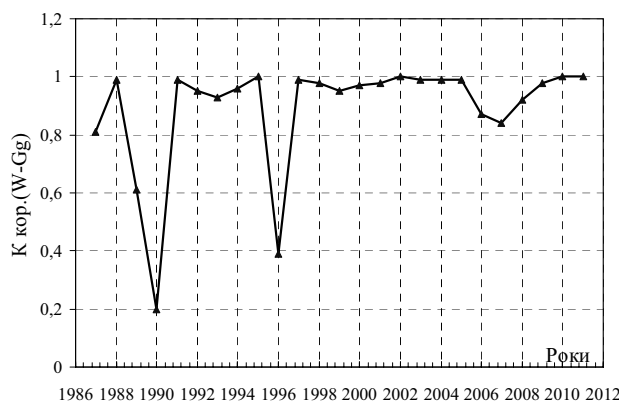
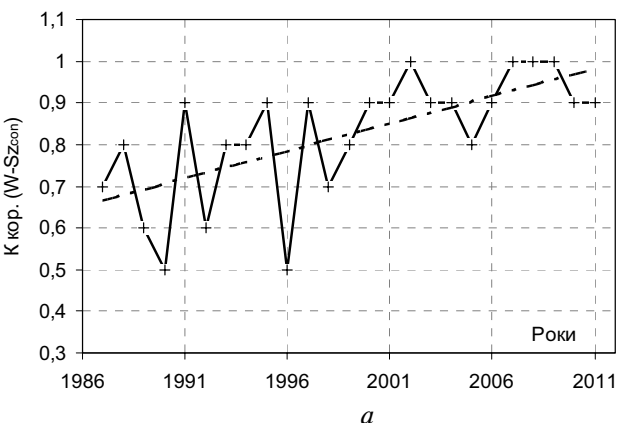


Рис. 3. Зміни характеру впливу щільності гідрографічної мережі (Gg) на винесення ⁹⁰Sr (W) за період після аварії на ЧАЕС (N=11)

На хронологічних графіках мінливості коефіцієнтів кореляції (R) між винесенням ⁹⁰Sr та гідрографічною мережею, починаючи з 1997 р., проявляється певна стабілізація (рис. 3), а саме: достатньо різкі зміни значень R з відносною площею сухих западин – з 1997-1999 рр. (рис. 4, а); з рН ґрунтів – з 2000 р. (рис. 4, б), з відносною



площею лісу – з 2004 р. (рис. 5), що дає підстави казати про масовий якісний перехід форм цього радіонукліда до мобільнішого стану. Тобто, період переважаючого перебування ⁹⁰Sr в складі паливних частинок у ближній зоні радіоактивних випадів завершився в 1999-2004 рр. Розділення часу після аварії на два періоди: 1989-2000 рр. – переважання ⁹⁰Sr у формі паливних частинок і від 2001 р. до нашого часу – домінування рухливих форм ⁹⁰Sr, відчутно вплинуло на характер зв'язку винесення ⁹⁰Sr із сумою атмосферних опадів (табл. 2).

Таблиця 2
Коефіцієнти кореляції між кількістю винесеного з водозбірною басейну ⁹⁰Sr та річною сумою атмосферних опадів

Період, роки	Водозбірний басейн за назвою основного водотоку					
	МК-1 Прип'ятської о. с.	Північно-західний до гирла МК-5	р. Брагінка	р. Сахан	р. Глинця	р. Ілля
1989-2000	0,27	0,4	0,28	0,22	-0,44	-0,21
2001-2011	0,56	0,68	0,67	0,87	0,56	н.д.*

* – недостатньо даних

Бар'єрну стійкість формує комплекс природних ландшафтно-геохімічних та техногенних характеристик водозбірною басейну, які або сприяють винесенню, тобто мобілізації радіонукліда (коефіцієнт кореляції із винесенням позитивний, рис. 3, 4), або забезпечують утримання радіонукліда, тобто виконують бар'єрні функції (коефіцієнт кореляції від'ємний, рис. 5).

Таким чином, щоб оцінити бар'єрну стійкість водозбору, необхідно надати чисельні значення його ландшафтно-геохімічних і техногенних ха-

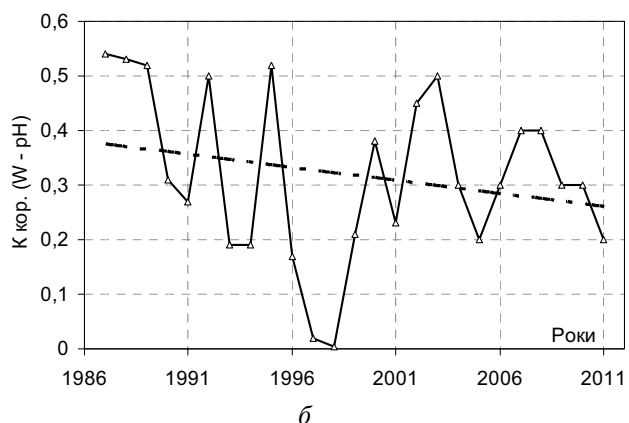


Рис. 4. Хронологічні графіки залежності винесення ⁹⁰Sr (W) від: а – відносної площі (%) провідних (сухих та на піску) западин (K кор. (W-Szcon)); б – від відносної площі (%) кислих ґрунтів на водозборі (рН водної витяжки менше ніж 6)

рактистик та оцінити ступінь їх впливу на ви-
несення певного радіонукліда. Оцінка бар'єрної
стійкості водозбірних басейнів проводиться в два
етапи: 1) обґрунтування та кількісне визначення
радіоекологічних показників бар'єрної стійкості,
що відображають інтенсивність водного вино-
сення радіонукліда; 2) оцінка ландшафтних чин-
ників бар'єрної стійкості за ступенем впливу на
ці показники.

