

О. Л. Шевченко, канд. техн. наук, докторант КНУ ім. Тараса Шевченка,
В. М. Бублясь, канд. геол.-мінерал. наук, старший науковий співробітник
(Науково-інженерний центр радіогідрогеоекологічних полігонних досліджень
при Президії НАН України)

РОЛЬ ЗАПАДИННОГО МІКРОРЕЛЬЄФУ ТА ІНШИХ ЧИННИКІВ У ФОРМУВАННІ ВОДНОГО ВИНЕСЕННЯ РАДІОАКТИВНОГО СТРОНЦЮ

Встановлено залежності водного винесення радіонуклідів, зокрема ^{90}Sr , від сталих ландшафтних характеристик водозбірних басейнів, що дає змогу виконувати оцінку стійкості водозборів до забруднення і робити наближені прогнози винесення. Доведено, що одним із головних чинників, які впливають на обсяги водного винесення ^{90}Sr (а можливо й інших забруднювальних речовин), є наявність западин на площі водозбору.

Ключові слова: водне винесення ^{90}Sr , чинники, ландшафтні характеристики, водозбірні басейни, водотоки, западини, кореляція, факторний аналіз, ривняння регресії.

Постановка проблеми і методологічний підхід до її вирішення. У зонах радіоактивного забруднення обсяги річного водного винесення ^{90}Sr (^{137}Cs або інших радіонуклідів) є інтегральним показником ступеня забруднення водозборів і сукупної дії визначальних природних і техногенних чинників. Залежність між винесенням і запасами активності радіонукліда на водозборі є нелінійною, що свідчить про нестабільність фізико-хімічних форм забруднювача, а також про вплив інших, зовнішніх і внутрішніх чинників. Вплив зовнішніх метеорологічних чинників на водне винесення радіонукліда можна визначити, порівнюючи винесення за різні роки з близьких за ступенем забруднення та природними умовами водозборів, а вплив внутрішньобасейнових характеристик, – порівнюючи винесення певного радіонукліда за один рік з водозборів із близьким рівнем забруднення та співвідношенням рухливих і фіксованих форм (для цього можна взяти невеликі водозбори окремих осушувальних каналів), але дещо відмінними ландшафтними умовами. Внутрішньобасейнові ознаки характе-

ризують індивідуальний ландшафтно-геохімічний фон водозбору. До таких ознак належать: ступінь заліснення, переважаючий тип ґрунтів, їх кислотність, щільність гідрографічної мережі, щільність і тип мікрозападин, ступінь дренажу тощо. Такі ознаки або чинники можна назвати статичними, оскільки вони слабо змінюються в часі (хіба що за винятком кислотності ґрунтів). Зовнішні (метеорологічні) та змінні внутрішні характеристики водотоків на водозборі (швидкість потоку, показники хімічного складу води тощо) будемо називати динамічними чинниками, оскільки вони є проявами добових, сезонних і річних змін метеорологічних і кліматичних умов.

За однакової кількості опадів і близьких запасів радіонукліда на порівнюваних річкових водозборах, різниця у величинах водного винесення радіонукліда повинна значною мірою пояснюватись особливостями поширення біогеохімічних, сорбційних, відновних і механічних бар'єрів. Бар'єрною здатністю водозбору щодо радіонуклідів є сукупність умов, що забезпечують уповільнення міграції, накопичення на трива-

лий термін забруднювальних речовин, або, завдяки низькій агресивності середовища (високі рН водної витяжки ґрунту, мала кількість органічних кислот), – сприяють уповільненню трансформації і дисоціації паливних частинок. Існують також ландшафтні елементи, які виводять радіонукліди з поверхневого кругообігу, переводячи їх у глибокі шари геосфери. До таких елементів ландшафтів належать певні класи досить поширених на Поліссі западинних форм. Завдяки їм прискорюється автореабілітація відкритих ландшафтів [3].

Для визначення дієвих чинників впливу на водну міграцію речовин в якості забруднювача доцільно обирати найрухливіший водний мігрант, наприклад, ^{90}Sr , концентрації якого в поверхневих і ґрунтових водах найбільші. Для порівняння винесення ^{90}Sr ми використали не лише басейни малих річок, але й басейни окремих магістральних каналів осушувальних систем Чорнобильської зони відчуження.

Застосовуючи кореляційний і факторний аналізи, можна математично описати залежність обсягів річного винесення радіонукліда з території певного басейну від його сталих ландшафтних характеристик (площі лісу, щільності западин тощо) і загальних динамічних чинників (кількість річних опадів).

Результати та їх обговорення. Згідно з кореляційним аналізом серед статичних чинників найвагоміший і найстійкіший у часі вплив на водне винесення радіонуклідів має *щільність гідрографічної мережі* – коефіцієнти кореляції сягають 1. Цей вплив з роками посилюється і набуває стабільнішого характеру. Низькі коефіцієнти кореляції (0,2–0,6) відносяться до маловодних років (1989, 1990 і 1996 рр.), які відрізнялись рівномірним розподілом і невисокою кількістю опадів, що відобразилось в аномально низьких значеннях винесення активності водотоками за наявності досить густої відкритої осушувальної мережі.

Достатньо високий ступінь впливу на залучення до водної міграції має *рН водної витяжки ґрунтів*, проте цей вплив дуже нестійкий у часі. Високі значення

$K_{\text{кор}}$ у перші роки після випадіння радіоактивних речовин на поверхню можна пояснити участю органічних кислот ґрунту у вилуговуванні ^{90}Sr з паливних частинок. Після виходу основної частини ^{90}Sr із твердофазної матриці, рН перестає відігравати суттєву роль у водній міграції радіонукліда. Коефіцієнти кореляції між рН і кількістю опадів мають від'ємні значення ($K_{\text{кор}} = -0,58$), що може свідчити про підпорядкованість чинника кислотності динамічним чинникам, тобто про його мінливість по сезонах року та в роки різної водності. З початком циклу багатоводних (>610 мм) 1997–2001 років (1999 р. відрізнявся багатоводною повинню) вплив цього чинника на винесення ^{90}Sr помітно знизився.

Очікувано обернений характер має залежність винесення радіостронцію від *відносної площі лісу* на водозборі. Коефіцієнти парної кореляції коливаються в межах від -0,1 до -0,4 за період 1987–2003 рр. до -0,7 у 2006–2007 рр. Тобто роль лісу в затримці ^{90}Sr зростає по мірі віддалення від часу аварійних викидів і збільшення частки обмінних і розчинних форм радіонукліда. У багатоводні роки роль лісу також вагоміша.

