

ПИТОМА АКТИВНІСТЬ РАДІОНУКЛІДІВ ТА ПОТУЖНІСТЬ ЗОВНІШНЬОЇ ДОЗИ ОПРОМІНЮВАННЯ У ДОННИХ ВІДКЛАДАХ оз. БРІТ У ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ ЗОНІ ВІДЧУЖЕННЯ

М. О. ГРЕЧАНЮК, аспірант^{1*}

Д. М. ГОЛЯКА, кандидат сільськогосподарських наук¹

С. Є. ЛЕВЧУК, кандидат біологічних наук¹

П. М. ПАВЛЕНКО, аспірант¹

Х.-К. ТЕІЕН, PhD, професор²

Т. О. ХАУГЕН, PhD, професор²

В. І. МАКСІН, доктор хімічних наук, професор^{1,3}

В. О. КАШПАРОВ, доктор біологічних наук, професор^{1,2}

¹ Національний університет біоресурсів і природокористування України

² Центр радіоактивності навколишнього середовища Норвезького
університету наук про життя

³ Науково-дослідний інститут «Ресурс» Держагентства України «Резерв»

E-mail: maksgrek@ukr.net

[https://doi.org/10.31548/dopovid3\(103\).2023.001](https://doi.org/10.31548/dopovid3(103).2023.001)

Анотація. У результаті проведених експериментальних досліджень було отримано профілі вертикального розподілу потужності поглиненої дози (ППД) гамма-випромінювання та значення питомої активності ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{154}Eu і ^{241}Am в донних відкладах оз. Бріт, які досягали $23 \text{ мкГр} \cdot \text{год}^{-1}$ і $43 \text{ Бк} \cdot \text{см}^{-3}$ для ^{137}Cs . Озеро розташоване в межах ділянки Красненської заплави р. Прип'ять у Чорнобильській зоні відчуження ($51,44844^\circ$; $30,06020^\circ$). Показано, що в оз. Бріт, через змив радіонуклідів з водозабору, відсутня кореляція між середніми рівнями вмісту ^{90}Sr і ^{137}Cs у донних відкладах і глибиною озера. Спостерігається помірна кореляція між виміряною дозиметром та розрахунковою потужністю поглинутої дози зовнішнього опромінення на основі середньої питомої активності радіонуклідів у донних відкладах. Середня розрахована та виміряна ППД гамма-випромінювання в донних відкладах оз. Бріт змінювалась в межах $1.3\text{--}19 \text{ мкГр} \cdot \text{год}^{-1}$ і була сумісною з внутрішньою дозою опромінення риб ($5\text{--}15 \text{ мкГр} \cdot \text{год}^{-1}$). Внесок вмісту радіонуклідів у воді оз. Бріт у формування ППД не перевищує $2 \text{ нГр} \cdot \text{год}^{-1}$.

Для зменшення невизначеності оцінок доз зовнішнього опромінення аборигенних риб у жовтні 2021 року було встановлено відповідне обладнання для акустичної 3-D телеметрії та індивідуальної дозиметрії різних видів риб в оз. Бріт і оз. Глибоке.

Ключові слова: ^{90}Sr , ^{137}Cs , потужність поглиненої дози, донні відклади, Чорнобиль, зона відчуження

* Науковий керівник – доктор хімічних наук, професор, В.І.Максін

Актуальність. Внаслідок техногенної аварії на Чорнобильській АЕС 26 квітня 1986 році стався значний викид радіонуклідів в атмосферу з наступним радіоактивним забрудненням навколишнього середовища. Це призвело до утворення найбільш радіоактивно забрудненої у світі території – Чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ), де науковці з усього світу досліджують наслідки катастрофи, вплив радіонуклідів на довкілля та шукають шляхи вирішення її наслідків. У ЧЗВ проводились численні дослідження проявів радіобіологічних ефектів у референтних організмів, які потребують коректної оцінки поглинених доз опромінення [1–5].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Міжнародна комісія з радіологічного захисту (МКРЗ) рекомендує використовувати референтні організми для оцінки впливу іонізуючого випромінювання на біоту з метою радіаційного захисту довкілля [6]. Припускається, що в 1986 році, після аварії, потужність поглиненої дози опромінення риб в оз. Глибоке могла досягати $130 \text{ мГр} \cdot \text{добу}^{-1}$ [7]. Нині в найбільш радіоактивно забруднених водоймах ЧЗВ питома активність ^{137}Cs в м'язовій тканині і ^{90}Sr в кістковій тканині риб досягає десятків, а то і сотень $\text{кБк} \cdot \text{кг}^{-1}$ відповідно [8, 9]. Це призводить до формування поглинених доз внутрішнього