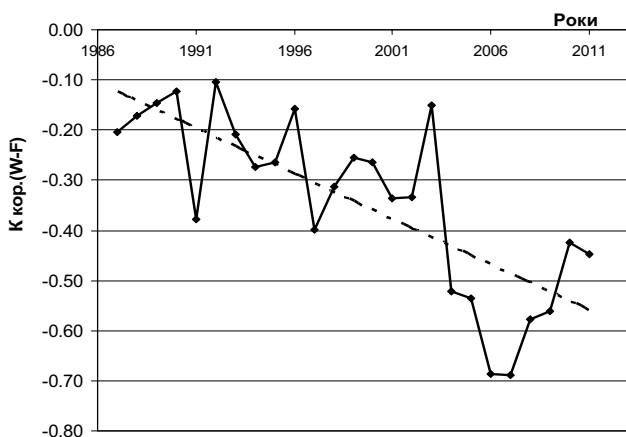


Рис. 5. Хронологічний графік ступеня залежності ($K_{кор.}$) водного виношення ^{90}Sr (W) від відносної площі лісу на водозборі (F) (для 9 водозбірних басейнів)

Показники бар'єрної стійкості

Обсяги водного виношення радіонукліда, не приведені до площі або запасів радіонукліда на водозборі, не можна вважати порівняльним критерієм градації басейнів за ступенем бар'єрної стійкості. Таким радіоекологічним показником оцінки бар'єрної стійкості може бути частка виношення ($b, \%$) і/або модуль виношення (M_6) (табл. 3), що є відношенням фактичного водного виношення (W , ГБк/рік) до площі водозбору водотоку (F , км²) [5]:

$$M_6 = \frac{W}{F} = \frac{\sum_{i=1}^{365} Q \cdot C \cdot 86400}{F}, \text{ (ГБк/рік/км}^2\text{)} \quad (2)$$

де Q – витрати водотоку, м³/с, C – об'ємна активність стоку, кБк/м³.

Ці показники між собою тісно пов'язані рівняннями (2-3) і мають ступінь зв'язку (коефіцієнт кореляції) 0,98-1,0, тобто їх коливання цілком синхронні (рис. 6).

$$b_n = \frac{W_n}{Z_{Sr}^n} \cdot 100\% \text{ або } W_n = 10^{-2} \cdot b_n \cdot Z_{Sr}^n \cdot e^{-0,024t} \quad (3)$$

де b_n , Z_{Sr}^n – частка виношення та запас радіону-

кліда на водозборі за n -й рік, %; Z_{Sr}^o – запас ^{90}Sr на площі водозбору в перший рік забруднення, t – кількість років від початку забруднення до n -го року.

Таблиця 3
Граничні значення модулів виношення ^{90}Sr , які визначають різну бар'єрну стійкість водозбірних басейнів

Діапазон значень M_6 , ГБк/рік/км ²	Бар'єрна стійкість басейну
< 0,03	Дуже добра
0,03-0,05	Добра
0,05-0,1	Середня (прийнятна)
0,1-1,0	Задовільна
1,0-3,0	Незадовільна
3,0-8,0	Дуже незадовільна (необхідні коригувальні заходи: розчищення русел, відокремлення бокових каналів, ліквідація підпірних споруд тощо)
> 8,0	Надзвичайно слабка і небезпечна, вимагає негайного втручання

Проте, якщо відносного показника для нормування частки виношення не існує, то для M_6 можна використати модуль гранично допустимої концентрації ($M_{ГДК}$) [5]. Позитивне значення різниці M_6 і $M_{ГДК}$ (рівняння 4) 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 називатимемо модулем бар'єрних та мобілізаційних функцій ($M_{6м}$):

$$M_{6м} = M_6 - M_{ГДК}, \text{ де } M_{ГДК} = ГДК \cdot Q/F, \quad (4)$$

де Q – річковий стік, м³/рік.

У різному ступені меліоровані водозбірні басейни за модулями виношення ^{90}Sr станом на 2003 р., було об'єднано в три групи [5]: 1) з незначним вторинним забрудненням водотоків і дуже добрими та добрими стримувальними здатностями – водозбори річок Уж, Брагінка, Сахан; 2) із середньою стримувальною здатністю – МК-1; 3) зі значним забрудненням і незадовільною бар'єрною здатністю – р. Глиниця і МК-5 Прип'ятської системи (рис. 7).

Звичайно, на перших етапах забруднення M_6 для всіх басейнів може бути значно вищим за $M_{ГДК}$, але за тим, наскільки стрімко $M_{6м}$ набуває від'ємних значень, тобто відбувається депонування або асиміляція забруднювача в геологічному середовищі, можна говорити про ступінь порушення бар'єрної стійкості водозбору.