Передбачалось, що різний характер обводнення і геодинамічна активність (виражена в морфології) западин по-різному впливають на поверхневий і підземний стік та їх водообмін. Тому серед *западин*, за ознаками зволоження, форми та літологічного складу ґрунтів, що можуть впливати на водообмін, виділено п'ять класів: 1) сухі впродовж більшої частини року западини в мінеральних та органо-мінеральних зв'язних ґрунтах, 2) сухі западини на піску; 3) повздовжні западини, здебільшого тальвеги лінійних ерозійних форм, частина з яких перетинається каналами; 4) замкнені, обводнені більшу частину року, 5) западини перезволожені на відкритій місцевості – переважно на вологих луках або підтоплених лісових галявинах (рис. 1). Перші два класи, за впливом на водообмін, об'єднано в групу западин, що сприяють переведенню поверхневого стоку

в підземний; лінійні форми представлено як западини, що сприяють поверхневому стоку; четвертий і п'ятий класи об'єднано в групу, що відповідає переважно за утримання поверхневого стоку та витрачання його на випаровування і транспірацію рослинами. З метою визначення предикторів або кількісних параметрів, що відображатимуть найбільшу міру впливу *западинно-го мікрорельєфу* на залежний показник – водне винесення ^{90}Sr , для кожного з басейнів визначено: загальну площу западин у межах басейну, відносну площу всіх западин (%), щільність западин, їх кількість і відносну площу й кількість різних класів западин. За результатами кореляційного аналізу побудовано хронологічні графіки, за якими визначено характер і стійкість зв'язку між цими характеристиками і винесенням ^{90}Sr з площі басейну.

Очевидно, що у зв'язку із суттєвими відмінностями за характером участі різних морфогенетичних груп западин у водообміні, не може спостерігатися стабіль-

ної залежності винесення радіонукліда від площі усіх западин, вираженої у відсотках щодо площі басейну (рис. 2).

Проте винесення має істотну обернену залежність від абсолютного значення площі всіх западин у межах басейну (рис. 3). Ця залежність з роками посилюється. Найменш значущі $K_{\text{кор}}$ характерні для маловодних років.

Кореляційні залежності між винесенням ^{90}Sr та окремими класами (табл. 1) або групами *западин* дають змогу чіткіше трактувати роль різних западин у водній міграції радіонукліда. Очевидно, що більша частина площі западин працює на утримання поверхневого стоку і механічних частинок, що містять ^{90}Sr . Наявність позитивних значень коефіцієнтів кореляції (див. рис. 2) свідчить про існування певних груп або частин западин, які відповідають за масоперенесення ^{90}Sr у ґрунтові води, а з ними – в канали, або за збір і скидання поверхневих вод безпосередньо в постійні водотоки.



Рис. 1. Карта класифікованих западин у межах водозбірних басейнів Чорнобильської зони відчуження (без заплави р. Прип'ять і водозбору р. Уж)

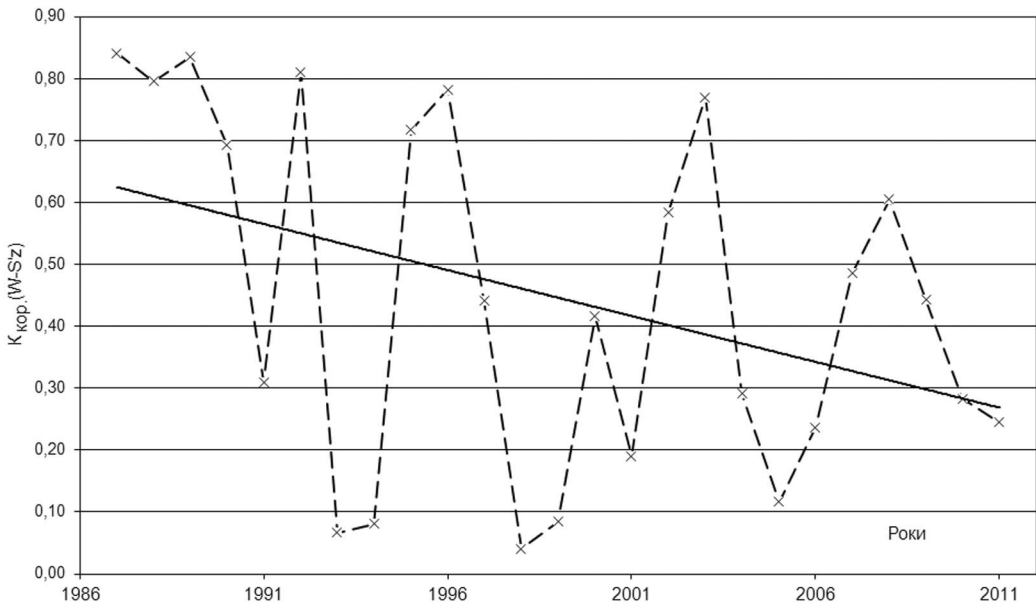


Рис. 2. Хронологічні зміни залежності водного винесення ^{90}Sr від відносної площі (%) усіх западин на водозборі ($K_{\text{кор.}}(W-Sz)$) з логарифмічним трендом ($N=9\dots11$)

Навіть із відносно сталими складовими ландшафту в межах майже кожного водозбірного басейну за тривалий період

(15–25 років і більше) відбуваються повільні зміни, частину з яких можна віднести до еволюційних (заростання території

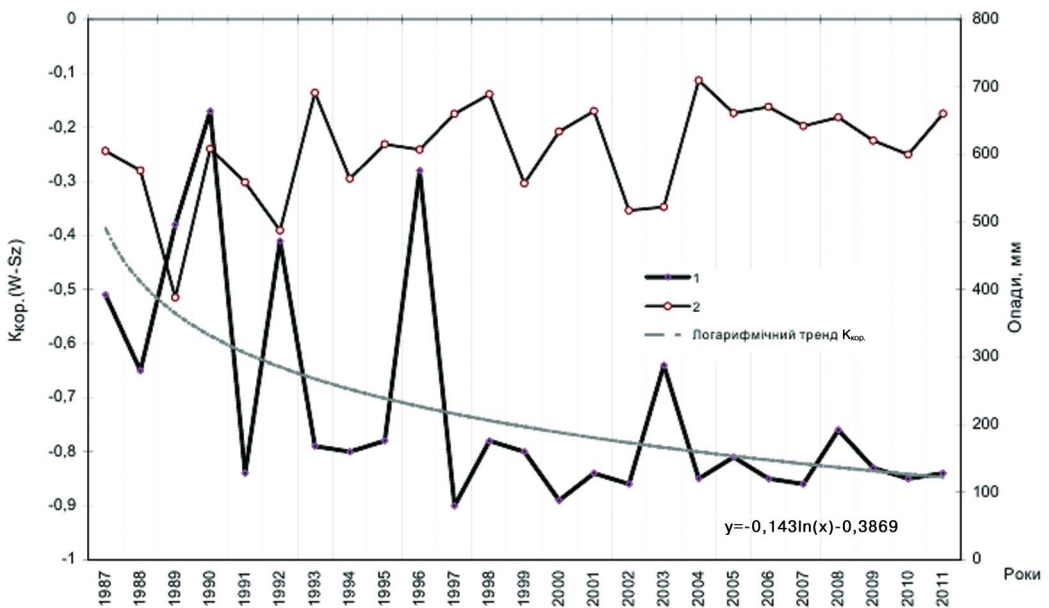


Рис. 3. Хронологічні зміни залежності винесення ^{90}Sr (W) від абсолютної площі (км^2) западин (Sz) на водозборі ($K_{\text{кор.}}(W-Sz)$) порівняно із сумою атмосферних опадів за рік: 1 – коефіцієнт кореляції між W і Sz , 2 – річна кількість опадів, мм

