

**В.В. Канівець**

ORCID: 0009-0008-1672-5547  
kaniv@uhmi.org.ua

**Г.А. Деркач**

ORCID: 0009-0006-4266-9126  
dgrygorii@gmail.com

Український гідрометеорологічний інститут Державної служби України з надзвичайних ситуацій та Національної академії наук України, Київ

УДК 627.8.064.4:504.5:546.79 DOI: <https://doi.org/10.15407/Meteorology2024.05.027>

## ОГЛЯД РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗАБРУДНЕННЯ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА ЦЕЗІЄМ-137 І СТРОНЦІЄМ-90, ЯКІ ПРОВОДИЛИСЬ ПІСЛЯ АВАРІЇ НА ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ АЕС (1986–1921 pp.)

Проаналізовано наявні дані про стан радіоактивного забруднення води і донних відкладів Каховського водосховища з метою оцінки можливого погіршення якості навколишнього середовища за показниками радіоактивного забруднення у зоні впливу аварійного скиду води через руйнування греблі Каховської АЕС військами РФ. Представлено карту-схему забруднення дна водосховища цезієм-137 станом на 1994 рік. Забруднення Каховського водосховища цезієм-137 відбулося переважно шляхом випадіння цього радіонукліду з аерозолями на водну поверхню у травні 1986 року. Значно менша частина цього радіонукліду надійшла водним шляхом безпосередньо із верхів'їв дніпровського басейну. Стронцій-90 надходив до водосховища виключно водним шляхом починаючи з жовтня 1986 р. З 1987 року намітилися стійкі тренди зменшення у воді активності обох радіонуклідів. Приблизно з 1996 р. концентрації активності  $^{137}\text{Cs}$  знизилися до передаварійного рівня, активності  $^{90}\text{Sr}$  демонструють повільне зменшення і до 2022 р. залишалися дещо вищими за передаварійні. Середні рівні забруднення дна водосховища цезієм-137 і стронцієм-90 виявилися найнижчими у порівнянні з вищерозташованими водосховищами. Показано, що в 1994 р. на 80% поверхні дна, яка являла собою затоплену колишню заплаву Дніпра, рівні активності  $^{137}\text{Cs}$  становили  $0,06 \text{ Кі/км}^2$  ( $2,2 \text{ КБк/м}^2$ ) і були нижчими, ніж на прилеглий до водосховища території. У місцях накопичення мулових наносів (колишнє русло Дніпра) активності  $^{137}\text{Cs}$  були в середньому втричі вищими. Балансові розрахунки за даними радіаційного моніторингу води показали, що кількість активності  $^{137}\text{Cs}$  у донних відкладах до 2022 р. зменшилася удвічі за рахунок природного радіоактивного розпаду, кількість активності  $^{90}\text{Sr}$  зменшилася приблизно на 20%, оскільки втрати активності через природний радіоактивний розпад частково компенсувалися постійним надходженням цього радіонукліду з забрудненої частини водозбору. Після катастрофічного витоку води із водосховища оголилася заплава Дніпра. За розрахунками УкрГМІ середня щільність забруднення ґрунтів обсохлої території цезієм-137 не перевищує  $0,03 \text{ Кі/км}^2$  ( $1,1 \text{ КБк/м}^2$ ), стронцієм-90 — менше  $0,1 \text{ Кі/км}^2$  ( $3,7 \text{ КБк/м}^2$ ). Мулові відклади, які містились в колишньому руслі Дніпра і мали підвищений рівень забруднення цезієм-137, нині, ймовірно, розмиті і винесені в Дніпро-Бузький лиман і далі в Чорне море. Проте, за нашим припущенням, це не мало негативно вплинути на радіоекологічний стан моря, оскільки активність  $^{137}\text{Cs}$  у воді північно-західної частини моря завжди була в 20–30 разів вища, ніж у дніпровській воді.

**Ключові слова:** водосховище, донні відклади, завислі наноси, радіоактивне забруднення, цезій-137, стронцій-90, бекерель.

### ВСТУП

Каховське водосховище є частиною Дніпровської водної системи, верхів'я якої зазнали значного радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської аварії. Руйнування греблі Каховської ГЕС військами РФ призвело до швидкого витоку води з водосховища, який супроводжувався скаламученням донних відкладів водосховища і винесенням скаламученого матеріалу в Дніпро-Бузький лиман і далі — в Чорне море. Оскільки через бойові дії контролювати якість води було неможливо, виникла потреба оцінити передвоєнний стан радіоак-

тивного забруднення Каховського водосховища і можливість погіршення якості природного середовища за показниками радіоактивного забруднення у зоні впливу цієї катастрофи, яка включає території, що були затоплені під час аварійного витоку води з водосховища, акваторію Дніпро-Бузького лиману, а також акваторію Чорного моря в зоні дії постійної вздовжберегової течії.

**Вивченість проблеми радіоактивного забруднення Каховського водосховища.** Перед аварією на Чорнобильській АЕС системи державного радіаційного моніторингу поверхневих вод не існувало.

Проте, в рамках реалізації проєкту будівництва Запорізької АЕС (ЗАЕС) і подальшої її експлуатації, лабораторією зовнішнього радіаційного контролю ЗАЕС проводився моніторинг концентрацій активності  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  у воді Каховського водосховища (Бронников и др., 1994).

Перший відбір і радіонуклідний аналіз зразків води та донних відкладів був зроблений фахівцями НВО "Тайфун" Держгідромету СРСР у травні 1986 р. (Ізраель та ін., 1990). Пізніше (у липні–листопаді 1986 р.) фахівці Інституту біології південних морів АН УРСР (ІнБПМ) щомісячно визначали концентрації активності  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  у воді, яку відбирали у Новій Каховці, Золотій Балці та Нікополі (Kulebakina & Polikarpov, 1991, Polikarpov et al., 1991). Регулярні спостереження за активністю  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  у воді поблизу Нової Каховки у 1987–1992 рр. проводили місцеві санітарно-епідеміологічні станції Мінздраву УРСР, у період з 1988 р. по 2001 р. такі ж спостереження проводили лабораторії Мінводгоспу УРСР (України). Центральна геофізична обсерваторія ім. Бориса Срезневського Гідрометеорологічної служби України (ЦГО) розпочала регулярні спостереження за рівнями радіоактивного забруднення води Каховського водосховища у 1990 р. і проводила їх до лютого 2022 р. Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України (УкрГМІ) у 1987–2000 рр. проводив зйомки радіоактивного забруднення води Каховського водосховища у навігаційний період (1–6 разів на рік). Радіоекологічні дослідження на Каховському водосховищі у 1987–1989, 1994 рр. проводив Інститут гідробіології АН УРСР (ІГБ), ці дослідження супроводжувалися визначенням концентрацій активності  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  у воді на різних ділянках водосховища (Кузьменко та ін., 1992, Романенко та ін., 1992).

У 1987 р. НВО "Тайфун" за участі УкрГМІ виконало першу оцінку радіоактивного забруднення донних відкладів Каховського водосховища, відібравши та проаналізувавши 20 зразків донного ґрунту.

У 1988 р. фахівцями УкрГМІ за периметром водосховища було відібрано проби ґрунту зі прибережних схилів для оцінки щільності забруднення прибережних територій радіонуклідами та розрахунку частки аерозольних радіоактивних випадіннь 1986 року в загальному радіоактивному забрудненні Каховського водосховища.

У 1989–1992 рр. УкрГМІ на замовлення Запорізького річкового порту виконав наступні пошукові роботи на Каховському водосховищі: 1) дослідження радіоактивного та хімічного забруднення донних відкладів на ділянці майбутнього будівництва причалу елеватора в районі с. Велика Лепетиха (звіт 1989 року); 2) дослідження радіоактивного та хі-

мічного забруднення донних відкладів на ділянках майбутніх кар'єрів для видобутку піску в районі сіл Лисогірка і Червонодніпровка (звіт 1992 року).

У 1993–1994 рр. УкрГМІ на замовлення Мінчорнобиля України виконав детальну зйомку радіоактивного забруднення донних відкладів Каховського водосховища використовуючи досконале пробовідбірне обладнання. Усього було відібрано 170 колонок донних відкладів. За результатами зйомки було побудовано карту-схему розподілу  $^{137}\text{Cs}$  за площею дна водосховища в Кюрі/км<sup>2</sup>.

У подальші роки фахівці УкрГМІ періодично відбирали колонки донних відкладів на ділянці колишнього русла Дніпра навпроти Енергодару (135 км суднового ходу), яка відноситься до зони стабільного мулонакопичення. В цих колонках вивчали вертикальний розподіл радіонуклідів, щільності відкладів, розраховували темпи мулонакопичення. Останню таку колонку було відібрано і досліджено у 2020 році.