опромінення риб до одиниць $\text{мГр} \cdot \text{добу}^{-1}$ [8 - 10]. За оцінками О.Є. Кагляна та ін. (2019) дози зовнішнього опромінення риб в озерах ЧЗВ здатні значно перевищувати дози внутрішнього опромінення і досягати $3 \text{ мГр} \cdot \text{добу}^{-1}$ за рахунок гамма-випромінювання $^{137}\text{Cs} \rightarrow ^{137\text{m}}\text{Ba}$ в донних відкладах.

Донні відклади водойм являють собою одне з основних місць накопичення радіонуклідів, що сприяють зовнішньому опроміненню організмів на радіоактивно забруднених територіях. Автори нещодавніх досліджень [10] проводили оцінку зовнішніх і внутрішніх поглинених доз опромінення риби в радіоактивно забруднених водоймах ЧЗВ за допомогою пакету програм "ERICA Assessment Tool" [11]. Було визначено, що основний внесок (більше 80 %) у поглинену річну дозу до 1 Гр у холодний період року зумовлений зовнішнім опроміненням донних риб, таких як линь і карась, від високозабруднених донних відкладів зимувальних ям.

Рівень зовнішнього опромінення організмів визначається комплексною взаємодією ряду чинників: рівня забруднення навколишнього середовища, характеристик радіоактивного розпаду радіонуклідів, відстані між джерелом опромінення і об'єктом, що опромінюється, місця існування та

Гречанюк М. О., Голяка Д. М., Левчук С. Є., Павленко П. М., Теїєн Х.-К., Хауген Т. О., Максін В. І., Кашпаров В. О.

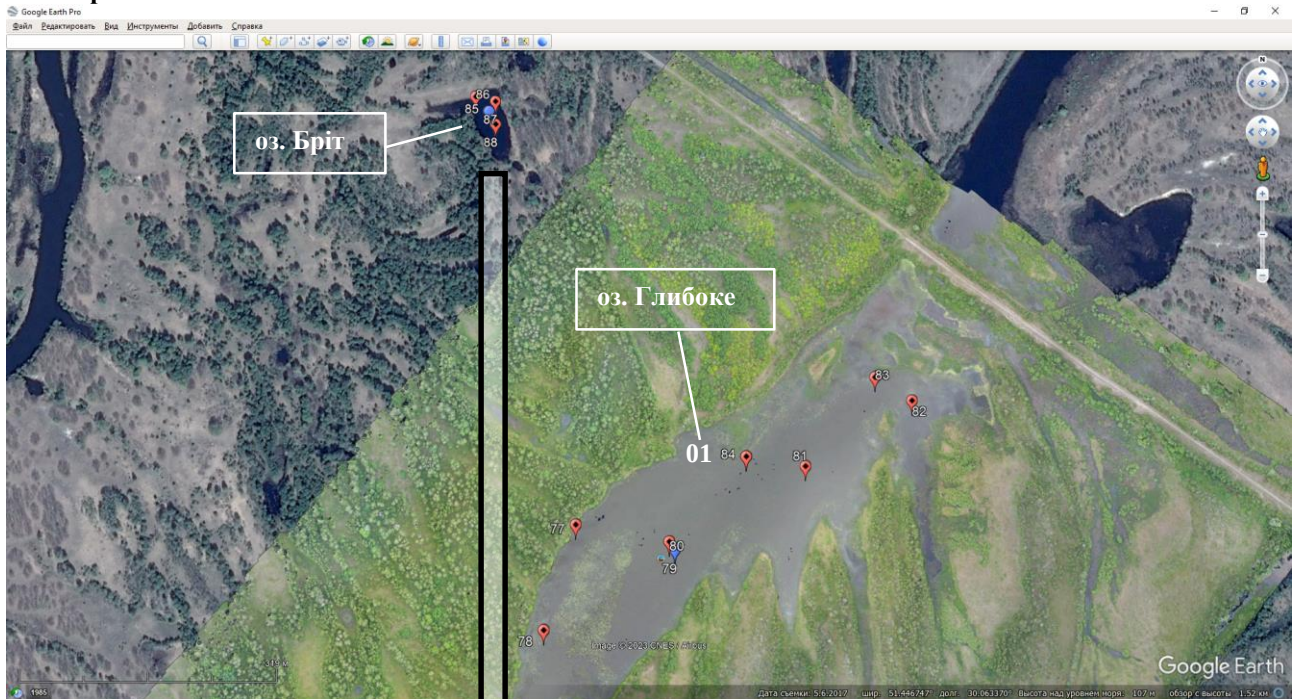
розмірів об'єкта, що опромінюється та ін. [12, 13].