Таблиця 1. Співвідношення виділених класів западин по водозбірних басейнах зони відчуження ЧАЕС (% від площі всіх западин на водозборі)

Назва басейну (за назвою головних дрен)	Класи западин					Усі западини, % від площі водозбору
	сухі не заліснені, замкнені	сухі на піску, замкнені	видовжені тальвеги (проточні)	обводнені замкнені	перезволожені на луках і перелогах	
р. Глиниця	35,53	1,36	46,22	10,18	6,71	6,5
р. Сахан	49,33	0,34	25,29	13,56	11,48	3,8
МК-1 Прип'ятської системи	31,45	0,16	20,44	41,41	6,55	5,4
МК-5	46,34	17,90	15,59	2,43	17,74	4,4
МК-6	62,15	0,82	0,00	8,49	28,54	2,2
МК-7	62,02	2,66	0,00	28,47	6,85	4,9
Водозбір до прорану в дамбі № 7	43,34	5,78	5,63	21,83	23,42	5,1
осуш. система "Усів", МК-1	64,48	9,71	2,27	5,79	17,75	7,2
о. с. "Усів", МК-2	46,06	0,54	31,50	1,76	20,14	7,4

лісом), що стримують міграцію, а частину – до деградаційних (підтоплення території з похованими радіоактивними відходами, замулення водотоків і підвищення базису ерозії, зниження рН розчину через збільшення вмісту органічних кислот тощо), які її провокують і підсилюють. З досвіду проведення сільськогосподарських робіт у Поліській зоні відомо, що після планування (вирівнювання) посівних площ на них досить інтенсивно відновлюються западинні форми. Якщо, як ми бачимо (див. рис. 3), площа западин з часом усе більше відіграє акумулювальну роль, то процес відновлення западинних форм можна зарахувати до еволюційних та автореабілітаційних на рівні водозбірного басейну.

У поліських рівнинних ландшафтах западини мають велике поширення. Раніше, іншими методами, було доведено [1, 2], що цим елементам мікрорельєфу властиві важливі і специфічні функції в загальному енергомасообміні, пов'язані з прискореним перенесенням речовини з поверхні в глибші горизонти. Морфометричні обстеження западин та їх водозбірних площ основних ландшафтних комплексів Чорнобильської зони відчуження в поєднанні з балансними розрахунками свідчать, що на частку запа-

динного мікрорельєфу припадає основна функція перерозподілу рідкого і твердого стоку. Згідно з результатами досліджень мікрореландшафтів з аномальними властивостями, кількість вологи, яка перетікає через зону аерації в підземні води на цих ділянках, у декілька разів перевищує фонові значення, а інколи сягає десятикратних перевищень [2]. Так, великі сухі (1-й клас, табл. 1) западини, та особливо в сумі із западинами, що сформовані в піщаних породах (1-й і 2-й класи), сприяють переведенню поверхневого стоку в ґрунтовий, суттєво збільшуючи водне винесення ^{90}Sr дренажними каналами (рис. 4, 5), що проявляється через високі позитивні значення $K_{\text{кор.}}$ (0,5–1,0) між відносною (від площі басейну) площею цих западин і винесенням. Транзитна роль провідних западин збільшується в часі, з вивільненням ^{90}Sr із паливної матриці. Причому западини в піщаному ґрунті, навіть за досить незначної їх частки серед усіх виділених класів (див. табл. 1), дають суттєвий внесок у загальне винесення ^{90}Sr (рис. 5).

Період відносної стабілізації значень коефіцієнта кореляції ($K_{\text{кор.}} > 0$) між винесенням ^{90}Sr і показниками, що характеризують поширення різних класів западин

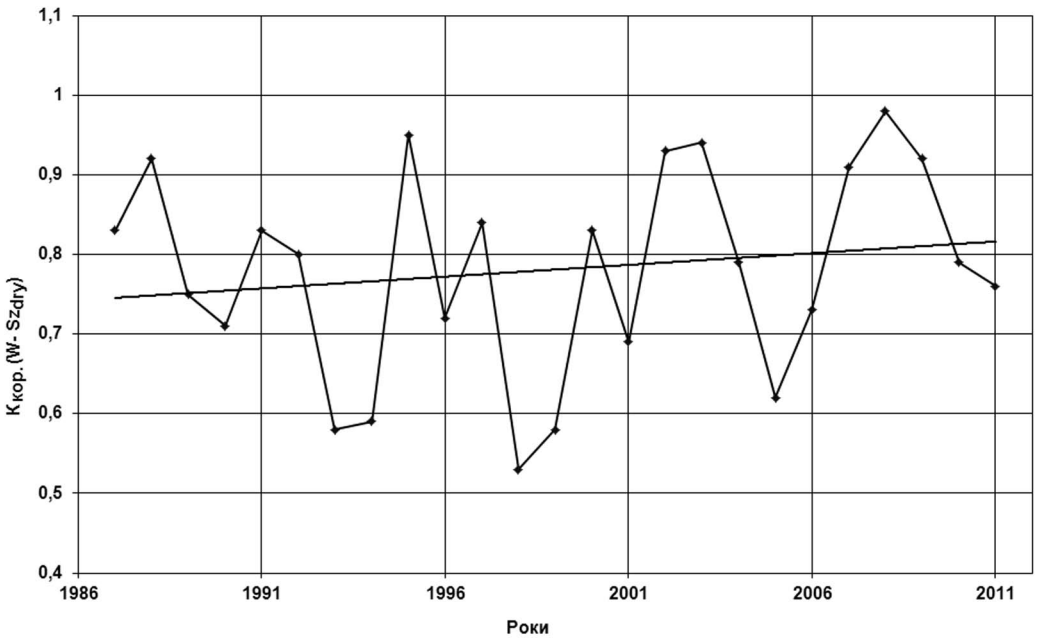


Рис. 4. Динаміка показника зв'язку об'ємів водного виношення ^{90}Sr з відносною площею (%) сухих западин ($K_{кор. (W-Sz_{dry})}$)

настає з 1997 року (рис. 5–8), що збігається з початком багатоговодного циклу та періоду наростання і домінування рухливих форм радіонукліда над часткою ^{90}Sr у паливних частинках. Суперечність (різнозначовість) між залежностями, визначеними

вих форм радіонукліда над часткою ^{90}Sr у паливних частинках. Суперечність (різнозначовість) між залежностями, визначеними