У 1995 і 2012 рр. УкрГМІ відбирав колонки донних відкладів у водоймі-охолоджувачі Запорізької АЕС щоб оцінити ступінь їх радіоактивного забруднення і порівняти з результатами отриманими для інших водойм, зокрема — для Каховського водосховища.

Частина результатів досліджень УкрГМІ містяться у наукових публікаціях та виданнях МАГАТЕ (Voitsekhovych et al., 1996, Войцехович и др., 1997, IAEA, 2006, Kanivets et al., 1998, Sansone et al., 1996).

**Джерела та шляхи радіоактивного забруднення Каховського водосховища.** Перед аварією на ЧАЕС вміст радіоактивних речовин у водосховищі відповідав рівням глобального забруднення, яке сформувалося у результаті випробувань ядерної зброї в атмосфері. На той час активність  $^{137}\text{Cs}$  у річках і водоймах даної широтної зони була менше 1 Бк/м<sup>3</sup>,  $^{90}\text{Sr}$  — 10–30 Бк/м<sup>3</sup> (Бочков и др., 1983, Гедеонов и др., 1993). За даними лабораторії зовнішнього радіаційного контролю ЗАЕС концентрації активності  $^{137}\text{Cs}$  у воді водойми-охолоджувача ЗАЕС і у водах прилеглої до ЗАЕС акваторії Каховського водосховища змінювалися у діапазоні 0,17–5,1 Бк/м<sup>3</sup>, активності  $^{90}\text{Sr}$  становили в середньому 8,3 Бк/м<sup>3</sup> (Бронников и др., 1994).

Аварія на ЧАЕС призвела до викиду в атмосферу великої кількості радіоактивних речовин. Випадіння  $^{137}\text{Cs}$  у складі аерозолів на акваторію Каховського водосховища почалося 29 квітня 1986 р. коли повітряні маси, забруднені над зруйнованим чорнобильським реактором, почали розповсюджуватися у південному напрямку (Махонько, 1987). Найінтенсивніші випадіння відбулися переважно 1–3 травня

і продовжувалися до кінця травня. За розрахунками УкрГМІ, які базувалися на дослідженні забруднення прилеглих до водосховища територій, внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС на водну поверхню Каховського водосховища разом з аерозолями з атмосфери випало 65 Кюрі (або 2,4 ТБк)  $^{137}\text{Cs}$ . Одночасно водним шляхом у верхню частину Каховського водосховища почали надходити забруднені радіоактивними аерозольними випадіннями з атмосфери води Дніпровського водосховища. Оскільки ДніпроГЕС та Середньодніпровська ГЕС відразу після аварії почали скидати великі об'єми води і робили це протягом першої половини травня, в той час як Каховська ГЕС пропускала набагато менше води, можна припустити, що в Каховське водосховище протягом травня могло надійти не менше 30 Ки (або 1,1 ТБк)  $^{137}\text{Cs}$ , який випав з аерозолями на водну поверхню Дніпровського та Кам'янського водосховищ. Стронцію-90 у випадіннях 1986 р. на акваторії усіх перелічених водосховищ не було виявлено, цей радіонуклід почав надходити в Каховське водосховище восени — коли фронт забруднених у верхів'ях Дніпра вод минув весь каскад водосховищ і досяг Каховського водосховища.

Фронт забруднених стронцієм-90 вод, який сформувався безпосередньо у верхів'ях Дніпровського басейну, ймовірно, досяг верхньої частини Каховського водосховища у вересні 1986 року (Kulebakina & Polikarpov, 1991, Polikarpov et. al, 1991). Після цього почалося безперервне надходження радіонуклідів водним шляхом з забруднених водозборів Прип'яті та Верхнього Дніпра, яке триває донині.

### БАГАТОРІЧНІ ТЕНДЕНЦІЇ ТА СУЧАСНИЙ СТАН РАДІОАКТИВНОГО ЗАБРУДНЕННЯ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

За даними НВО "Тайфун" у травні 1986 р. концентрації активності  $^{137}\text{Cs}$  у воді Каховського водосховища сягали  $120 \text{ Бк/м}^3$ , на два порядки перевищуючи доаварійний рівень забруднення (Ізраель та ін., 1990). Третина активності  $^{137}\text{Cs}$  у воді була асоційована із завислими наносами. Через швидке осідання радіоактивних аерозолів на дно, а також завдяки процесам седиментаційного самоочищення водної маси концентрації активності  $^{137}\text{Cs}$  у воді почали зменшуватися і в липні-листопаді 1986 р. змінювалися в діапазоні  $4\text{--}15 \text{ Бк/м}^3$  (Kulebakina & Polikarpov, 1991, Polikarpov et. al, 1991). Концентрації активності  $^{90}\text{Sr}$  в липні-вересні 1986 р. були на рівні близькому до передаварійного і на ділянці Золота Балка – Нова Каховка коливалися в діапазоні  $20\text{--}60 \text{ Бк/м}^3$  (Kulebakina & Polikarpov, 1991, Polikarpov et. al, 1991). Фронт забруднених стронцієм-90 вод досяг Нікополя на початку жовтня, Золотої Бал-

ки — у середині листопада 1986 р. Максимальні концентрації активності  $^{90}\text{Sr}$  під час проходження цього фронту через Каховське водосховище становили  $700\text{--}860 \text{ Бк/м}^3$  (Kulebakina & Polikarpov, 1991, Polikarpov et. al, 1991), у десятки разів перевищуючи передаварійний рівень забруднення. Такі ж результати —  $740\text{--}925 \text{ Бк/м}^3$  — було отримано лабораторією зовнішнього радіаційного контролю ЗАЕС (Бронников и др., 1994). Проходження цієї забрудненої водної маси тривало до червня 1987 р., після чого почалося повільне зменшення концентрацій активності стронцію-90 і в грудні 1987 року вони стабілізувалися на рівні  $220\text{--}260 \text{ Бк/м}^3$ .

З 1988 р. намітилися сталі тренди зменшення середньорічних значень концентрацій активності  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  у воді Каховського водосховища (рис. 1 і 2). З них випливає, що концентрації активності  $^{137}\text{Cs}$  у воді Каховського водосховища з 1996 р. перебувають на передаварійному (фоновому) рівні. Це озна-

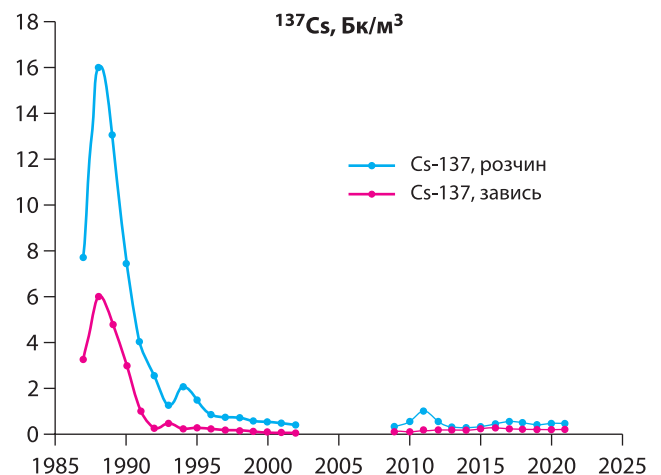


Рис. 1. Зміна середньорічних значень концентрацій активності  $^{137}\text{Cs}$  у воді Каховського водосховища, м. Нова Каховка, 1987–2021 рр. (використано дані НВО "Тайфун", ЦГО, лабораторій Мінздраву і Мінводгоспу УРСР (з 1992 — Держводгоспу України), УкрГМІ, ІнБПМ)

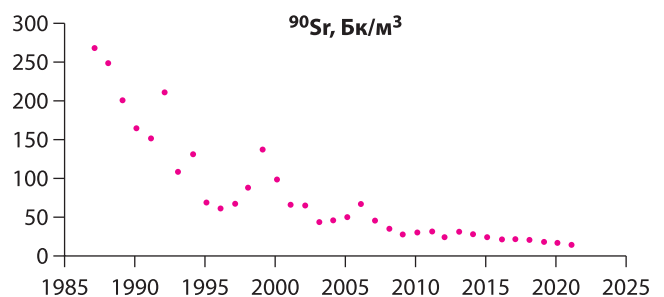


Рис. 2. Зміна середньорічних значень концентрацій активності  $^{90}\text{Sr}$  у воді Каховського водосховища, м. Нова Каховка, 1987–2021 рр. (використано дані ІнБПМ, НВО "Тайфун", ІГБ НАНУ, Мінздраву і Мінводгоспу, ЦГО, УкрГМІ)