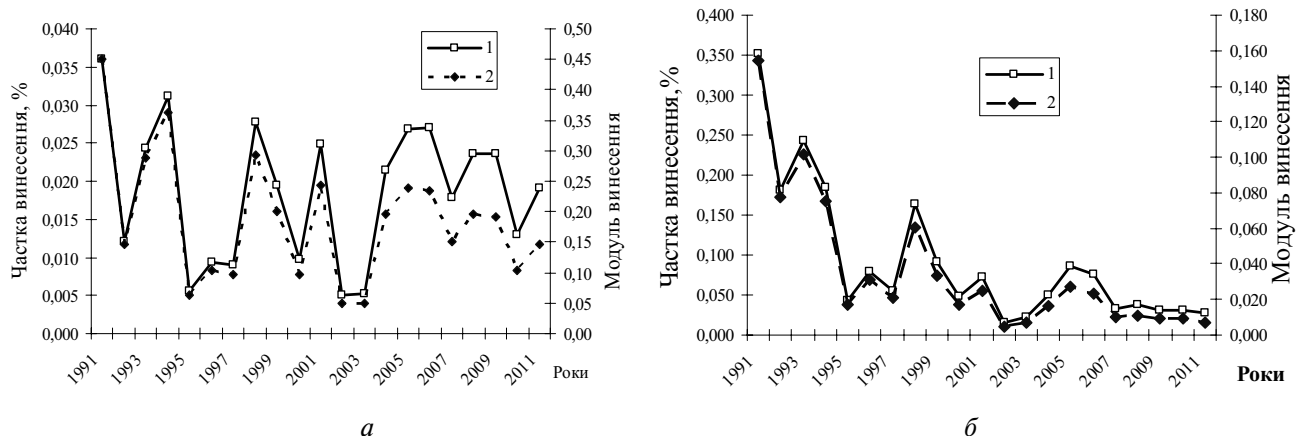


Рис. 6. Порівняння хронологічних графіків частки винесення (%) (1) та модулів винесення ^{90}Sr (ГБк/рік/км²) (2) для вибіркових басейнів Чорнобильської зони відчуження: а – р. Сахан; б – р. Уж