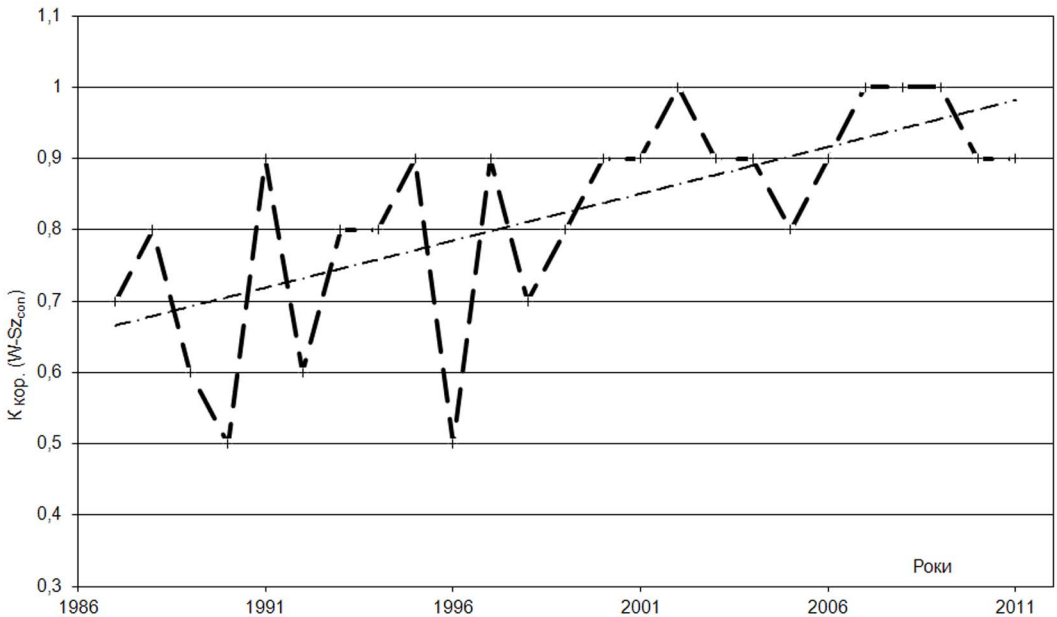


Рис. 5. Хронологічні зміни залежності виношення ^{90}Sr від площі (%) провідних (сухих і на піску) западин ($K_{кор. (W-Sz_{con})}$)

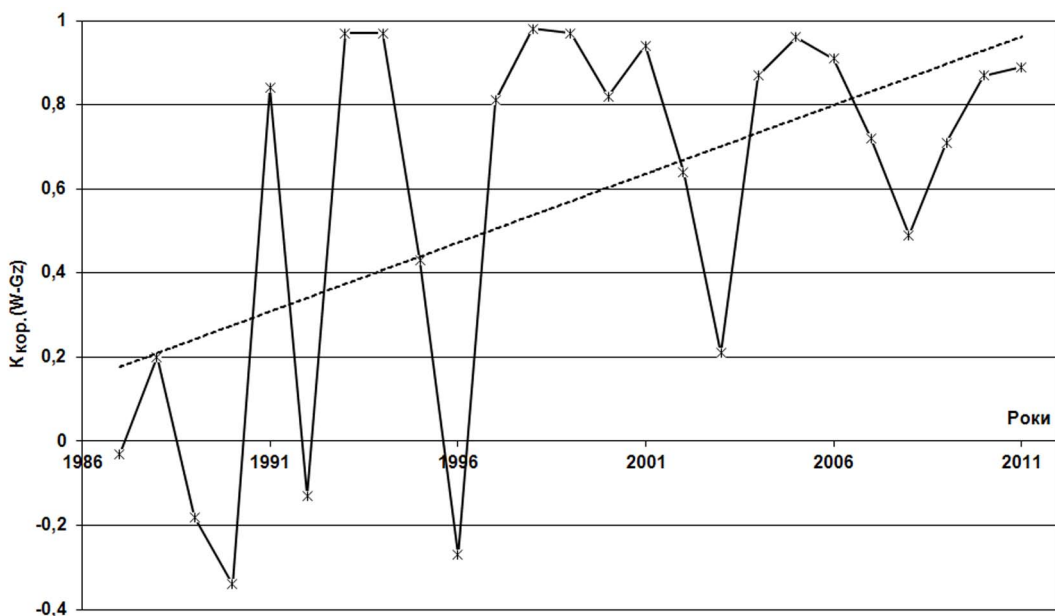


Рис. 6. Хронологічні зміни зв'язку винесення ^{90}Sr із щільністю (шт./ km^2) усіх западин на водозборі ($K_{кор. (W-Gz)}$)

ми на рис. 3 та рис. 4–7, пояснюється тим, що за переведення розчинних форм ^{90}Sr у глибокі шари геологічного середовища відповідає значно менша частина площі

западин – близько 5 %, ніж за утримання їх на поверхні: відповідно близько 95 % загальної площі западин. Паралельна до визначеного тренду (рис. 4) також ліній-

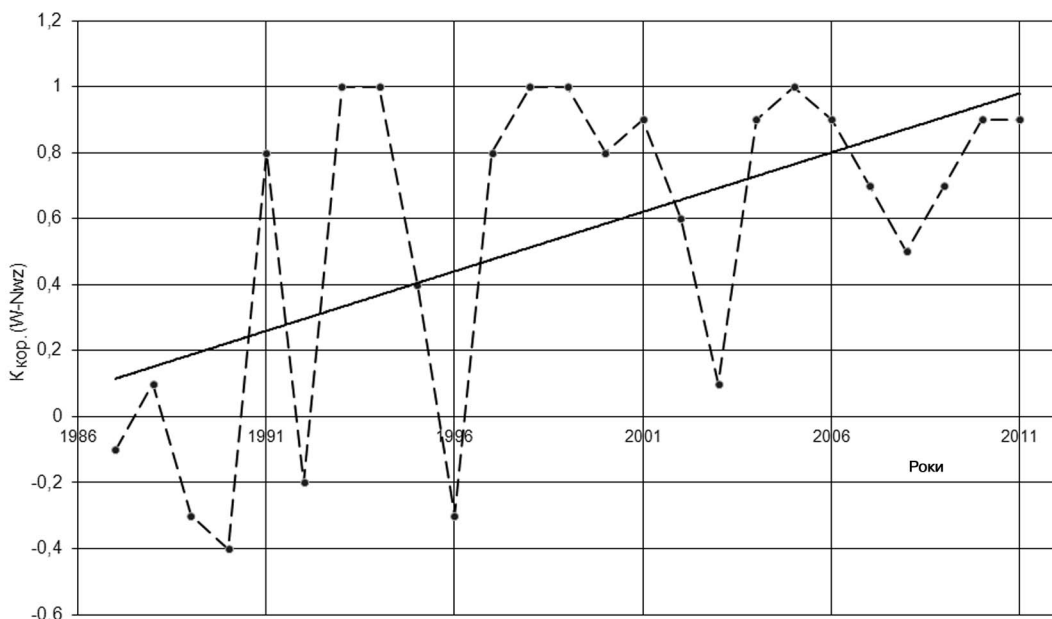


Рис. 7. Хронологічні зміни зв'язку між винесенням ^{90}Sr і кількістю перезволожених западин ($K_{кор. (W-Nwz)}$)

на апроксимація зв'язку винесення ^{90}Sr із щільністю усіх западин на водозборі (шт./ км^2) (рис. 6). Останній хронологічний графік майже ідентичний до графіка, що відображає часові зміни залежності винесення ^{90}Sr від сумарної кількості западин, хоча в останньому випадку діапазон змін $K_{\text{кор}}$ дещо інший: від -0,6 у 1990 р. до 0,9 в 1993, 1994, 1998, 1999 рр.