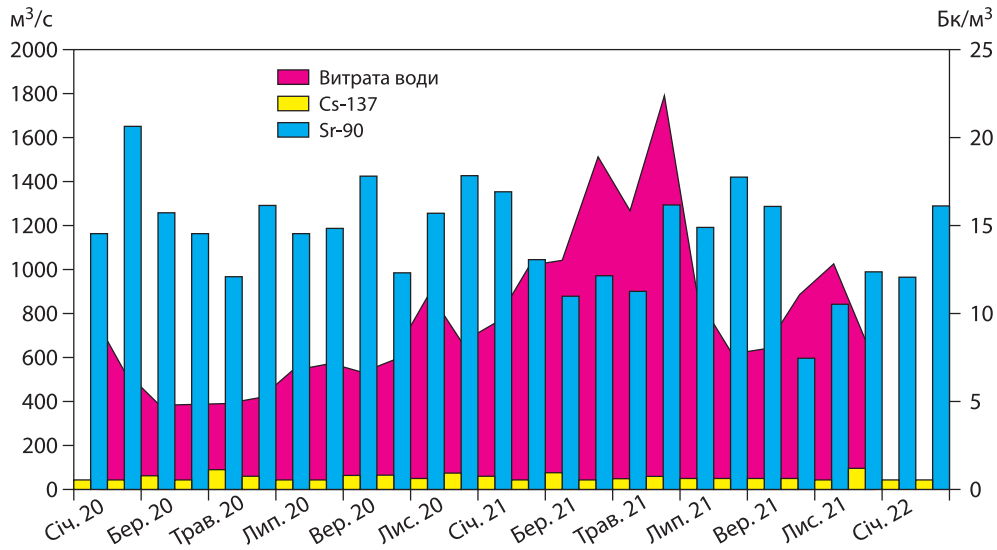


Рис. 3. Хід концентрацій активності <sup>137</sup>Cs і <sup>90</sup>Sr у воді Каховського водосховища в 2020–2021 рр., дані ЦГО

чає, що з 1996 р. весь чорнобильський <sup>137</sup>Cs, який вноситься річками з забруднених водозборів Верхнього Дніпра та Прип'яті, переходить у розташованих вище водосховищах Дніпровського каскаду і до Каховського водосховища не надходить.

Темпи зменшення концентрацій активності <sup>90</sup>Sr у воді Каховського водосховища нижчі, оскільки через високу хімічну мобільність цього радіонукліду він інтенсивніше за <sup>137</sup>Cs, змивається у річки з забруднених територій і переноситься переважно у розчиненому стані. З 1988 р. спостерігалось ще чотири хвилі підвищеного забруднення дніпровської води стронцієм-90 (рис. 2), які пройшли через Каховське водосховище у 1992, 1994, 1999–2000 і 2006 рр. та були спричинені зливом цього радіонукліду з забрудненої заплави р. Прип'ять у зоні відчуження ЧАЕС (зимовий паводок 1991 р., весняні повені 1993, 1999 і 2005 рр.)

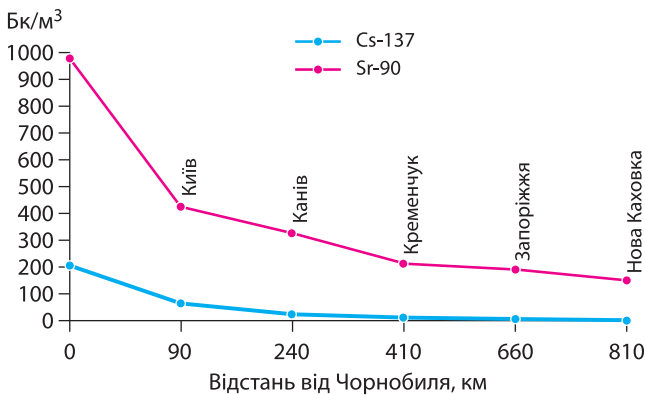


Рис. 4. Зміна середньорічних значень концентрацій активності <sup>137</sup>Cs і <sup>90</sup>Sr у воді за довжиною Дніпровського каскаду, 1991 р. (за даними УкрГМІ, УДК НВО "Прип'ять", ЦГО, Мінводгоспу, Мінздраву, КиївВодоканалу)

Час проходження радіоактивно забруднених водних мас із верхів'їв Дніпровської водної системи через всі дніпровські водосховища і лиман до Чорного моря (довжина шляху — понад 900 км у середні за водністю роки) становить 12 місяців (Тимченко и Новиков, 1992). У роки з високою водністю, коли всі дніпровські ГЕС працюють у режимі безперервного пропускання надлишкової води, фронт хвилі забруднення досягає гирла Дніпра за 3–4 місяці.

На рисунку 3 показано зміни концентрацій активності <sup>137</sup>Cs та <sup>90</sup>Sr в 2020–2021 рр., що перебували на стабільних низьких рівнях, які склалися в останні роки.

За шляхом переміщення водних мас концентрації радіонуклідів зменшуються внаслідок розбавлення забрудненої води чистими водами бічних притоків, сорбції радіонуклідів (насамперед <sup>137</sup>Cs) завислими наносами і подальшої їх седиментації (Канивец, 1996). Споруджені на Дніпрі водосховища є, по суті, колосальними седиментаційними пастками, що перехоплюють, практично, увесь матеріал зависеутворення. Уповільнене проходження водних мас від верхів'їв до гирла через усю ємність каскаду водосховищ створює ідеальні умови для накопичення <sup>137</sup>Cs та інших забруднюючих речовин в усіх компонентах водної екосистеми. Внаслідок сорбції <sup>137</sup>Cs завислими наносами та подальшої їх седиментації відбувається самоочищення водної маси від цього радіонукліду (Канивец, 1996).

У результаті, концентрації <sup>137</sup>Cs від м. Чорнобиль до м. Нова Каховка зменшуються на два порядки і виходять на рівень фонових значень. Концентрації <sup>90</sup>Sr зменшуються лише удвічі (рис. 4).

За весь післячорнобильський період не було випадків перевищення встановленого нормативу для питної води (2 Бк/л окремо для Cs і  $^{90}\text{Sr}$ ). У 1986–1992, а також у 1999–2000 рр. були випадки перевищення контрольного рівня для води, яка мала використовуватися для зрошення рисових чеків (222 Бк/м<sup>3</sup> за стронцієм-90), нині повторення таких ситуацій вважається малоімовірним.

Потенційним джерелом радіоактивного забруднення Каховського водосховища була Запорізька АЕС. Радіаційним моніторингом води у Каховському водосховищі, який проводила в 1990–2021 рр. Українська гідрометеорологічна служба, не виявлено випадків негативного впливу Запорізької АЕС на якість води у водосховищі.

У 1995 і 2012 рр. фахівці УкрГМІ досліджували стан радіоактивного забруднення водойми-охолоджувача ЗАЕС (ВО ЗАЕС) і бризкальних басейнів. Підвищені рівні активності гамма-випромінюючих радіонуклідів у 1995 р. було виявлено тільки у воді бризкальних басейнів ЗАЕС, а також у донних осадах, які вдалося зібрати зі дна цих басейнів.

В обох випадках колонки відкладів було відібрано у найглибшому місці ВО — глибоко врізаному в заплаву колишньому руслі Дніпра. У глибоководних мулових відкладах ВО ЗАЕС зі штучних гамма-випромінюючих радіонуклідів було зафіксовано наявність тільки  $^{137}\text{Cs}$ . У 1995 р. у відкладах виразно виділявся шар “чорнобильського” забруднення, товщина якого становила 25 см,  $^{137}\text{Cs}$  був майже

рівномірно розподілений у цьому шарі, його активність становила близько 600 Бк/кг сухої ваги. Такий характер розподілу був, на нашу думку, непрямим свідченням домінування процесу транседиментації у формуванні товщі відкладів — поступового багаторічного переміщення забруднених у 1986 р. часток в колишнє русло з прилеглих ділянок затопленої заплави. Саме це явище заважає датувати товщу донних відкладів використовуючи як ізотопний маркер  $^{210}\text{Pb}$ .

Дочорнобильські рівні активності  $^{137}\text{Cs}$  у мулових відкладах ВО ЗАЕС та Каховського водосховища у 1995 р. виявилися близькими — 60–100 Бк/кг. Наступне і останнє дослідження донних відкладів ВО ЗАЕС було проведено у вересні 2012 р. під час експедиції УкрГМІ на каскаді дніпровських водосховищ.