Мета дослідження полягає у зменшенні невизначеності оцінок доз зовнішнього опромінення організмів у прісноводних екосистемах. Для досягнення мети проведені експериментальні роботи, які включають вимірювання вертикального розподілу потужності дози іонізуючого гамма-випромінювання у воді й донних відкладах озера, а також відбирання проб донних відкладів і вимірювання в цих пробах питомої активності радіонуклідів.

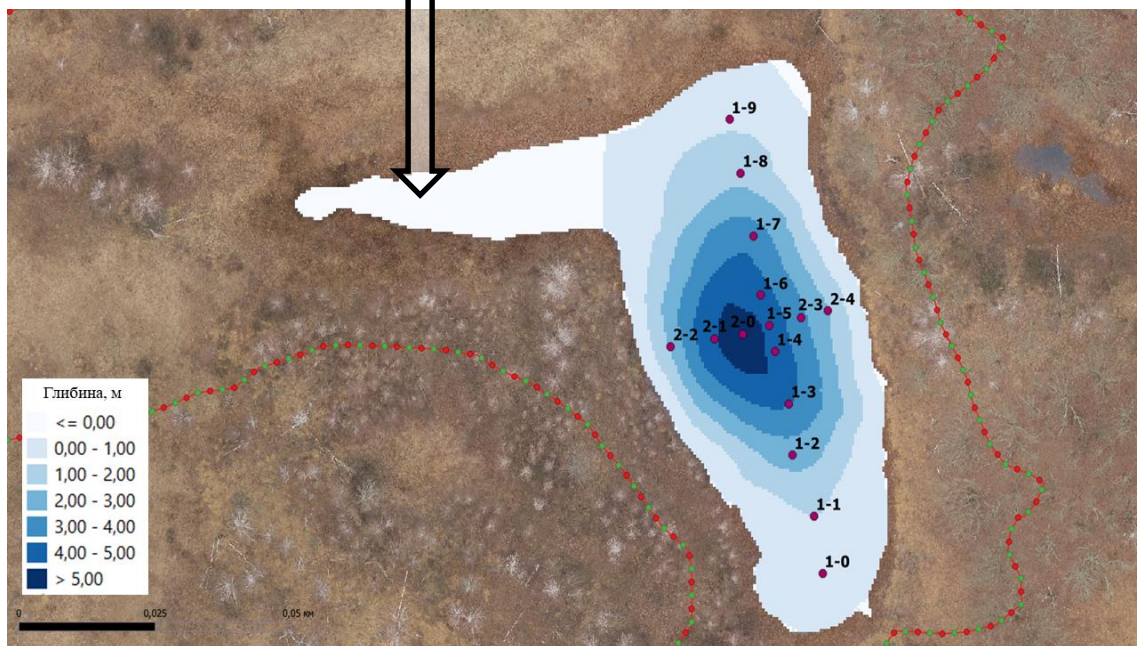
Матеріали і методи дослідження. Експериментальні дослідження з вивчення зовнішніх доз опромінення у воді та донних відкладах, а також відбір проб донних відкладів проводили в безіменному озері (далі оз. Бріт), що розташоване в межах ділянки Красненської заплави р. Прип'ять у Чорнобильській зоні відчуження (51,44844°; 30,06020°) на північно-західному сліді чорнобильських радіоактивних випадіннь, на відстані 6,6 км (338°) від ЧАЕС (Рис. 1, 2). Озеро має чашоподібну форму з глибиною 5,4 м в центрі, площа водойми складає