Такий самий за формою і графік мінливості $K_{\text{кор}}$ між винесенням і кількістю перевозолеваних западин (Nwz) (рис. 7).

Для визначення характеру мінливості ступеня забруднення радіонуклідами зони аерації (до глибини 1,5 м) було виконано оцінку зміни сумарної величини забруднення по розрізу за період 1994–2002 рр. На результуючій кривій питомої активності чітко простежуються періоди накопичення радіонуклідів центральною частиною западини та наступного їх переміщення в нижні горизонти з поступовим зменшенням загальної активності (рис. 8) [2]. Найвищий ступінь вимивання радіонуклідів із ґрунтів центральної частини западин характерний для найзволоженіших форм (період 2001–2002 рр.) (підтверджується графіком на рис. 7), найменший – для сухіших, де в розрізі на глибинах 46–90 см чітко виділяються геохімічні бар'єри.

Обстеження восьми ділянок за межами зони відчуження в травні 1986 р. показали, що западини (в середньому) були на 25 % забруднені менше, ніж прилеглі фонові ділянки. У 1988–1989 рр. рівень забруднення в западинах і на фонових ділянках зрівнявся. А починаючи з 1990 р., концентрація радіонуклідів у ґрунтах верхнього шару западин почала різко збільшуватися. У 1993 р. було знову зафіксовано вирівнювання забруднення. А з 1994 р. намітилась тенденція до зменшення величини накопичення радіонуклідів у центральних частинах западин, що свідчить про їх інтенсивне винесення в ґрунтові води. Ці закономірності підтверджуються на всіх графіках (рис. 4–7). Найвагоміша пряма залежність ($K_{\text{кор}} > 6$) витримувалась саме в 1993–1994 рр., а також у багатоводні періоди з 1997 по 2001 рр. і 2004–2006 рр.

За останні два десятиліття років проведена велика робота з вивчення впливу мікрогеодинамічних зон на переміщення радіонуклідів Чорнобильського походження. Западини, як місцеві бази ерозії, забезпечують переміщення рідкого і твердого стоку (зокрема і радіонуклідів) через їх центральну частину. ґрунтовий покрив у найбільш знижених ділянках має порівняно важкий механічний склад, який виконує

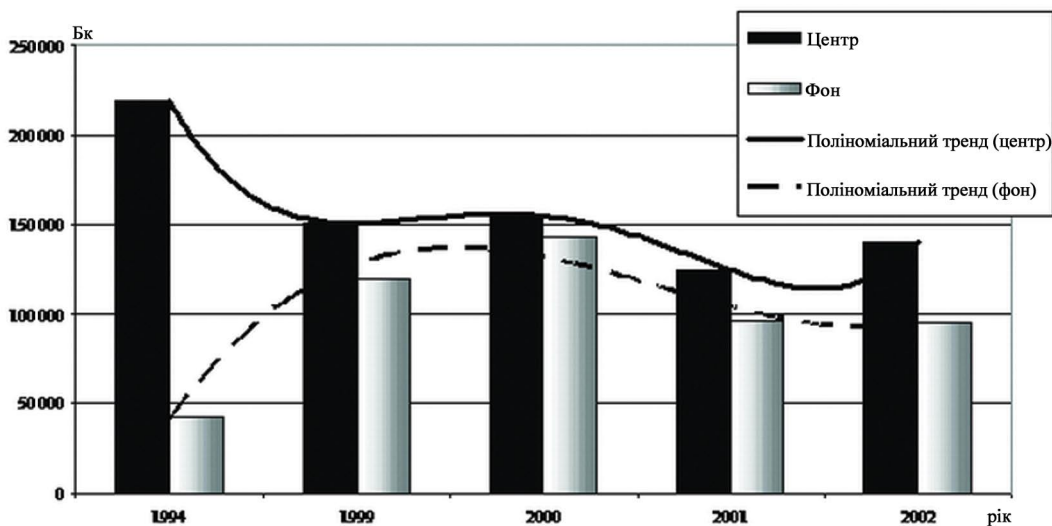


Рис. 8. Порівняльна характеристика накопичення ^{90}Sr у ґрунтових розрізах центральної і фонові частин западини полігона “Старі Шепелічі”

періодично функцію фізичного бар'єру, де накопичуються техногенні речовини. Чужорідні елементи або речовини, які не збалансовані в певних ландшафтних умовах, в агресивному середовищі активних геохімічних процесів трансформуються в рухомі форми і періодично (під час зміни відповідних кліматичних або геохімічних умов) швидко переміщуються через розуцілені (промиті) зони (у верхніх шарах через палеокріогенні псевдоморфози, тріщини усихання і просядок, ходи землерийок) у шари, що залягають глибше і переходять в підземні води. Аналіз матеріалів дослідження особливостей руху радіонуклідів у зонах швидкої міграції показав, що через тіло западини переміщується в середньому у 2,5 рази більше радіонуклідів Cs^{137} , ніж через фонову товщу [2].

Спочатку йде стадія горизонтального змиву радіонуклідів з поверхні водозбірної площі і накопичення їх у центральній частині морфоскульптури. Потім закономірно і під впливом гідрохімічних умов у западині радіонукліди переходять у розчинну форму і на наступній стадії, при збільшенні вологості ґрунту (у весняний період і під час сильних дощів) і кількості рухомих форм радіонуклідів відбувається їх швидке переміщення через зони швидкої міграції в ґрунтові води. У низці випадків, при швидкому переміщенні радіонуклідів з поверхні в глибокі горизонти, питома активність поверхневого шару западин сягає дворазового зменшення порівняно з фисловою.

Про те, що в западинах залишається відносно менша частка рухливих форм ^{90}Sr , свідчать опробування рослинності у вересні 2001 р. Так, на міжканальній ділянці Прип'ятської осушувальної системи в районі с. Красне вміст ^{90}Sr у рослинності на рівній поверхні становив 22,8–28,3 кБк/кг сухої ваги (похибка 1,5–2,1 %), водночас як у западині – 16,7 кБк/кг (похибка 3,7 %) при більшому його вмісті в яґрунті. Вірогідно, що в западинах завдяки промивному режиму залишається менше доступних рослинам форм ^{90}Sr , що зумовлює невисокі коефіцієнти переходу.