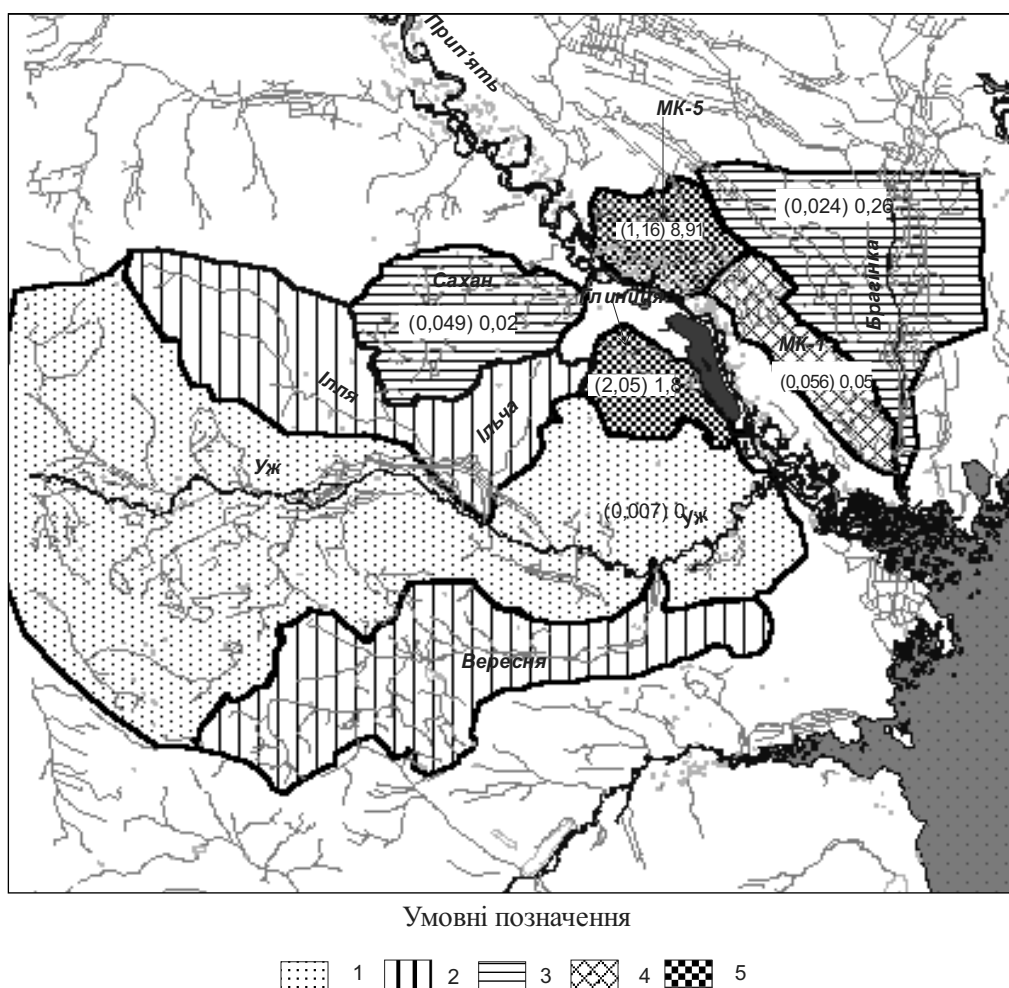


Рис. 7. Розподіл водозбірних басейнів Чорнобильської зони відчуження за модулями винесення ^{90}Sr (ГБк/рік/км²) та відповідною бар'єрною стійкістю станом на відносно багатоводний 2001 р.: 1 – 0,02-0,05 – прийнятна бар'єрна стійкість; 2 – модулі винесення не визначали (для водозбору р. Ілля, найвірогідніше, середня, для р. Вересня – прийнятна); 3 – 0,05-0,25 – середня стійкість, 4 – 0,25-1,0 несприятлива або недостатня стійкість; 5 – 1,0-6,0 – незадовільна та дуже незадовільна (для стоку через проран у дамбі № 7 на той час – незбалансована у зв'язку із поточною реконструкцією меліоративної системи). Цифра в дужках – модуль винесення ^{90}Sr за 2003 р., поруч – інтегральний бал оцінки якості водного джерела за вмістом ^{90}Sr (B_i)

Для оцінки стану забруднення малих водотоків окремими радіонуклідами можна застосувати інтегральний бал оцінки якості водного джерела (рис. 7) через порівняння з наявними ГДК для цього радіонукліда [5]:

$$V_i = K_i N_i,$$

де $K_i = C_i / \text{ГДК}_i$, $N_i = N_{\text{ГДК}} / N_1$, V_i – інтегральний бал; K_i – кратність перевищення ГДК за вмістом певного інгредієнта (радіонукліда); N_i – повторюваність випадків перевищення ГДК; C_i – середня за вибіркою фактичних пробовідборів концентрація радіонукліда у воді; $N_{\text{ГДК}}$ – кількість випадків перевищення ГДК; N_1 – кількість проаналізованих проб у виборці.

Оцінка бар'єрної стійкості водозборів

Природна бар'єрна функція водозбору може бути кількісно оцінена за сумою балів, які еквівалентні впливу (коефіцієнту кореляції) кожного з ландшафтно-геохімічних чинників на водне винесення радіонукліда з водозбору і пропорційні відносній площі поширення цього чинника. Оскільки бар'єрна функція – це динамічна категорія, що забезпечує лише утримання та асиміляцію радіонуклідів і проявляється через певні процеси або роботу, як фізичну величину, то за відносно сталою характеристику об'єкта вибрано поняття бар'єрної стійкості (табл. 3), яке відображає результат дії бар'єрних та протидіючих їм мобілізаційних функцій (добра стійкість – сума балів > 15 , достатня – $10 \dots 15$, середня – $0 \dots 10$ і т.д.). Природну та порушену (з урахуванням меліорованості водозбору, зарегульованості гідрографічної мережі тощо) бар'єрну стійкість оцінюють окремо (табл. 4, 5). Порушену стійкість оцінюють за сумою балів по меліорованості, щільності гідрографічної мережі (за наявності даних про закритий дренаж його теж треба врахувати) та її зарегульованості (табл. 5). Осушувальна мережа та став-охолоджувач ЧАЕС суттєво знижують стійкість водозборів до водного винесення радіонуклідів (рис. 2) і мають більший вплив на винесення, ніж природні чинники, що впливає з більших значень позитивних коефіцієнтів кореляції. За меліорованості 40 % стійкість водозбору р. Сахан погіршується в 3,7 рази і переходить із доброї в 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 ніж 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 впли-

ває на стійкість, яка може залишитись на тому ж якісному рівні (басейн р. Глиниці без урахування ставу-охолоджувача).

Чим менше зарегульований водотік і чим швидша течія, тим здебільшого інтенсивніше відбувається зниження рівня радіоактивного забруднення поверхневих вод. Хоча при цьому винесення в перші роки після забруднення з таких водозборів вище, що також проявляється через пряму залежність винесення від швидкості потоку для великих каналів (МК-1, МК-7 лівобережної Прип'ятської системи). Так, якщо в перші роки (1990-1991) частка винесення із незарегульованих водозборів була більшою за таку із зарегульованих у 10-18 разів (р. Уж порівняно з р. Брагінка та стоком через проран в дамбі № 7), то наприкінці терміну порівняння (2009-2012 рр.) – вони були достатньо близькі: відповідно 0,013-0,06 % і 0,013-0,055 %, а середні значення для незарегульованих або відносно незарегульованих водотоків (до 20 %) навіть менші, ніж у зарегульованих (рис. 8). Коректніше порівняння з урахуванням шару стоку, тобто за модулем винесення (рис. 9), свідчить про зростання середніх за 15 років значень (від 0,05 до 6,2 ГБк/рік/км²) із посиленням зарегульованості. Утруднені умови стоку обумовлюють підтоплення прилеглих забруднених територій, затримання і пролонгацію забрудненого стоку з великих водозборів на наступні роки меншої водності, утворення евтрофних напівпроточних боліт, які в багатководні періоди віддають значну частку запасу радіонуклідів, що перейшли у водорозчинну форму [6].

З порівнянь графіків на рис. 9 можна також зробити висновок про суттєву роль у формуванні водного винесення співвідношення форм випадіння ^{90}Sr на площі басейнів у період 1987-2001 рр. (рис. 9, а) і вирівнювання модулів винесення з басейнів ближньої зони ЧАЕС в період переважання мобільних форм ^{90}Sr (рис. 9, б). Очевидно, для басейнів, площі яких виходять за межі зони відчуження і в забрудненні яких переважає конденсаційний компонент випадань, тобто ^{90}Sr відзначається суттєво більшою мобільністю [7], спостерігається чітка перевага частки винесення над модулем винесення ^{90}Sr .