Розподіл  $^{137}\text{Cs}$  у метровій товщі мулових відкладів у найглибшому місці ВО виявився практично рівномірним без якогось помітного тренду (рис. 5а). Питома активність змінювалася у діапазоні 12–23 Бк/кг (сухої ваги відкладів), середнє значення становило 16 Бк/кг. Це у 5–8 разів нижче дочорнобильських рівнів активності  $^{137}\text{Cs}$  у донних відкладах ВО ЗАЕС і у 30–50 разів нижче тих активностей які було виявлено в шарі 0–21 см в 1995 р.

Таким чином, можна зробити попередній висновок, що шари мулу з підвищеним вмістом  $^{137}\text{Cs}$  чорнобильського походження, які було виявлено у ВО ЗАЕС в 1995 р., нині перекриті не менш як

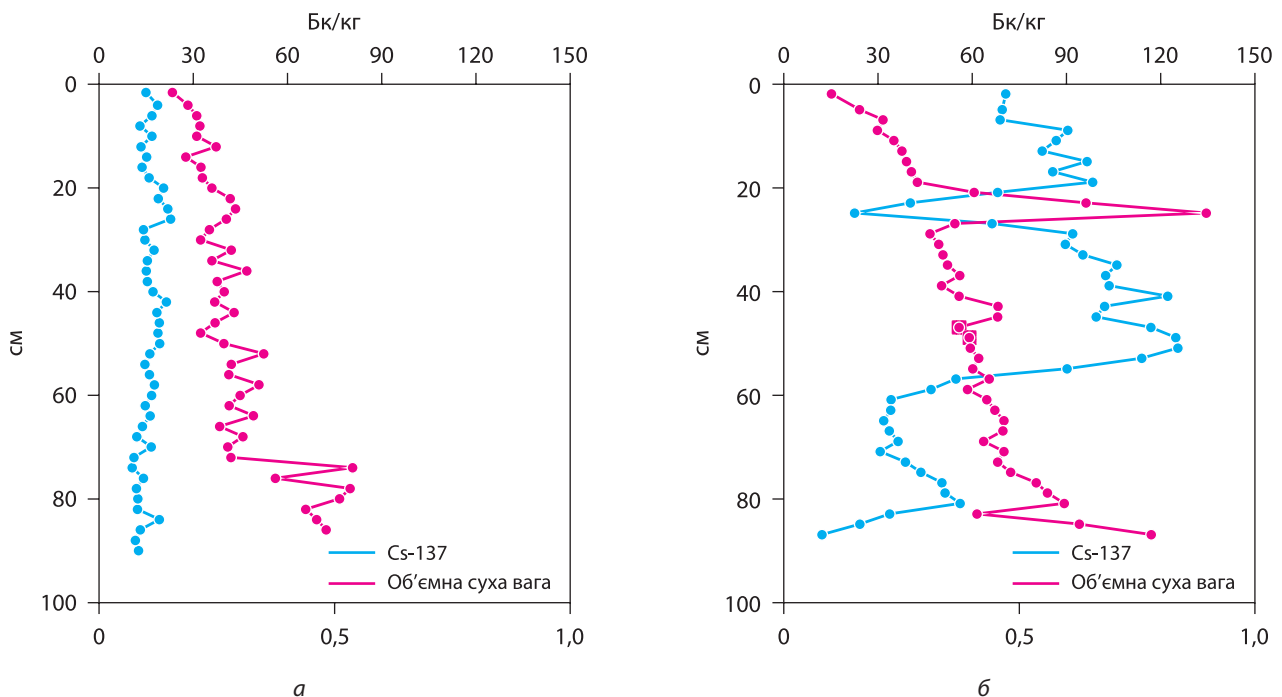


Рис. 5. Вертикальний розподіл  $^{137}\text{Cs}$  у мулових відкладах ВО ЗАЕС (а) і Каховського водосховища (б) в 2012 р.

однометровим шаром мулу, який утворився після 1995 р. і питома активність якого за  $^{137}\text{Cs}$  менша, ніж була до чорнобильської аварії. Додатковим аргументом на користь такого припущення є зменшення глибини в місці відбирання проб на 1,5 м з 1995 до 2012 р.

Низька об'ємна вага відкладів у шарі 0–72 см може свідчити про те, що цей шар утворився за короткий період (кілька років, на нашу думку). У верхній частині (0–10 см) він мав рідку консистенцію, нижче — 10–72 см — м'яку консистенцію, в цьому ж шарі під час поділу колонки відбувалося інтенсивне газовиділення. Тобто, осад у шарі 0–72 см перебував, ймовірно, на початковій стадії діагенезу, коли відбувається фізико-хімічне урівноваження його первинних компонентів. Глибше 72 см мул був в'язким і щільним. Це наводить на думку, що муло-накопичення на глибоководних ділянках ВО ЗАЕС є нерівномірним і, можливо, спонтанним — коли за короткий період часу на невеликій ділянці накопичується велика кількість мулового матеріалу.

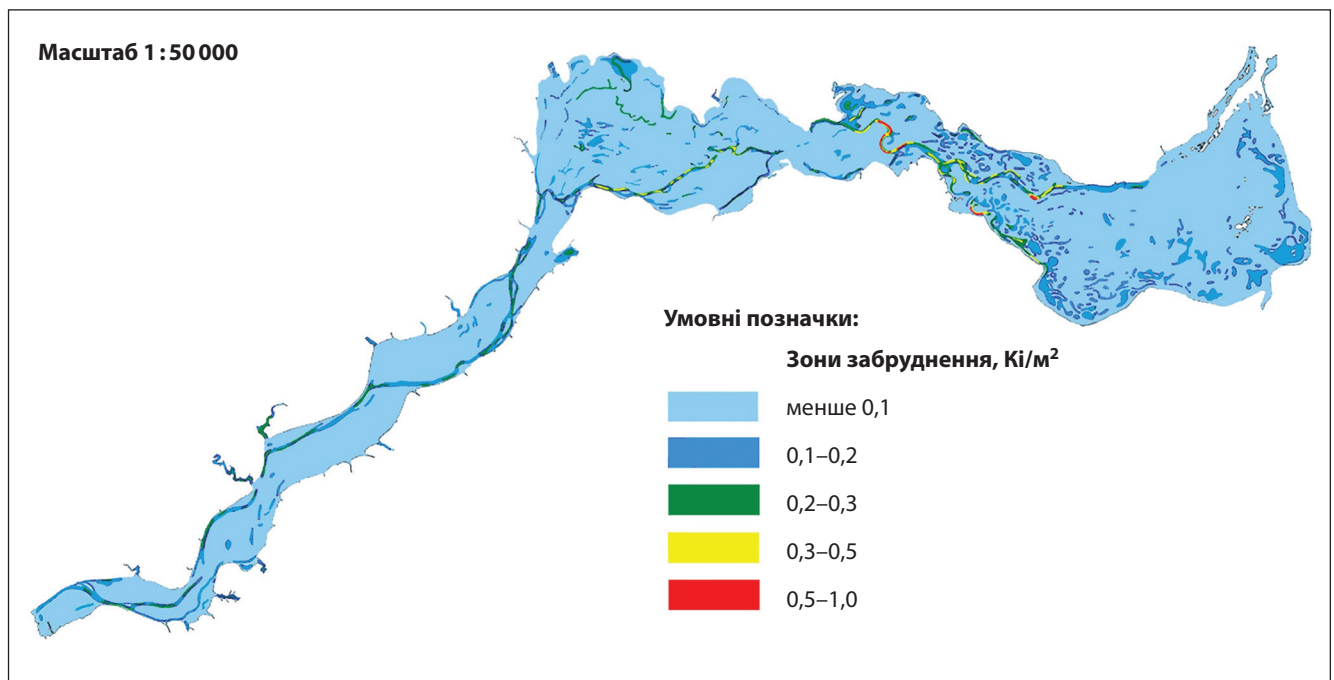
На основі наведених вище даних було зроблено такий загальний висновок: "Низький рівень вмісту  $^{137}\text{Cs}$  у донних відкладах ВО ЗАЕС, а також відсутність у них інших штучних гамма-випромінюючих радіонуклідів є **свідченням безпечної роботи Запорізької АЕС до 2012 року та, ймовірно, до захоплення ЗАЕС військами РФ.**

**Стан радіоактивного забруднення донних відкладів Каховського водосховища.** Як згадувалося вище, першу оцінку радіоактивного забруднення

донних відкладів Каховського водосховища було зроблено фахівцями НВО "Тайфун" Держкомгідромету СРСР на основі рекогносцирувальної зйомки донних відкладів, проведеної ними у травні 1987 р. (Израэль и др., 1990). За результатами цієї зйомки було розраховано кількість активності  $^{137}\text{Cs}$  у донних відкладах водосховища, яка склала 65 Кі. За даними НВО "Тайфун" весь  $^{137}\text{Cs}$  на той час містився у верхньому 5-см шарі відкладів.