Визначено, що швидкість переміщення ^{90}Sr у ґрунтах дуже чутлива до опадів. Так, у западині полігона “Новошепеличі” ^{90}Sr у 2000 р. було на 80 % менше, ніж на фоновій ділянці, а у 2001 р. навпаки – на 50 % більше, ніж на фоновій ділянці. Найінтенсивніше переміщення цього радіонукліда було зафіксовано після інтенсивних дощів у літній період 2001–2002 рр.

На відміну від залежності винесення ^{90}Sr від кількості перезвожених западин (див. рис. 7), на хронологічному графіку, що пов'язує винесення з площею перезвожених западин (рис. 9), $K_{кор}$ мають від'ємні значення. Це свідчить про забезпеченість великих замкнених звожених западин (боліт) більшою буферною ємністю і невисоку здатність малих западин (яких більше) до утримання забрудненого поверхневого стоку під час багатоводних періодів (що і впливає на тенденції, виявлені на рис. 7). Особливо тісний зворотний зв'язок спостерігався в періоди 1987–1992 і 1995–1996 рр., тобто в роки малої водності (коли водоакумуляційна ємність боліт не була вичерпана) та переважання слаборухомих форм ^{90}Sr . Після “скидання” надлишкової вологи разом із ^{90}Sr у багатоводні 1997–1999 рр., акумулювальна ємність перезвожених западин щодо ^{90}Sr поновилаь, що забезпечило їх утримувальні функції у 2002–2003 рр. Так само й надалі, періоди накопичення ^{90}Sr у порівняно маловодні роки (2007–2010 рр.) будуть змінюватися скиданням запасів ^{90}Sr у наступні багатоводні роки (2011–2014 рр.). При цьому, у зв'язку з переважанням розчинних форм ^{90}Sr , утримувальна роль боліт зменшуватиметься (рис. 9).

Сухі западини так само під час домінування малорухомих форм ^{90}Sr (переважно у складі паливних матриць (1986–1990 рр.)) забезпечували більшою частиною своєї площі бар'єрну або утримувальну функцію. Зі збільшенням частки розчинних форм інтенсивність накопичення зменшувалась, що призвело до поступового переходу більшої частини сухих западин до виконання транзитних функцій і відповідно – переходу $K_{кор}$ до позитивних значень (рис. 10).

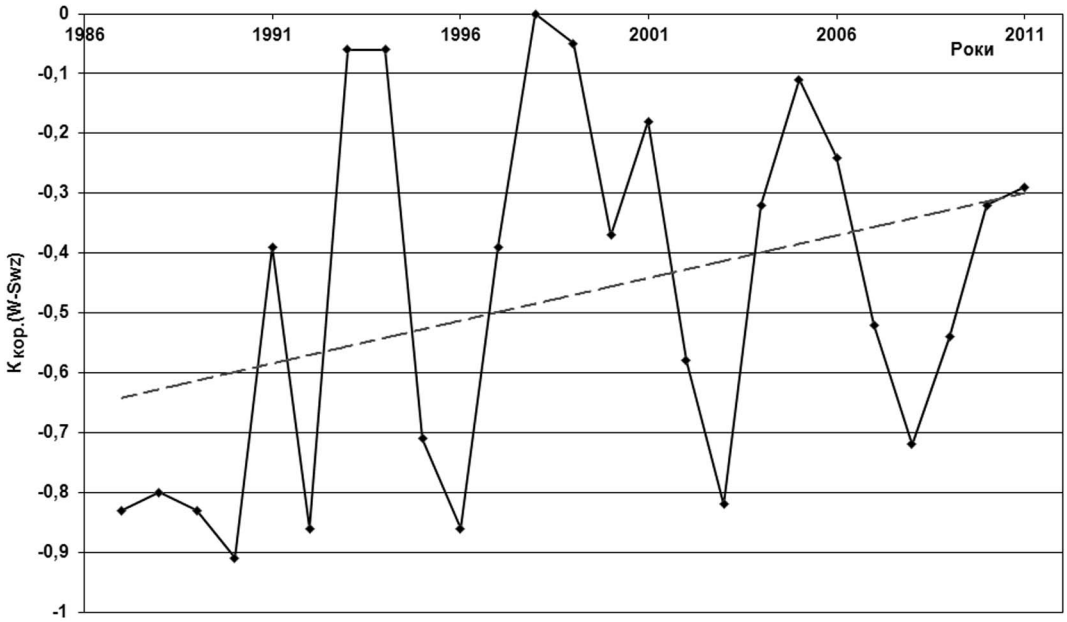


Рис. 9. Хронологічні зміни коефіцієнта кореляції ($K_{кор.}$) між водним винесенням ^{90}Sr (W) і площею перезволожених западин (Swz), (км²)

Підтверджується значна роль западин у водній міграції радіонуклідів при проведенні багатофакторного аналізу (табл. 2),

який дає змогу враховувати не лише вплив окремих чинників на процес водного винесення, але й сукупний вплив усіх вибраних

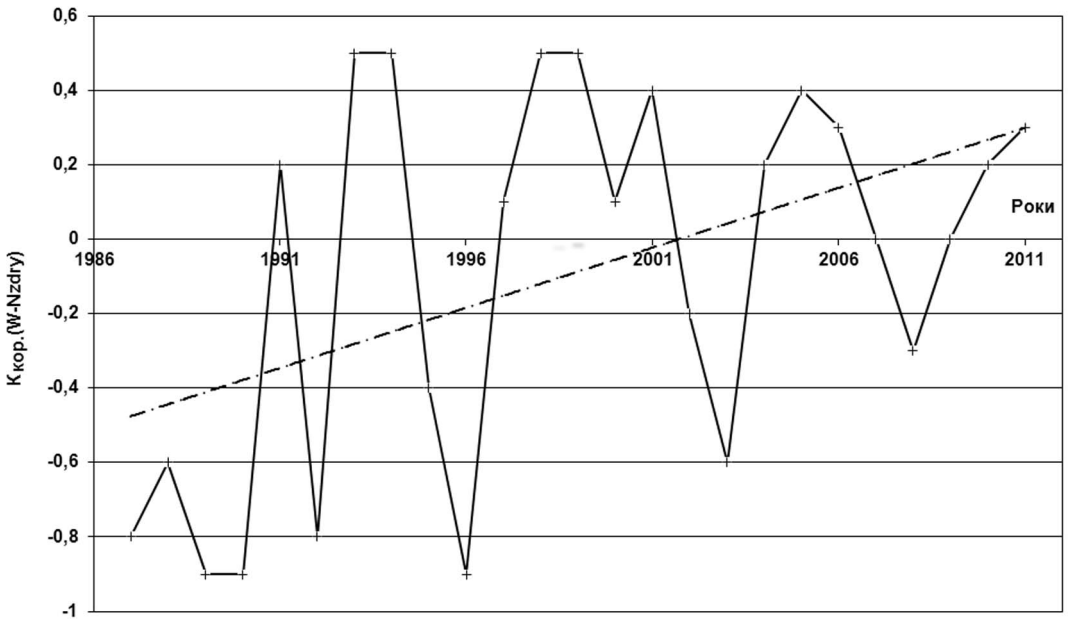


Рис. 10. Хронологічні зміни коефіцієнта кореляції між винесенням ^{90}Sr (W) і кількістю сухих западин (в т. ч. на піску) (Nz_{dry})