Модуль винесення прямо залежить від концентрації радіонукліда у воді, тому його значення більші для водотоків ближньої зони. Збільшення з часом модуля та частки винесення відбулось лише по р. Брагінка, що може свідчити про значне перезволоження і техногенну порушеність ландшафтів її водозбору, що посприяло переходу ^{90}Sr в мобільні форми.

Таблиця 4

Бальна оцінка бар'єрної стійкості водозбірних басейнів за природними ландшафтними ознаками

№	Водозбір	Площа перезвожених і затоплених западин, % від площі басейну		Площа сухих западин та на піску, % від площі басейну		Щільність западин, шт./км ²		Площа кислих ґрунтів, % від площі басейну		Площа лісу, % від площі басейну		Площа органо-мінеральних ґрунтів на водозборі, %		Площа під ґрунтами органічного походження, %		Сума балів	Бар'єрна стійкість
		S'wz	Бал (-3...2)	S'z _{dry+i}	Бал (-18)	Gz	Бал (-16)	S _{кисл.}	Бал (-15)	Sf	Бал (20)	S _{орг-мін.гр.}	Бал (10)	S _{орг.гр.}	Бал (-10)		
1	р. Глиниця	1,09	1	2,38	-5	6,02	- 6	0,23	0	49,25	17	9,4	3	2,0	- 1	9	середня
2	р. Сахан	0,95	2	1,89	-3	4,97	- 5	13,06	-2	42,67	17	25,0	8	5,0	- 1	16	добра
3	Каналу МК-1	2,57	-3	1,7	-3	7,54	- 7	0	0	76	20	0,0	0	13,0	- 3	4	середня
4	До прорану в дамбі №7	2,3	-3	2,5	-6	21,5	- 16	12,23	-5	42,59	17	2,4	1	16,7	- 4	-16	слабка
5	МК-2 о.с.Усів	1,63	-2	3,47	-11	17,17	-13	42,6	- 15	23,13	13	0,0	0	0	3	-25	слабка
6	МК-7 Прип'ятської о.с.	1,74	-2	3,19	-8	10,1	-10	6	- 2	32,6	15	1,0	0	44,9	- 10	-17	слабка
7	МК-1 о.с. Усів	1,7	-2	5,37	-18	20,2	-15	28,4	- 10	27,01	14	7,9	3	0,2	1	-27	дуже слабка
8	МК-5 Прип'ятської о.с.	0,88	-1	2,81	-7	8,66	- 8	7,6	- 2	37,2	16	1,5	1	21,5	- 5	-6	задовільна
9	МК-6 Прип'ятської о.с.	0,81	-1	1,39	-3	8,47	- 8	0	0	39,56	16	4,5	2	3,5	- 1	5	середня
10	р. Брагінка	2,2	-3	н.в.	-3	1,0	- 3	42,2	- 15	28,6	14	35,5	10	23,4	- 6	-6	задовільна
11	р. Ілля	0,92	2	н.в.	-2	6,08	- 6	27,38	- 3	63,16	19	9,1	3	7,0	- 2	11	достатня

Таблиця 5

Бальна оцінка порушеної бар'єрної стійкості водозбірних басейнів із урахуванням антропогенних надбудов

№	Водозбір	Сума балів по природних ландшафтних характеристиках	Площа меліоративних систем, км ²	Меліорованість		Щільність гідромережі		Зарегульованість*			Сума балів із урахуванням антропогенних чинників	Бар'єрна стійкість
				%	Бал (-22)	км/км ²	Бал (-26)	%	Бал для року середньої водності (50-60 %)	Бал для року високої водності (<15 %)		
1	р. Глиниця	9	14,37	16,4	-5	0,58	-3	33	5	-2...-5	1	середня
2	р. Сахан	16	80,92	40,7	-12	1,10	-10	32	5	-2...-5	-6	задовільна
3	Каналу МК-1	4	72,34	62,2	-17	1,05	-10	54	8	-4...-10	-25	слабка
4	До прорану в дамбі №7	-16	52,41	81,2	-20	2,09	-20	96	10	-6...-13	-59	незадовільна
5	МК-2 о.с.Усів	-25	3,85	84,1	-21	3,01	-26	91	9	-5...-12	-75	дуже незадовільна і небезпечна
6	МК-7 Прип'ятської о.с.	-17	15,19	73,0	-19	2,37	-25	72	9	-4...-11	-63	- « -
7	МК-1 о.с. Усів	-27	8,44	84,6	-21	2,23	-24	89	10	-5...-12	-74	- « -
8	МК-5 Прип'ятської о.с.	-6	15,21	78,5	-20	2,67	-26	74	9	-4...-11	-54	незадовільна
9	МК-6 Прип'ятської о.с.	5	9,72	99,5	-22	2,39	-25	98	10	-6...-13	-45	незадовільна
10	р. Брагінка	-6	95,23	27,5	-7	1,501	-15	40	6	-3...-5	-27	дуже слабка
11	р. Ілля	11	55,97	14,2	-2	0,778	-4	27	4	0...-2	7	середня

Примітка: о.с. – осушувальна система, МК – магістральний канал; (-22) – максимальна кількість балів для даного показника, * - у цьому разі прийнято бал для 25 % забезпеченості, значення якого для різних басейнів лежать у межах від -3 до +2.