У 1993–1994 рр. УкрГМІ на замовлення Мінчорнобиля України виконав детальну зйомку радіоактивного забруднення донних відкладів Каховського водосховища з використанням найдосконалішого пробовідбірного обладнання і застосуванням найчутливіших методів радіонуклідного аналізу. На той час ареали радіоактивного забруднення дна у водосховищі остаточно сформувалися і стабілізувалися. Концентрації активності  $^{137}\text{Cs}$  у воді зменшилися до передаварійного рівня, чорнобильський  $^{137}\text{Cs}$  з вищерозташованого Запорізького водосховища вже майже не надходив. На *рис. 6* наведено карту-схему розподілу активності  $^{137}\text{Cs}$  за площею дна Каховського водосховища станом на 1995 рік. Карту побудовано в масштабі 1 : 50000 за даними аналізування 170 колонок донних відкладів, також було враховано результати, які УкрГМІ отримав у 1992 проводячи детальні зйомки на великих ділянках у верхній частині водосховища.

З розрахунків площ дна між ізолініями забруднення витікає, що більше ніж на 80% поверхні дна Каховського водосховища щільність забруднення



**Рис. 6.** Цезій-137 у донних відкладах Каховського водосховища, 1993–1994 рр.

цезієм-137 була менше 0,1 Кюри/км<sup>2</sup> (3,7 кБк/м<sup>2</sup>), у середньому — 0,06 Ки/км<sup>2</sup> (2,2 кБк/м<sup>2</sup>). Це нижче середньої щільності забруднення прилеглих до водосховища територій (0,075 Ки/км<sup>2</sup> або 2,8 кБк/м<sup>2</sup>). Середня величина щільності забруднення дна усього водосховища становила у 1994 р. 0,084 Ки/км<sup>2</sup> (3,1 кБк/м<sup>2</sup>).

У донних відкладах більшої частини акваторії <sup>137</sup>Cs містився у верхньому 5-см шарі відкладів. Мінімальні щільності забруднення дна спостерігалися у верхній русловій частині водосховища (від греблі ДніпроГЕСу до с.Біленьке) і в середньому становили 0,04 Ки/км<sup>2</sup> (1,5 кБк/м<sup>2</sup>). Найбільші щільності забруднення виявлені нами у центральній частині водосховища на ділянці Благівіщенка–Енергодар–Червоногригорівка — від 0,1 до 0,9 Ки/км<sup>2</sup> (у середньому 0,173 Ки/км<sup>2</sup> або 6,4 кБк/м<sup>2</sup>). Загальна величина активності цезію-137 у донних відкладах Каховського водосховища у 1993–1994 р. становила 160–210 Ки (5,9–7,8 ТБк).

Вказана величина виявилася втричі більшою за ту, яку отримало НВО “Тайфун” (Израель, 1990). Причиною розбіжності була різна якість виконання пробовідбірних робіт. УкрГМІ відібрав на порядок більше проб донних відкладів, місця для відбирання проб призначали з урахуванням донного рельєфу і місцезнаходження ділянок на яких, за законами гідро- і літодинаміки, мали бути найвищі темпи мулонакопичення і, відповідно, найбільші щільності забруднення дна цезієм-137. НВО “Тайфун” орієнтувалося на зовнішні контури водосховища, призначивши по три місця пробовідбирання на кількох поперечних розрізах — у правого та лівого берегів і посередині розрізу. УкрГМІ використовував досконалі пробовідбірники колонкового типу, контролюючи вертикальний розподіл радіонуклідів у товщі донних відкладів і повноту проходження забрудненого шару відкладів пробовідбиральним циліндром. НВО “Тайфун” використовував дночерпач СДч-0,025 (Петерсона), який був негерметичним і призначався для відбирання порушених поверхневих шарів донного ґрунту. Сукупність цих недоліків неминуче призводила до систематичного недообліку активності радіонуклідів на одиниці площі дна. Тому результат, отриманий фахівцями УкрГМІ мав бути більш точним.

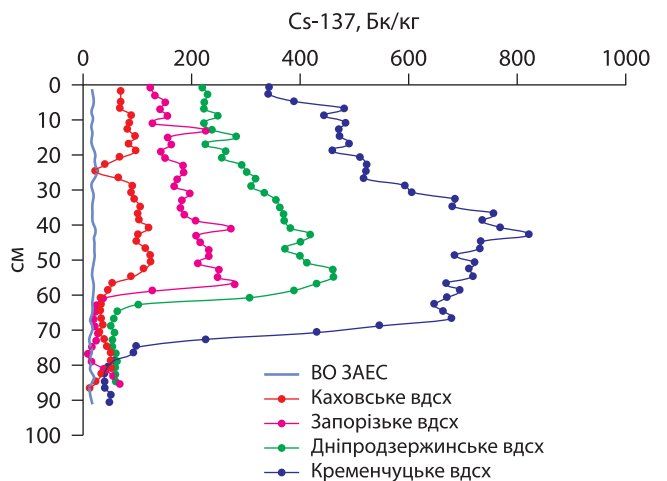
Більша частина активності <sup>137</sup>Cs зосереджена на глибоководних ділянках водосховища до яких відноситься колишнє русло Дніпра з його рукавами та старицями, озера на колишній заплаві Дніпра. Це зумовлено закономірностями гідродинамічних процесів, які протікають у великих рівнинних водосховищах і призводять до поступового переміщення тонкодисперсних найзабрудненіших часток з

мілководних ділянок на глибоководні. Це явище у озерній літодинаміці називається трансседиментацією (“sediment focusing”), воно призводить до очищення мілководних ділянок від мулових часток з подальшим осіданням і накопиченням цих часток на глибоководних ділянках. У результаті цього процесу на всіх дніпровських водосховищах спостерігається поступове захоронення забруднених відкладів, які утворилися в перші роки після аварії на Чорнобильській АЕС під шаром більш чистих відкладів, які утворювалися пізніше (рис. 7).

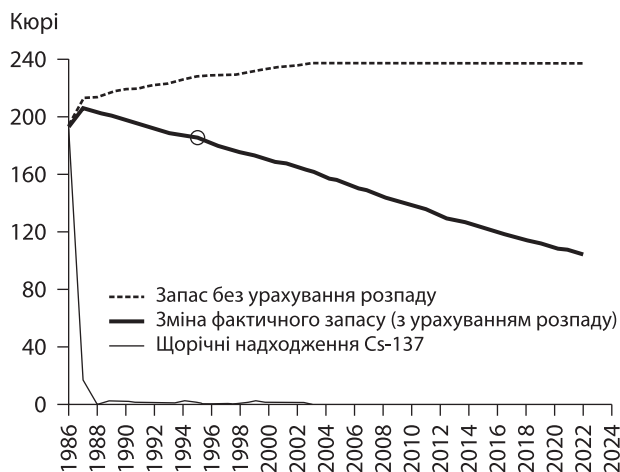
Із даних, наведених на рис. 7 видно, що мулові відклади Каховського водосховища характеризувалися найнижчим рівнем активності <sup>137</sup>Cs, серед донних відкладів тих водосховищ, які в 2012 р. було досліджено УкрГМІ. З цього ж рисунку видно, що активність <sup>137</sup>Cs у відкладах дніпровських водосховищах зменшується униз по Дніпру, що свідчить про чорнобильське походження цього радіонукліду в екосистемі Дніпра, про значущість процесів природного самоочищення дніпровської води від радіонуклідів під час її тривалої міграції із верхів'їв Дніпра через усю ємкість Дніпровського каскаду. За нашими розрахунками донні відклади Каховського водосховища за цезієм-137 в 1994 р. були в 30 разів “чистіші” за донні відклади Київського водосховища.

Оскільки водойма-охолоджувач ЗАЕС є ізольованою від Дніпра, то цілком очікуваним є те, що активність <sup>137</sup>Cs у її мулових донних відкладах є істотно нижчою ніж у мулових відкладах на прилеглий ділянці Каховського водосховища (рис. 7).