близько 3800 м². Озеро було обрано для досліджень через високі рівні його забруднення, форму, глибину і невеликий розмір. Ці фактори дозволяють проводити гарантований вилов риб із вживленими дозиметрами та фіксувати їх положення у воді над донними відкладами або в них на протязі року. Також для порівняння в одній точці було відібрано пробу донних відкладів і виміряно профіль потужності дози іонізуючого гамма-випромінювання в оз. Глибоке (51.444796°, 30.063938°) на глибині 5 м (Рис. 1). Озеро Глибоке простягається в довжину на 1,2 км з максимальною шириною 250 м і глибиною 6–7 м у центральній частині [5, 14]. Це озеро добре вивчене і найбільш часто використовується для радіобіологічних досліджень [2, 3, 5, 7-10, 14].

Відбирання зразків донних відкладів і вимірювання вертикальних профілів потужності амбієнтного еквівалента дози (ПАЕД) гамма-випромінювання у воді та донних відкладах проводили одночасно з поверхні льоду протягом 2–3 березня 2021 року.



а



б

Рис. 1. Розміщення озер і точок розміщення обладнання для акустичної 3-D телеметрії (червоні та фіолетові буйки 77-78) і вимірювання потужності дози іонізуючого гамма-випромінювання та відбору донних відкладів (Таблиця) (а), а також показники глибин оз. Бріт (б)

Перед початком робіт було проведено калібрування показників дозиметра-радіометра ДКС-96 за

допомогою порівняння еталонних значень вимірювального приладу РКС-01 із значеннями ДКС-96 на

Гречанюк М. О., Голяка Д. М., Левчук С. Є., Павленко П. М., Теїєн Х.-К., Хауген Т. О., Максін В. І., Кашпаров В. О.

різній відстані (від 1 м до 10 м) від джерела випромінення. Розбіжності у вимірах потужності дози не перевищували 10 %. У першому наближенні значення вимірних величин ПАЕД гамма-випромінення у воді та донних відкладах будуть відповідати потужності поглиненої дози гамма-випромінювання (ППД) [15].

Для відбору проб донних відкладів та вимірювання величин ППД у кризі були пробурені 15 отворів діаметром 13 см. Глибини у кожній точці були виміряні за допомогою ехолота Deeper (Deeper UAB, Lithuania) (Рис. 1б). Для відбирання зразків донних відкладів і зйомки вертикальних профілів потужності доз гамма-випромінювання було розроблено спеціальний прилад на штативі з мірною шкалою і черв'ячним механізмом, що давало змогу зафіксувати його на необхідній глибині для вимірювання і поступово підіймати і опускати з кроком 1 см (Рис. 2а). Також до штанги з дозиметром і пробовідбірником була прикріплена вимірювальна стрічка для визначення точної глибини.

Штангу з пробовідбірником і детектором через лунку в кризі занурювали в донні відклади до упору в піщані відкладення і проводили вимірювання потужності дози на максимальній глибині. Після цього штангу з кроком 5 см підіймали для

вимірювання вертикального профілю змін потужності дози. Вимірювання зупиняли після досягнення фонового рівня показників вимірюваної потужності дози у воді. Відмінностей у показниках ППД під час занурювання і виймання дозиметра із донних відкладів не спостерігалось.