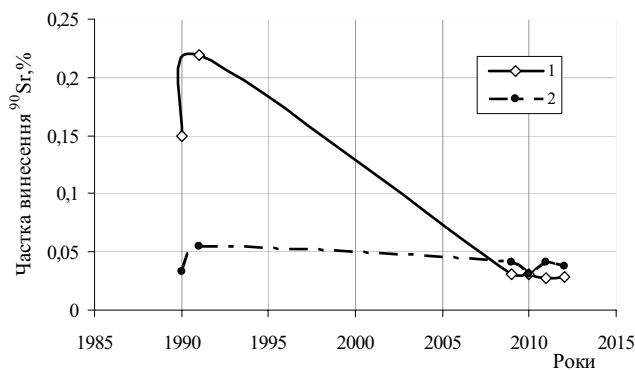


Рис. 8. Хронологічні зміни середньої частки винесення для незарегульованих (1) та зарегульованих (2) водотоків зони відчуження

Через модулі винесення і, особливо, через зміни з часом модуля бар'єрних та мобілізаційних функцій щодо винесення ^{90}Sr , добре проявляється зниження бар'єрної стійкості під впливом техногенних надбудов (табл. 5, рис. 10). На водозборах із достатньою й середньою природною стійкістю інтенсивність зменшення винесення ^{90}Sr більша, ніж на водозборах із слабкою та дуже слабкою бар'єрною стійкістю.

Перехід до від'ємних значень модуля бар'єрних і мобілізаційних функцій відбувається передусім на тих водозборах, де сума балів, що визначають природну бар'єрну функцію, більша ніж 10, а меліорованість менша ніж 20 %, причому, практично незалежно від ступеня радіоактивного забруднення (водозбір р. Ілля). Це свідчить про більше поширення та ефективну дію утримувальних чинників на таких водозборах. Очевидно, що більша природна стійкість водозбо-

ру р. Сахан (табл. 4) суттєво зменшується в разі врахування техногенних чинників саме завдяки вищій меліорованості та щільності гідромережі порівняно із водозбором р. Ілля, для якого значення стійкості дорівнює 11 (табл. 5). Скоріш за все, що саме із цим пов'язано для нього запізнення переходу до від'ємних значень $M_{\text{ом}}$ (рис. 10 а, б). Отже, швидкість досягнення прийнятних $M_{\text{ом}}$, коли концентрація ^{90}Sr в поверхневому стоці менша за ГДК, обернено пропорційна меліорованості та щільності гідромережі, що дозволяє прогнозувати терміни виходу значень винесення ^{90}Sr на безпечний рівень.

Під час моделювання сприятливих сценаріїв винесення по рівняннях регресії, отриманих за результатами множинної кореляції та факторного аналізу (останній використовується для оптимізації рівнянь регресії за кількістю предикторів [8]), виявлено, що на 1999 р. збільшення частки стоку ґрунтових вод у загальному стоці до 35 % для всіх магістральних осушувальних каналів (без збільшення обсягів стоку) могло б забезпечити суттєве зменшення (на 13-55 %) винесення ^{90}Sr ; проте збільшення дренажності на 25 %, тобто збільшення стоку, могло призвести до зростання винесення на 3-10 %. Зменшення щільності штучної гідромережі на 20 % веде до зменшення винесення на 25-85 % (на різних водотоках за сценарієм 1999 р.); збільшення відносної площі лісу до 50 % – до зменшення винесення на 5-44 %. До важливих чинників винесення, якими можна керувати, належать також меліорованість водозбору та зарегульованість гідрографічної мережі.

Очевидно, що розглядати поняття захищеності щодо поверхневих вод, відкритих до всіх видів

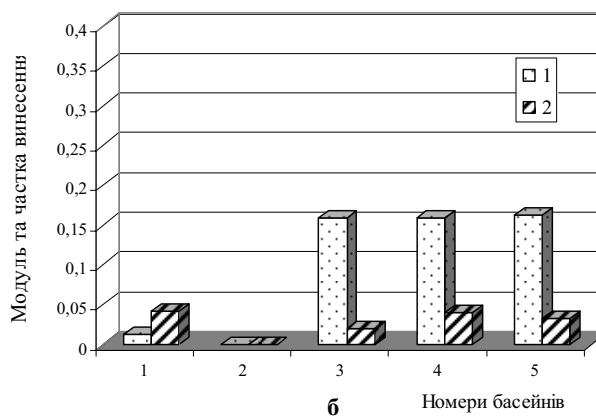
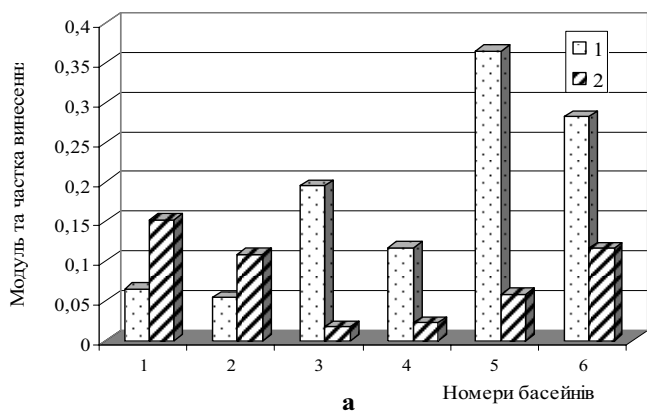