Приблизно з 1996 року, концентрації активності <sup>137</sup>Cs у воді Каховського водосховища знизилися до фонового передчорнобильського рівня, тому



**Рис. 7.** Вертикальний розподіл питомої активності <sup>137</sup>Cs в 1-метровому поверхневому шарі мулових відкладів дніпровських водосховищ і ВО ЗАЕС на ділянках найбільшого мулонакопичення, 2012 р., дані УкрГМІ

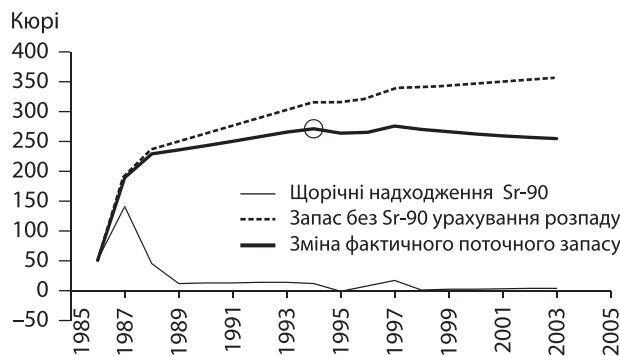


**Рис. 8.** Зміна запасу активності <sup>137</sup>Cs у донних відкладах Каховського водосховища, 1986–2022 рр.

О — цим символом позначено запаси, які було визначено шляхом зйомки донних відкладів, за інші роки величини запасів отримано шляхом розрахунку

накопичення <sup>137</sup>Cs у донних відкладах водосховища припинилося і загальна кількість активності цього радіонуклідом почала зменшуватися через процес природного радіоактивного розпаду (рис. 8). За нашими розрахунками у донних відкладах Каховського водосховища перед його знищенням, містилося 100–110 Ки активності <sup>137</sup>Cs (3,9 ТБк), середня щільність забруднення дна цим радіонуклідом становила 0,05 Ки/км<sup>2</sup> (1,9 кБк/м<sup>2</sup>), що збігалось з рівнем забруднення прилеглої до водосховища території.

Детальних досліджень забруднення дна Каховського водосховища стронцієм-90 УкрГМІ не проводив, оскільки за високої вартості лабораторних аналізів цього радіонуклідом і в умовах обмеженого фінансування досліджень неможливо було проаналізувати достатню кількість проб для побудови карти забруднення дна цим радіонуклідом. Окремі вимірювання показали, що в різних типах донних відкладів (пісках, мулах тощо) в усіх випадках ак-



**Рис. 9.** Зміна запасу активності <sup>90</sup>Sr у донних відкладах Каховського водосховища, 1986–2003 рр.

тивності <sup>90</sup>Sr були в півтора-два рази вищими за активності <sup>137</sup>Cs.

Тому в УкрГМІ було приблизно оцінено кількість <sup>90</sup>Sr у донних відкладах всього Каховського водосховища за даними радіаційного моніторингу дніпровської води. За даними про концентрації активності цього радіонуклідом у воді, яка надходила у Каховське водосховище з вищерозташованого Запорізького водосховища, розраховували щомісячне і щорічне надходження <sup>90</sup>Sr у Каховське водосховище. За даними про концентрації активності <sup>90</sup>Sr в дніпровській воді у створі Дніпро-Нова Каховка розраховували щомісячне та щорічне винесення цього радіонуклідом з Каховського водосховища у Дніпро-Бузький лиман <sup>90</sup>Sr через споруди Каховської ГЕС. Різницю між надходженням і винесенням вважали величиною накопичення в донних відкладах. На рис. 9 наведено графік зміни кількості активності <sup>90</sup>Sr у донних відкладах Каховського водосховища для періоду 1986–2003 рр. із урахуванням процесу природного радіоактивного розпаду цього радіонуклідом.

З цього графіку випливає, що максимальна кількість активності <sup>90</sup>Sr у донних відкладах Каховського водосховища була у 1991 р. і становила 295 Кюрі (11 ТБк). У період 1992–2003 рр. запас активності був відносно стабільним і змінювався у діапазоні 250–270 Кюрі. Розрахувати зміни запасу активності <sup>90</sup>Sr після 2003 р. неможливо через припинення спостережень за стоком радіонуклідом з Дніпровського водосховища. За нашими припущеннями на момент руйнування дамби Каховської ГЕС у донних відкладах Каховського водосховища могло бути близько 200±30 Кюрі <sup>90</sup>Sr (7,4 ТБк).

### ЩОДО МОЖЛИВИХ РАДІАЦІЙНИХ НАСЛІДКІВ ОПОРОЖНЕННЯ ВОДОСХОВИЩА

Ділянки дна, які вийшли на денну поверхню у червні 2023 року внаслідок зниження рівня води у водосховищі через руйнування греблі Каховської ГЕС, являють собою колишню заплаву Дніпра. За 70 років існування водосховища під дією гідродинамічних, фізико-хімічних та біологічних факторів відбулося значне трансформування і руйнування первинних ґрунтів, які вкривали цю територію до затоплення. Велика частина цієї оголеної території являє собою добре відсортовані піщані відклади, інша значна за площею частина являє собою супіщані (подекуди суглинисті), ґрунти з домішкою пилуватих часток і великою кількістю стулок дрейсени.

Ця обсохла територія характеризується вкрай низьким рівнем забруднення ґрунту цезієм-137, який не перевищує рівень забруднення прилеглих





**Рис. 10.** Самозаростання обсохлих ділянок дна водойми-охолоджувача Чорнобильської АЕС, 2016 р., через 2 роки після обсихання (на фото зліва видно потужні відклади стулок дрейсени)

до водосховища територій. У ґрунтах цієї території може залишатися не більше  $50 \pm 5$  Кі  $^{137}\text{Cs}$  (1,9 ТБк), тобто, менше половини усієї активності  $^{137}\text{Cs}$ , яка була на момент руйнування греблі у донних ґрунтах всього водосховища. За нашими розрахунками нині середня величина щільності забруднення цієї обсохлої території цезієм-137 не перевищує  $0,03$  Кі/км<sup>2</sup> ( $1,1$  кБк/м<sup>2</sup>), що нижче дочорнобильського рівня забруднення. Тому проблема радіаційних ризиків через вітровий підйом пилу не є актуальною як це було, наприклад, з осушеною територією водойми-охолоджувача ЧАЕС.

За два-три роки обсохла територія має густо вкритися травами і чагарниками характерними для цієї геоботанічної зони, як це сталося на обсохломому дні водойми-охолоджувача Чорнобильської АЕС в 2015–2016 рр. (рис. 10).

Інша частина активності  $^{137}\text{Cs}$  (не менше 65 Кі за нашими розрахунками) і  $^{90}\text{Sr}$  (40–50 Кі) перед руйнуванням греблі була у мулових ґрунтах колишнього русла Дніпра (менше 20% поверхні дна всього водосховища). Після аварійного спорожнення водосховища дніпровська вода увійшла в береги колишнього русла Дніпра. Режим течій у цьому руслі повернувся до природного. За законами розвитку руслового процесу (Кондратьев и др., 1982) це мало призвести до розмиву усієї товщі мулових відкладів, які накопичилися в руслі Дніпра за 70 років існування Каховського водосховища, і винесення 65 Кі  $^{137}\text{Cs}$  (2,4 ТБк) і 40–50 Кі  $^{90}\text{Sr}$  (1,5–1,9 ТБк) у Дніпро-Бузький лиман і далі в Чорне море.

Ймовірно, процес розмиву мулових відкладів які, накопичилися у колишньому руслі Дніпра і його рукавах, інтенсифікувався на завершальній стадії витоку води з водосховища і контролювався поширенням умов річкового режиму течій поступово від Запоріжжя до Нової Каховки. Очевидно найбільша

кількість мулового матеріалу почала надходити у Дніпро-Бузький лиман на спаді рівнів води на ділянці від Нової Каховки до впадіння Дніпра в лиман. Через зменшення у лимані швидкості стокової течії більша частина завислих наносів мала осісти на дно лиману. Певну частку найдрібніших часток ймовірно було винесено стоковою течією у море. Деяку частину радіонуклідів (не більше 10%  $^{137}\text{Cs}$  і 30–40%  $^{90}\text{Sr}$  має перебувати у водорозчинній та легкосорбованій формі у мулових відкладах нижніх дніпровських водосховищ), які могли розчинитися у річковій воді внаслідок скаламучення мулових відкладів, також було винесено у море стоковою течією. Ті наноси, які було затримано у лимані не погіршили радіаційний стан середовища, оскільки їх питома активність у 2023 р. вже була близькою до передчорнобильського фонового рівня. За приблизним розрахунком через розмив мулових відкладів Каховського водосховища безпосередньо в Чорне море могло потрапити 6–10 Кі  $^{137}\text{Cs}$  (0,22–0,37 ТБк) і 25–35 Кі  $^{90}\text{Sr}$  (0,93–1,3 ТБк).

За даними НВО "Тайфун" (Израель, 1990) станом на початок 1987 р. у водній товщі Чорного моря містилося близько 85 тисяч Кі  $^{137}\text{Cs}$  (3100 ТБк) і 45–50 тисяч Кі  $^{90}\text{Sr}$  (1700–1900 ТБк). Через природний радіоактивний розпад і виток через протоку Босфор (Kanivets et al., 1997) кількість активності  $^{137}\text{Cs}$  нині має становити не більше 40 тисяч Кі (1480 ТБк), активності  $^{90}\text{Sr}$  — близько 25–30 тисяч Кі (930–1100 ТБк).