чинників та їх взаємозалежність. Виявилось, що для окремих територій набір пріоритетних чинників за один і той самий рік може бути різним (табл. 2, 3), проте роль западин залишається значущою впродовж усього післяаварійного періоду. У багатководні 1997–1998 рр. помітно впливали на винесення радіонуклідів: сумарна площа западин, їх кількість, інші характеристики поширення різних класів западин, а для лівобережжя р. Прип'ять – щільність западин, меліорованість, відносна площа кислих ґрунтів на водозборах.

Регресійні моделі, що описують залежність водного винесення полютанта каналом або рікою (W) від пріоритетних чин-

ників (предикторів), можуть мати різний математичний вигляд, але майже всі з них включають параметр, пов'язаний із поширенням западин на водозборі. Наприклад, логарифмічна модель із статистично значущими оціночними значеннями параметрів b_i при змінних, що описують статичні чинники, для лівобережних басейнів р. Прип'ять на 1998 рік має вигляд:

$$W = -11157,7 + 0,0041 \cdot Z_{Sr} - 776,2Gz - 2037,3Gg - 156 \ln Z_{Sr} + 10191,2 \ln Gz + 2879,2 \ln Gg. \quad (1)$$

Підставляючи в цю модель визначені величини Z_{Sr} – запасу активності stron-

Таблиця 2. Результати множинного кореляційного аналізу за Пірсоном для окремих багатководних років (усі змінні не підпадають під нормальний закон розподілу)

№ з/п	Показники	Коефіцієнти кореляції з винесенням			
		Усі басейни		Лівобережні басейни	
		1997	1998	1997	1998
1	Площа сухих западин, % від площі басейну	0,26	-0,09	0,82	0,66
2	Кількість усіх западин	0,48	0,68	-0,35	-0,25
3	Кількість западин з водою і перезволожених	0,56	0,84	-0,30	-0,16
4	Щільність западин, шт./км ²	0,19	0,48	0,58	0,58
5	Щільність гідромережі, км/км ²	-0,13	0,09	0,34	0,5
6	Меліорованість, %	-0,02	0,22	0,53	0,56
7	Площа кислих ґрунтів, %	-0,29	-0,15	0,91	0,98
8	Площа нейтральних ґрунтів, %	0,24	0,11	-0,91	-0,88

Таблиця 3. Ранжування сторонніх чинників за Спірменом

№ з/п	Показники	Коефіцієнти кореляції з винесенням			
		Усі басейни		Лівобережні басейни	
		1997	1998	1997	1998
1	Площа всіх западин, км ²	0,63	0,067	-0,29	0,036
2	Площа сухих западин і на піску, км ²	0,7	0,2	-0,39	0,07
3	Площа сухих западин, % від площі басейну	0,2	0,17	0,39	0,7
4	Площа западин з водою і перезволожених, км ²	0,75	0,37	-0,4	-0,07
5	Кількість усіх западин	0,77	0,38	0,16	-0,036
6	Кількість западин з водою і перезволожених	0,32	0,25	-0,39	0,57
7	Сума сухих западин і на піску	0,77	0,38	0,036	-0,04
8	Щільність западин, шт./км ²	0,0	0,28	0,1	0,6
9	Щільність гідромережі, км/км ²	-0,63	-0,35	0,18	0,0
10	Площа кислих ґрунтів, %	-0,3	-0,39	-0,4	0,85
11	Площа нейтральних ґрунтів, %	0,13	0,26	-0,29	-0,78

цію-90 на водозборі, ГБк, G_z – щільності всіх западин на водозбірній площі, шт./км², G_g – щільності гідромережі (км/км²) по одному з лівобережних водотоків, для якого винесення ⁹⁰Sr у свій час не визначалось, можна встановити його з високою достовірністю. Для іншого року або для водотоку правобережної частини зони відчуження, найвдаліша регресійна модель виглядатиме інакше, оскільки впливовішими можуть виявитись інші чинники (табл. 3). Наприклад, найбільш адекватна модель (коефіцієнт множинної кореляції дорівнює 0,96, ступінь достовірності описання процесу або коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,93$), що описує винесення ⁹⁰Sr з правобережних і лівобережних басейнів у 1997 р., має кубічний вигляд (2) і, крім Z_{Sr} , використовує інші предиктори: кількість сухих западин, у т. ч. на піску ($N_{c.n.}$), і ступінь зарегулювання водотоків (Rf , %), оскільки комбінації інших чинників не дають точнішого математичного описання винесення ⁹⁰Sr за цей рік (табл. 4).

$$W = -6035,923 + 0,014Z_{Sr} - 2,736N_{c.n.} + 87,147Rf - 2,14 \cdot 10^{-14} \cdot Z_{Sr}^3 + 5,3 \cdot 10^{-6} \cdot N_{c.n.}^3 - 0,0027Rf^3. \quad (2)$$

Під час виконання прогнозів для схожих за сценаріями водності років за формулами (1) і (2), звичайно, варто враховувати поправку на природний радіоактивний розпад для запасів радіонукліда на водозбірній площі.

За результатами статистичного аналізу виконано ранжування чинників впливу (окрім запасів забруднювача на водозбірній площі) для виділених метеорологічних і трансформаційних етапів. Наприклад, на першому маловодному етапі 1987–1992 рр., що характеризувався переважанням твердофазних слаборухливих форм ⁹⁰Sr, винесення добре корелювало із площею перезвожених западин (обернена залежність); відносно площею усіх западин, сухих западин і кислих ґрунтів (в усіх випадках прями залежності); відносно площею органогенних ґрунтів (обернена залежність).

Способом варіативного підбору (по три незалежних предиктори) в процедурі кореляційного аналізу вдалося визначити найдостовірніші регресійні рівняння, що описують винесення ⁹⁰Sr і дають змогу прогнозувати його для років із подібним розподілом опадів за відомих значень предикторів (табл. 4). Достовірність рівнянь визначається високими значеннями коефіцієнтів множинної кореляції ($K_{mn. кор.}$), ступеня точності математичної апроксимації процесу – R^2 і рівнем значущості критерію Фішера (p). Найдостовірнішими вважаються моделі, для яких $R^2 > 0,95$, $p < 0,05$.