Рис. 9. Зіставлення середніх значень модуля (1) та частки винесення ^{90}Sr (2) в періоді: а – домінування ^{90}Sr в складі паливних частинок (1987-2001 рр.); б – домінування мобільних форм ^{90}Sr (2002-2011 рр.) для водозбірних басейнів: 1 – р. Уж; 2 – р. Вересня; 3 – р. Сахан, 4 – р. Брагінка, 5 – Магістрального каналу МК-1 Прип'ятської осушувальної системи, 6 – р. Ілля. По річках Уж та Вересня спостереження з 2000 р. не проводили

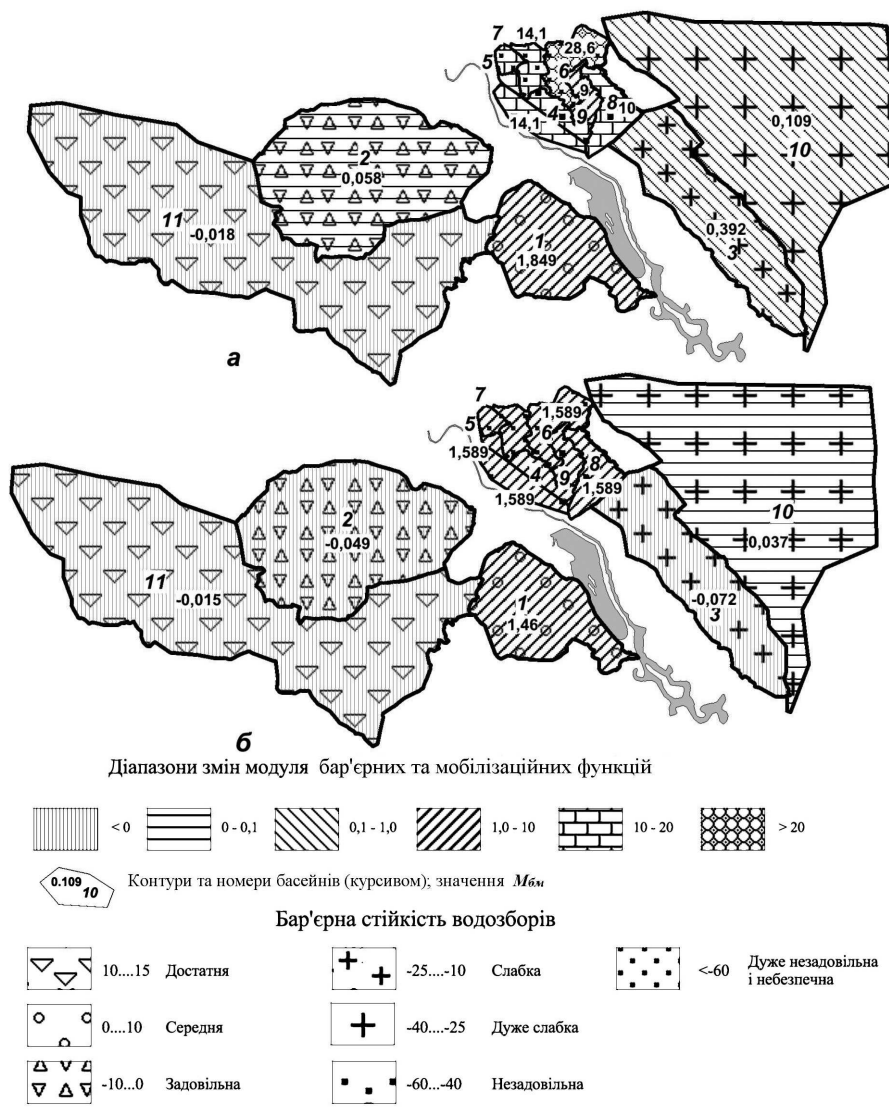


Рис. 10. Вплив бар'єрних функцій водозбору, порушених техногенними надбудовами, на зміни модуля бар'єрних і мобілізаційних функцій (M_{bm}) з 1998 р. (а) по 2012 р. (б)

забруднення, які можуть надходити з атмосфери, не коректно. Проте, якщо розглядати ситуацію, коли первинне забруднення розподілилось лише на водозбірній поверхні, або коли забруднювальна речовина, що випала на водну поверхню, уже повністю винесена водотоком і залишилась лише в ґрунтах водозбору, то захищеність водоприймачів від вторинного забруднення можна розглядати в контексті стримувальної здатності ландшафтного комплексу або біогеохімічної системи водозбору.

Використовуючи дані про відносно поширення ландшафтних складових, що забезпечують бар'єрні та мобілізаційні функції (табл. 4, 5), а також дані про наявність техногенних об'єктів та фізико-хімічні форми радіонукліда (у цьому

разі ^{90}Sr), можна вийти на порівняння басейнів за ступенем захищеності головних водоприймачів від розподіленого на площі їх водозбору певного забруднювача.