Результати досліджень, які представлено в цій статті, отримано в ході виконання бюджетної теми УкрГМІ 14/21 "Комплексний аналіз і узагальнення результатів багаторічних спостережень за радіоактивним забрудненням річок і водосховищ зони впливу Чорнобильської аварії (р.р. Прип'ять, Дніпро, Десна, Дунай)."

## ВИСНОВКИ

Таким чином, кількість активності  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$ , яка могла потрапити в Чорне море внаслідок аварійного витоку води з Каховського водосховища становить не більше 0,02%  $^{137}\text{Cs}$  і 0,1%  $^{90}\text{Sr}$  від поточної загальної активності обох радіонуклідів у морі. Концентрації активності  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  у воді Чорного моря в 2003–2004 рр. за даними УкрГМІ становили по 20 Бк/м<sup>3</sup> (Канівець та ін., 2005). З урахуванням радіоактивного розпаду і витоку активності через Босфор нині вони мають бути на рівні 10 Бк/м<sup>3</sup>. За даним спостережень Гідрометеорологічної служби України концентрації активності  $^{137}\text{Cs}$  у дніпровській воді, яка витікала в Чорне море, в останнє десятиріччя були в 10–20 разів нижчі, ніж у морі,  $^{90}\text{Sr}$  — в півтора-три рази вищими. Імовірно, наприкінці витоку надлишкової води з Дніпро-Бузького лиману до Чорного моря мало місце деяке нетривале (кілька тижнів) перевищення концентрацій активності цих радіонуклідів над поточними попе-

редніми рівнями. Проте ситуація мала швидко стабілізуватися оскільки дніпровська вода підхоплюється постійною вздовж береговою Румелійською течією і транспортується у напрямку гирл Дністра і Дунаю поступово перемішуючись на цьому шляху з морською водою.

Невизначеність лишається лише з поточним радіаційним станом водойми-охолоджувача АЕС, до якої з лютого 2022 року немає доступу. Після деокупації і розмінування території ЗАЕС нагальною буде потреба дослідження радіаційного стану території ЗАЕС і водних об'єктів на цій території ( водойма-охолоджувач, бризгальні басейни, підвідний та відвідний канали, тощо). Якщо вони виявляться незабрудненими — можна сподіватися, що і Каховське водосховище також не зазнало радіоактивного забруднення. В іншому випадку доведеться проводити обстеження прилеглих до ВО ЗАЕС територій в межах чаші водосховища.

## ЛІТЕРАТУРА

- Бочков, Л.П., Вакуловский, С.М. Никитин, А.И., Тертышник, Э.Г., Чумичев, В.Б. (1983). О содержании цезия-137 в поверхностных водах суши. *Метеорология и гидрология*, 8, 79–83.
- Бронников, В.К., Верховецкий, В.К., Назипов, Р.М. и др. (1994). Запорожская АЭС и окружающая среда. Харьков: Изд-во "Харьков", 100 с.
- Войцехович, О.В., Канівець, В.В., Лаптев, Г.В. (1997). Современное состояние радиоактивного загрязнения водных объектов зоны влияния аварии. В кн.: Радиогеоэкология водных систем, подвергшихся загрязнению вследствие Чернобыльской аварии. Киев: Чернобыльинтеринформ, 60–96.
- Геденов, Л.И., Гритченко, З.Г., Иванова, Л.М., Орлова, Т.Е., Тишков, В.П., Топорков, В.П., Прокопенко, В.Ф. (1993). Радионуклиды стронция и цезия в воде низовья Дуная в 1985–1990 гг. *Атомная энергия*, 74, 1, 58–63.
- Израэль, Ю.А., Вакуловский, С.М., Ветров, В.А., Петров, В.И., Ровинский, Ф.Я., Стукин, Е.Д. (1990). Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред. Ленинград: Гидрометеоиздат, 296 с.
- Канівець, В.В. (1996). Анализ основных тенденций развития радиационной обстановки в Днепровской водной системе после Чернобыльской аварии. *Вісник аграрної науки*, 4, 39–48.
- Канівець, В.В., Деркач, Г.А., Луценко, С.И. (2005). Состояние радиоактивного загрязнения речных и морских вод Украины через два десятилетия после Чернобыльской аварии // Труды междунар. конф. "Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий" (Москва, 5–6 декабря 2005 г.). Москва.
- Кондратьев, Н.Е.; Попов, И.В.; Снищенко, Б.Ф. (1982). Основы гидроморфологической теории руслового процесса. — Изд-во: Ленинград: Гидрометеоиздат, 272 с.
- Кузьменко, М.И., Волкова, Е.Н., Кленус, В.Г. и др. (1992). Радиоактивное загрязнение Днепра и его водохранилищ и некоторые гидроэкологические мероприятия после аварии на ЧАЭС. *Гидробиол. журн.* 28, 6, 86–94.
- Махонько, К.П. (1987). Радиоактивное загрязнение территории СССР в 1986 году (Ежегодник) / под ред. К.П. Махонько, Обнинск, 134 с.
- Новиков, Б.И., Тимченко, В.М. (1992). Гидрологические условия миграции радионуклидов по каскаду днепровских водохранилищ. *Водные ресурсы*, 1, 95–102.
- Романенко, В.Д., Кузьменко, М.И., Євтушенко, М.Ю. и др. (1992). Радиоактивное и химическое загрязнение Днепра и его водохранилищ после аварии на Чернобыльской АЭС. Київ: Наукова думка, 194 с.
- IAEA (2006). Radiological Conditions in the Dnieper River Basin. IAEA RAR Series, Vienna, 2006, 185 p.
- Kanivets, V.V., Voitsekhovitch, O.V., Simov, V.G., Golubeva, Z.A. (1999). The post-Chernobyl budget of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in the Black Sea. *Journal of Environmental Radioactivity*, 43, 121–135.
- Kanivets, V.V., Voitsekhovich, O.V., Khrystyuk, B.F. (1998). Riverine Transport of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  into the Black Sea After Chernobyl Accident (Data Analysis and Methodological Aspects of Monitoring) / Proc. Of Inter. Sympos. On Marine Pollut., Monaco, 5–9 October 1998, 44–51.
- Kanivets, V., Laptev, G., Konoplev, A., Lisovyi, H., Derkach, G., Voitsekhovych, O. (2020). Dynamics of Radionuclides in the Chernobyl Cooling Pond. In: Konoplev, A., Kato, K., Kalmikov, S. (Eds). Behavior of Radionuclides in the Environment II: Chernobyl. Tokyo: Springer, 349–405, ([https://doi.org/10.1007/978-981-15-3568-0\\_8](https://doi.org/10.1007/978-981-15-3568-0_8))
- Kulebakina, L.G. & Polikarpov, G.G. (1991). Radioecological Monitoring of the Black Sea Basin Following the Chernobyl NPS Accident. Proc. of Seminar on Comparative Assessment of the Environmental Impact of Radionuclides Released during Three Major Nuclear Accidents: Kyshtym, Windscale, Chernobyl. Luxembourg, 1–5 Oct. 1990, Luxembourg, Report EUR 13574, II, 607–648.
- Polikarpov, G.G., Kulebakina, L.G., Timoshchuk, V.T., and Stokozov, N.A. (1991). Sr-90 and Cs-137 in Surface Waters of the Dnieper River, the Black Sea and the Aegen Sea in 1987 and 1988. *Journal of Environmental Radioactivity*, 13, 25–38.
- Sansone, U., Belli, M., Kanivets, V.V., Voitsekhovitch, O.V. (1996).