Для порівняння рівнів потужності поглиненої дози гамма-випромінювання від донних відкладів та від поверхні ґрунту в околицях оз. Бріт за допомогою дозиметра РКС-01 «СТОРА-ТУ» (Екотест, Україна) було виконано гамма-зйомку території водозабору навколо озера з кроком 10 м і GPS-прив'язкою.

Відбір зразків донних відкладів проводився за допомогою спеціально розробленого прозорого циліндричного пробовідбірника довжиною 50 см і діаметром 5 см, з'єднаного з металевою штангою з дозиметром (Рис. 2 б). Під час занурення вода виходила крізь зворотний клапан до тих пір, поки не було припинено занурення у донні відклади на максимальну глибину. Товщина донних відкладів вимірювалась після відбирання проби по границі вода - завись (Рис. 2 б). У лабораторних умовах проби донних відкладів було висушено до повітряно-сухого стану і гомогенізовано для проведення гамма- і бета-спектрометричних вимірювань.

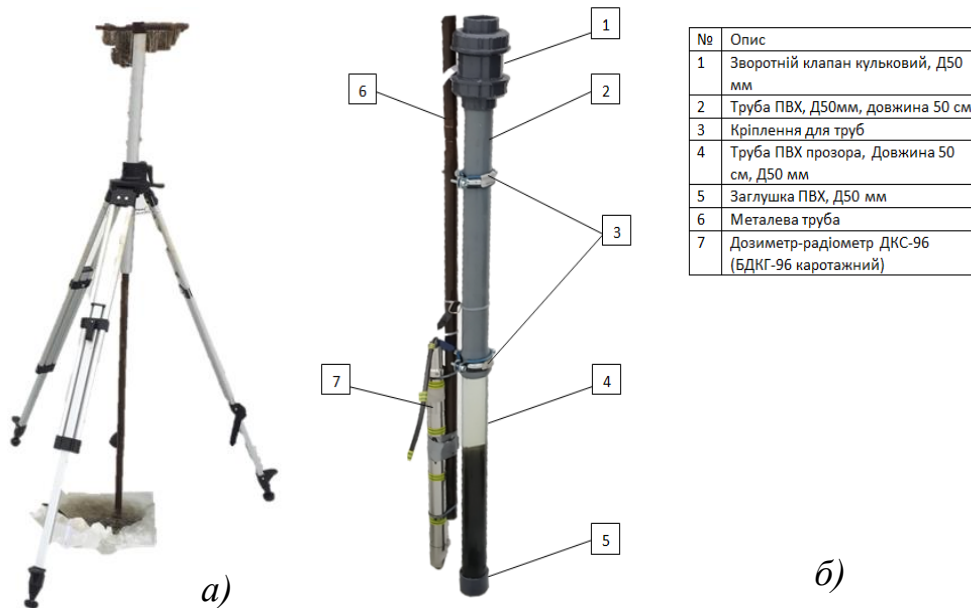


Рис. 2. Будова приладу для вимірювання потужності дози і відбору проб: а) штатив; б) пробовідбірник

Для визначення активності гамма-випромінюючих радіонуклідів $^{137}\text{Cs} \rightarrow ^{137\text{m}}\text{Ba}$, ^{241}Am та ^{154}Eu висушені зразки донних відкладів було розміщено в пластикові контейнери (100 мл) для аналізу на гамма-спектрометричному комплексі з багатоканальним аналізатором ASPEC-927 (програмне забезпечення GammaVision 32) та напівпровідниковим детектором з високочистого германію GEM-30185 у пасивному захисті, виробництва «EG&G ORTEC» (США), з енергетичним розрізненням 1,78 кеВ по лінії ^{60}Co 1,33 МеВ. Вимірювання активності ^{137}Cs у воді озер проводили після її фільтрації через фільтри 0,45 мкм в посудинах Марінеллі об'ємом 1 л. Для калібрування гамма-спектрометра використовували сертифіковані

еталони з відповідною матрицею. Час вимірювання зразків був встановлений таким чином щоб статистична складова невизначеності не перевищувала 20 %.