Оскільки на території Чорнобильської зони відчуження захищених і навіть умовно захищених водотоків бути не може, запропоновано такий розподіл: річки Ілля, Уж, Вересня – слабо захищені (ураховуючи кращу мобільність переважаючих на їхніх водозборах конденсаційних форм ^{90}Sr); річки Глиниця (з урахуванням впливу ставу-охолоджувача ЧАЕС до повного спускання), річки Сахан, Брагінка, лівобережний канал МК-1 (гірло в с. Ладижичі) – дуже слабо захищені; усі інші – незахищені.

Висновки

За прямим впливом на водне винесення ^{90}Sr найбільше значення мають такі природні ландшафтні характеристики (мобілізаційні чинники): відносне поширення сухих западин, зокрема, в піщаних відкладах – коефіцієнти кореляції (R) за період 1987-2011 рр. 0,5...1,0; щільність усіх западин (R = 0,21...0,98 за період 1997-2011 рр.); за оберненим впливом (чинники, що забезпечують бар'єрні функції): відносна площа лісу на водозборі (R = -0,42...-0,69 після 2004 р.), площа перезволожених і затоплених западин (км²) (R = -0,39...-0,91 в 1987-1992 рр., R = -0,29... -0,72 в 2007-2011 рр.), відносна площа органогенних ґрунтів на водозборі (R = -0,55...-0,79 у 1987-1992 рр.). Характер їх впливу на винесення змінюється залежно від співвідношення мобільних та фіксованих форм ^{90}Sr , метеорологічних умов. Ці чинники виступають як регулятори бар'єрної стійкості водозборів щодо ^{90}Sr (та можливо й інших забруднювачів). Бар'єрна стійкість оцінюється за бальною рейтинговою шкалою відповідно до поширення чинника на водозборі та згідно з коефіцієнтами кореляції між числовим значенням чинника та винесенням забруднювальної речовини. Такий техногенний чинник як штучна дренажна мережа має суттєво більший прямий вплив на винесення, ніж природні ландшафтні чинники. Він порушує природну бар'єрну стійкість водозборів і призводить до збільшення винесення забруднювальних речовин, розподілених на площі водозбірного басейну.

* *

1. Шестопалов В.М. Оценка защищенности и уязвимости подземных вод с учетом зон быстрой миграции / В.М. Шестопалов, А.С. Богуславский, В.М. Булясь. – К.: НИЦ РПИ НАНУ, 2007. – 120 с.
2. Шевченко О.Л. Ретроспективний аналіз пріоритетності чинників мобілізації забруднюючих речовин / О.Л.Шевченко // Вісник Київського національного ун-ту імені Т. Шевченка (Геологія). – 2013. – Вип. 60. – С. 63-69.
3. Іванов Ю.О. Динаміка перерозподілу радіонуклідів у ґрунтах і рослинності / Ю.О.Іванов // Чорнобиль. Зона відчуження [зб. наук. пр.]. – К.: Наук. думка, 2001. – С.47-76.
4. Геохимия техногенных радионуклидов / отв. ред. Э.В. Собонович, Г.Н. Бондаренко. – К.: Наук. думка, 2002. – 332 с.
5. Шевченко О.Л. Метод інтегральної оцінки бар'єрної здатності водозборів / О.Л. Шевченко, С.І. Кіреєв // Екологія і ресурси. – 2005. – Вип. 11. – С. 77-86.
6. Закономірності міграції техногенних радіонуклідів на меліоративних системах Чорнобильської зони відчуження (за результатами досліджень

- 1986-2004 рр.) / Шевченко О.Л., Козицький О.М., Наседкін І.Ю., Шестопалов В.М. та ін.; під ред. В.А. Сташука. – Херсон: Олді-плюс, 2011. – 415 с.
7. Кашипаров В.О. // Формування і динаміка радіоактивного забруднення навколишнього середовища під час аварії на Чорнобильській АЕС та в після-аварійний період / Чорнобиль. Зона відчуження. – К.: Наук. думка, 2001. – С. 11-46.
8. Йереског К.Г. Геологический факторный анализ / К.Г. Йереског, Д.И. Клован, Р.А. Реймент. – Л.: Недра, 1980. – 223 с.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Шевченко А.Л.

Определение барьерной устойчивости водосборных бассейнов на основе статистического анализа ландшафтных факторов

На основе статистического анализа определен характер зависимости водного выноса ^{90}Sr от гидрометеорологических и ландшафтных факторов, доказана возможность прогнозирования концентрации и выноса радионуклидов водотоками по косвенным показателям. Показано, что ландшафтные природные и техногенные характеристики являются определяющими в формировании барьерных способностей водосборов. Критерий барьерной устойчивости предлагается использовать для оценки защищенности водотоков от загрязнения.

Ключевые слова: водосборный бассейн, показатели барьерной устойчивости, ландшафтные факторы, водный вынос ^{90}Sr , коэффициенты корреляции, меліорированность.

Shevchenko O.L.

Determination of the catchment barrier stability based on statistical analysis of landscape factors

Based on static analysis determined the dependence of water removal ^{90}Sr by hydrometeorological factors and landscape, proven ability to predict the concentration and removal radionuclides watercourses by indirect indicators. It is shown that natural and technological landscape characteristics are crucial in the formation of the barrier abilities catchments. Criterion for the barrier stability proposed to use to assess the security of watercourses from pollution.

Keywords: drainage basin, indicators of barrier stability, landscape factors, water removal ^{90}Sr , correlation coefficients, reclamation.