Висновок. На прикладі водозбірних басейнів Чорнобильської зони відчуження (р.р. Сахан, Глиниця, Ілля, північної частини лівобережної Прип'ятської системи, її окремих магістральних каналів) доведено, що одним із найважливіших чинників впливу на водне винесення ⁹⁰Sr є наявність западинних форм та їх певних класифікаційних різновидів, що визначають інтенсивність водообміну і міграції радіонуклідів.

Суперечливість залежностей винесення ⁹⁰Sr від площі й кількості западин свідчить про функціональну неоднорідність останніх. Очевидно, що великі сухі западини працюють переважно на винесення радіонукліда через свою центральну частину, водночас як малі сухі западини до 2001 р. виконували утримувальну роль, переважно щодо паливної компоненти випадінь. У зв'язку із значущим переходом ⁹⁰Sr в обмінні та водорозчинні форми (2001–2004 рр.), бар'єрна функція як сухих, так і перезвожених западин з роками зменшується.

На сучасному етапі більша площа западин сприяє формуванню стоку ґрунтових і поверхневих вод та винесенню ними ⁹⁰Sr у багатоводні періоди і лише невелика (найімовірніше центральна) частина, що становить 4–5 % від площі западини, – забезпечує виведення радіонуклідів у глибокі шари геологічного розрізу або концентрування на внутрішніх геохімічних бар'єрах, тобто вилучення їх із місцевого стоку.

Таблиця 4. Результати множинного кореляційного аналізу та регресійні залежності винесення ^{90}Sr з лівобережних басейнів від статичних чинників для 1997 і 1998 років

Вид рівняння	Рівняння регресії	$K_{\text{мн. кор.}}$	R^2	p
1997				
Квадратичне	$W = 2,4 + 0,0069 \cdot Z_{Sr} - 10^{-8} Z_{Sr}^2 - 10,394 \cdot S_{dz}^2 - 2,754 \cdot Sf^2$	0,96	0,93	<0,14
Квадратичне оптимізоване	$W = -165,073 + 10,157 \cdot Os + 0,594 \cdot Gz^2$	0,92	0,84	<0,02
Лінійне	$W = -206,466 - 29,258 \cdot Gg + 17,5 \cdot Gz + 10,03 \cdot Os$	0,92	0,84	<0,1
1998				
Лінійне	$W = 97,0842 + 0,003 \cdot Z_{Sr} - 20,6604 \cdot Gz + 103,9423 \cdot Gg$	0,93	0,86	<0,088
Логарифмічне	$W = -11157,7 + 0,0041 \cdot Z_{Sr} - 776,2Gz - 2037,3Gg - 156 \ln Z_{Sr} + 10191,2 \ln Gz + 2879,2 \ln Gg$	1,0	1,0	<0,001
Кореневе	$W = -25356,1 + 0,0057 \cdot Z_{Sr} - 1600,6 \cdot Gz - 3952,4 \cdot Gg - 2,2\sqrt{Z_{Sr}} + 11684,1\sqrt{Gz} + 9559,1\sqrt{Gg}$	1,0	1,0	<0,001
Квадратичне	$W = -5982,94 + 0,000566 \cdot Z_{Sr} + 868,94 \cdot Gz + 1793,03Gg + 5 \cdot 10^{-9} Z_{Sr}^2 - 31,24Gz^2 - 560,09Gg^2$	1,0	1,0	<0,001
Квадратичне оптимізоване	$W = -173,295 + 0,01 \cdot Z_{Sr} - 1,3 \cdot 10^{-8} \cdot Z_{Sr}^2$	0,94	0,88	<0,014
Дробне	$W = 13498 + 0,0034 \cdot Z_{Sr} - 369 \cdot Gz - 1084 \cdot Gg + 4,425 \cdot 10^6 Z_{Sr}^{-1} - 60103 \cdot Gz^{-1} - 1848,6 \cdot Gg^{-1}$	1,0	1,0	<0,001

W – винесення ^{90}Sr водотоком за рік, ГБк;

Z_{Sr} – запас активності ^{90}Sr на водозборі, ГБк;

S_{dz} – площа сухих западин, % від площі водозбору;

Sf – площа лісу, %;

Os – відсоток органічних ґрунтів на водозборі, %;

Gz – щільність усіх западин на водозбірній площі, шт./км²;

Gg – щільність гідромережі, км/км²

Аналіз змін ступеня впливу западин на винесення радіонукліда впродовж тривалого періоду після початку забруднення дає можливість виявити характер перерозподілу радіоактивних випадін по поверхні спряжених ландшафтів, “внутрішні” зміни, що відбуваються з мігрантом – перехід у рухливі або фіксовані форми, заглиблення в ґрунт тощо.

Розроблений методичний підхід дає змогу розраховувати винесення різноманітних забруднювальних речовин водотоками, спираючись на дані багаторічних

спостережень і цифрові карти, що характеризують ландшафтно-геохімічний фон водозбірних басейнів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бублясь В. М., Шестопалов В. М. Аномальные зоны и их роль в перераспределении радионуклидов из поверхности почв в подземные воды//Водообмен в гидрогеологических структурах и чернобыльская катастрофа. Киев, 2001. Ч. 1. С. 251–356.

2. Бублясь В. М., Шестопалов В. М. Западинний мікрорельєф та його роль у перерозподілі радіонуклідів//Закономірності міграції

техногенних радіонуклідів на меліоративних системах Чорнобильської зони відчуження (за результатами досліджень 1986–2004 рр.)/Під ред. В. А. Сташука. Херсон: Олді-плюс, 2011. 416 с.

3. Шестопалов В. М., Шевченко О. Л., Бу-
блясь В. М., Панасюк М. І. Основні процеси,

що впливають на автореабілітацію водних систем та їх компонентів//Автореабілітаційні процеси в екосистемах Чорнобильської зони відчуження/Під ред. Ю. О. Іванова, В. В. До-
ліна. Чернівці, Київ: АНТ ЛТД, 2001. С. 67–115.

Рукопис отримано 29.04.2013.

Определены зависимости водного выноса ^{90}Sr от ландшафтных характеристик водосборных бассейнов, что позволяет выполнять оценку устойчивости водосборов к загрязнению и делать приближенные прогнозы выноса. Один из главных факторов, которые влияют на объемы выноса загрязняющих веществ, является наличие впадин на площади водосбора.

Ключевые слова: водный вынос ^{90}Sr , факторы, ландшафтные характеристики, водосборные бассейны, водотоки, впадины, корреляция, факторный анализ, уравнения регрессии.

Dependences of ^{90}Sr water chemical subtraction are certain from landscape descriptions of catchment basins, that allows to estimation of stability of catchments to contamination and do the close prognoses of subtraction. One of main factors that influence on the volumes of contaminants subtraction, is a presence of sinks on the area of catchment.

Keywords: water chemical subtraction of ^{90}Sr , factors, landscape descriptions, catchment basins, water course, sinks, correlation, factor analyse, regression equation.