- <sup>137</sup>Cs and <sup>90</sup>Sr in water and suspended particulate matter of the Dnieper River-Reservoirs System (Ukraine). *Science of the Total Environment*, 186 (3), 257–271.
- Voitsekhovych, O., Kanivets, V., Simov, V., Fetisov, L. et al. (1996). Experimental Studies of the Radionuclide Flux from Rivers and Radionuclide-Sediment Interaction in the Black Sea. Final report under IAEA research contract No. 7330/R2/RB, UHMI, Kyiv, 61 p.
- ### REFERENCES
- Bochkov, L., Vakulovsky, S., Nikitin, A., Tertyshnik, E., Chumichev, V. (1983). About the content of cesium-137 in surface waters of land. *Meteorology and Hydrology*, 8, 79–83. [In russian]
- Bronnikov, V.K., Verkhovetsky, V.K., Nazipov, R.M., Barbashev, S.V. et al. (1994). Zaporozhskaya NPP and Environment. Kharkov. [In russian]
- Gedeonov, L., Gritchenko, Z., Ivanova, L., Orlova, T., Tishkov, V., Toporkov, V., Prokopenko, V. (1993). Radionuclides of strontium and cesium in the water of the lower Danube in 1985–1990. *Atomic Energy*, 74(1), 58–63. [In russian]
- IAEA (2006). Radiological Conditions in the Dnieper River Basin. IAEA RAR Series, Vienna.
- Israel, Yu.A., Vakulovsky, S.M., Vetrov, V.A., Petrov, V.I., Rovinsky, F.Ya., Stukin, E.D. (1990). Chernobyl: radioactive contamination of natural environments. Leningrad, 296. [In russian]
- Kanivets, V.V. (1996). Analysis of the main tendencies in the development of the radiation situation in the Dnieper water system after the Chernobyl accident. *Bulletin of Agrarian Science*, 4, 39–48. [In russian]
- Kanivets, V.V., Derkach, G.A., Lutsenko, S.I. (2005). The state of radioactive contamination of river and sea waters of Ukraine two decades after the Chernobyl accident // Proceedings of the international. conf. "Radioactivity after nuclear explosions and accidents", (Moscow, December 5–6, 2005). [In russian]
- Kanivets, V., Laptev, G., Konoplev, A., Lisovyyi, H., Derkach, G., Voitsekhovych, O. (2020). Dynamics of Radionuclides in the Chernobyl Cooling Pond. In: Konoplev, A., Kato, K., Kalmikov, S. (Eds). Behavior of Radionuclides in the Environment II: Chernobyl. Tokyo: Springer, 349–405. ([https://doi.org/10.1007/978-981-15-3568-0\\_8](https://doi.org/10.1007/978-981-15-3568-0_8))
- Kanivets, V.V., Voitsekhovitch, O.V., Simov, V.G., Golubeva, Z.A. (1999). The post-Chernobyl budget of <sup>137</sup>Cs and <sup>90</sup>Sr in the Black Sea. *Journal of Environmental Radioactivity*, 43, 121–135.
- Kanivets, V.V., Voitsekhovich, O.V., Khrystyuk, B.F., (1998). Riverine Transport of <sup>137</sup>Cs and <sup>90</sup>Sr into the Black Sea After Chernobyl Accident (Data Analysis and Methodological Aspects of Monitoring). Proc. of Inter. Sympos. on Marine Pollut. (Monaco, 5–9 October 1998), 44–51.
- Kondratiev, N.E., Popov, I.V., Snischenko, B.F. (1982). Fundamentals of the hydromorphological theory of the channel process. Leningrad. [In russian]
- Kulebakina, L.G. & Polikarpov, G.G. (1991). Radioecological Monitoring of the Black Sea Basin Following the Chernobyl NPS Accident. Proc. of Seminar on Comparative Assessment of the Environmental Impact of Radionuclides Released during Three Major Nuclear Accidents: Kyshtym, Windscale, Chernobyl. Luxembourg, 1–5 Oct. 1990, Luxembourg, Report EUR 13574, II, 607–648.
- Kuzmenko, M.I., Volkova, E.N., Klenus, V.G., Novikov, B.I., Pan'kov, I.V., Kaglyan, A.E., Matvienko, L.P., Shirokaya, Z.O. (1992). Radioactive contamination of the Dnieper and its reservoirs and some hydroecological measures after the Chernobyl accident. *Hydrobiological Journal*, 28 (6), 86–94. [In russian]
- Makhonko, K.P. (1987). Radioactive contamination of the territory of the USSR in 1986 (Yearbook) / edited by K.P. Makhonko, Obninsk. 134. [In russian]
- Novikov, B.I., Timchenko, V.M. (1992). Hydrological conditions for the migration of radionuclides along the cascade of Dnieper reservoirs. *Water Resources*, 1, 95–102. [In russian]
- Polikarpov, G.G., Kulebakina, L.G., Timoshchuk, V.T., and Stokozov, N.A. (1991). Sr-90 and Cs-137 in Surface Waters of the Dnieper River, the Black Sea and the Aegen Sea in 1987 and 1988. *Journal of Environmental Radioactivity*, 13, 25–38.
- Romanenko, V.D., Kuzmenko, M.I., Yevtushenko, M.Yu. et al. (1992). Radioactive and chemical contamination of the Dnieper and its reservoirs after the accident at the Chernobyl nuclear power plant. Kiev.
- Sansone, U., Belli, M., Kanivets, V.V., Voitsekovitch, O.V. (1996). <sup>137</sup>Cs and <sup>90</sup>Sr in water and suspended particulate matter of the Dnieper River-Reservoirs System (Ukraine). *Science of the Total Environment*, 186 (3), 257–271.
- Voitsekhovich, O.V., Kanivets V.V., Laptev G.V. (1997). Current state of radioactive contamination of water bodies in the zone affected by the accident // In the book: Radiogeoeology of water systems affected to contamination as a result of the Chernobyl accident. Kyiv, Chernobylinterinform, 60–96. [In russian]
- Voitsekhovych, O., Kanivets, V., Simov, V., Fetisov, L. et al. (1996). Experimental Studies of the Radionuclide Flux from Rivers and Radionuclide-Sediment Interaction in the Black Sea. Final report under IAEA research contract No. 7330/R2/RB, UHMI, Kyiv.

## Volodymyr Kanivets

ORCID: 0009-0008-1672-5547

kaniv@uhmi.org.ua

## Grygorii Derkach

ORCID: 0009-0006-4266-9126

dgrygorii@gmail.com

Ukrainian Hydrometeorological Institute

## OVERVIEW OF THE RESULTS OF RESEARCH OF RADIOACTIVE CONTAMINATION OF THE KAKHOVKA RESERVOIR, WHICH WERE

## CONDUCTED AFTER THE ACCIDENT AT THE CHERNOBYL NPP (1986–1921)

The available data on the state of radioactive contamination of water and bottom sediments of the Kakhovka Reservoir were analyzed in order to assess the possible deterioration of the quality of the environment based on the indicators of radioactive contamination in the zone of influence of the emergency discharge of water due to destruction of the Kakhovka NPP dam by the Russian military. Contamination of the Kakhovka Reservoir with <sup>137</sup>Cs occurred mainly through the fallouts of this radionuclide with aerosols on the water surface in May 1986. A much smaller part of this radionuclide transported by

water runoff directly from the headwaters of the Dnieper basin. Strontium-90 entered the reservoir exclusively by water pathway starting from October 1986. The steady trends of decreasing activity of both radionuclides in water has been observed since 1987. Approximately to 1996  $^{137}\text{Cs}$  activity concentrations had decreased to pre-accident level,  $^{90}\text{Sr}$  activity demonstrated a slow decrease and by 2022 remained slightly higher than pre-accidental level. The average levels of contamination of the Kakhovka reservoir bottom with  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  turned out to be the lowest compared to the other reservoirs of the Dnieper cascade. It was shown that in 1994  $^{137}\text{Cs}$  activity levels were  $0.06 \text{ Ci/km}^2$  ( $2.2 \text{ kBq/m}^2$ ) on 80% of the bottom surface (submerged former floodplain of the Dnieper) and were lower than on the territory adjacent to the reservoir. In the areas of silt accumulation (former channel of the Dnieper)  $^{137}\text{Cs}$  activity was on average three times higher. Balance calculations based on the data of radiation monitoring of water showed that the amount of  $^{137}\text{Cs}$  activity in the bottom sediments in the period 1987–2022 halved due to natural radioactive decay, the amount of  $^{90}\text{Sr}$  activity decreased by approximately 20%, since

activity losses due to natural radioactive decay were partially compensated by the constant supply of this radionuclide with water runoff from the contaminated part of the catchment. After a catastrophic water leak from the reservoir, the Dnieper floodplain had exposed. According to the calculations, the average density of soil contamination of the exposed areas with  $^{137}\text{Cs}$  does not exceed  $0.03 \text{ Ci/km}^2$  ( $1.1 \text{ kBq/m}^2$ ), with  $^{90}\text{Sr}$  — less than  $0.1 \text{ Ci/km}^2$  ( $3.7 \text{ kBq/m}^2$ ). Silt deposits of the former Dnieper channel, which had an increased level of  $^{137}\text{Cs}$  contamination, were re-suspended, probably, and carried out into the Dniipro-Bug estuary and further into the Black Sea. However, according to our assumptions, this should not have a negative effect on the radioecological state of the sea, because the  $^{137}\text{Cs}$  activity concentrations in the water of north-western part of the Black Sea were always 20–30 times higher than in the Dnieper water.

**Keywords:** reservoir, bottom sediments, suspended sediments, radioactive contamination, cesium-137, strontium-90, becquerel.