Для вимірювання активності ^{90}Sr в пробах донних відкладів використовували бета-спектрометр СЕБ-01-70 (АКП, Україна). Вміст ^{90}Sr у воді озер проводили за класичною радіохімічною методикою [16].

Для візуалізації розподілу активності радіонуклідів у зразках донних відкладів використовували сканер (Image plate scanner CR 35 BIO Plus, Germany). Зразок донних відкладів (1 г) розподілявся тонким шаром на клейкому папері, покривався поліетиленовою плівкою та плівкою Fujifilm BAS-IP MS 2040 і експонувався протягом 7 діб. Після експозиції плівка сканувалась в

Гречанюк М. О., Голяка Д. М., Левчук С. Є., Павленко П. М., Теїєн Х.-К., Хауген Т. О., Максін В. І., Кашпаров В. О.

чутливому режимі (розширенням пікселів до 50 мкм) з використанням функції біннінгування пікселів.

Концентрації іонів K^+ та Ca^{2+} у воді визначались методами полум'яної фотометрії та титрометрії, відповідно [17].

Результати дослідження та їх обговорення. Питома активність ^{137}Cs і ^{90}Sr у воді оз. Бріт становила $1,5 \pm 0,3$ Бк·л⁻¹ і 72 ± 9 Бк·л⁻¹ відповідно і була нижчою, порівнюючи з показниками активності в оз. Глибоке: 4 ± 1 Бк·л⁻¹ і 100 ± 10 Бк·л⁻¹ [5, 8, 14, 18]. Середній вміст стабільних елементів K^+ та Ca^{2+} у воді оз. Бріт і оз. Глибоке становив $2,0 \pm 0,1$ мг·л⁻¹ та 14 ± 12 мг·л⁻¹ і $1,2 \pm 0,1$ мг·л⁻¹ та 30 ± 2 мг·л⁻¹ [8, 14, 17], що в свою чергу призводить до меншого вмісту ^{137}Cs в рибі з оз. Бріт, порівнюючи з рибою з оз. Глибоке, в 4,4 разів, але більшого вмісту ^{90}Sr в 1,5 разів [19]. Відповідно, доза внутрішнього опромінення риб в оз. Бріт буде дещо більшою у порівнянні з оз. Глибоке (5-10 мкГр·год⁻¹) через основний внесок ^{90}Sr у її формування (більш 90% для не хижих риб) [10].

На рис. 3 і 4 наведено результати вимірювань вертикальних профілів потужності поглиненої дози у воді та донних відкладах оз. Бріт та в оз.

Глибоке (Рис. 4). Товщина донних відкладів в оз. Бріт і оз. Глибоке досягала 40 см. Пік чорнобильських радіоактивних випадінь 1986 року (максимальний рівень ППД) розташовувався на різних глибинах донних відкладів (від 0 до 25 см), що вказує на залежність швидкості їх формування (до 0,7 см·рік⁻¹) від місцезнаходження точки відбору проб. Отримані розподіли вказують на залежність зовнішньої дози опромінення організмів від їх часово-просторового розташування у водоймі.

ППД в оз. Бріт у різних точках змінюється в широкому діапазоні і досягає максимального значення біля 23 мкГр·год⁻¹ в точці 1-0 на глибині всього 1,2 м (Рис. 3), що обумовлено зливом радіонуклідів з водозабору (Рис. 5). Водночас рівні ППД цієї місцевості коливаються у межах від 1,1 мкГр·год⁻¹ до 13,1 мкГр·год⁻¹. Максимальні значення ППД у найглибших місцях у центрі озера (точки 1-3 – 1-5 і 2-0 – 2-1) становили 13–18 мкГр·год⁻¹. Внесок вмісту радіонуклідів у воді оз. Бріт у формування ППД несуттєвий і не перевищує 2 нГр·год⁻¹.

В оз. Глибоке значення ППД в точці 01 досягали 40 мкГр·год⁻¹ (Рис. 4).

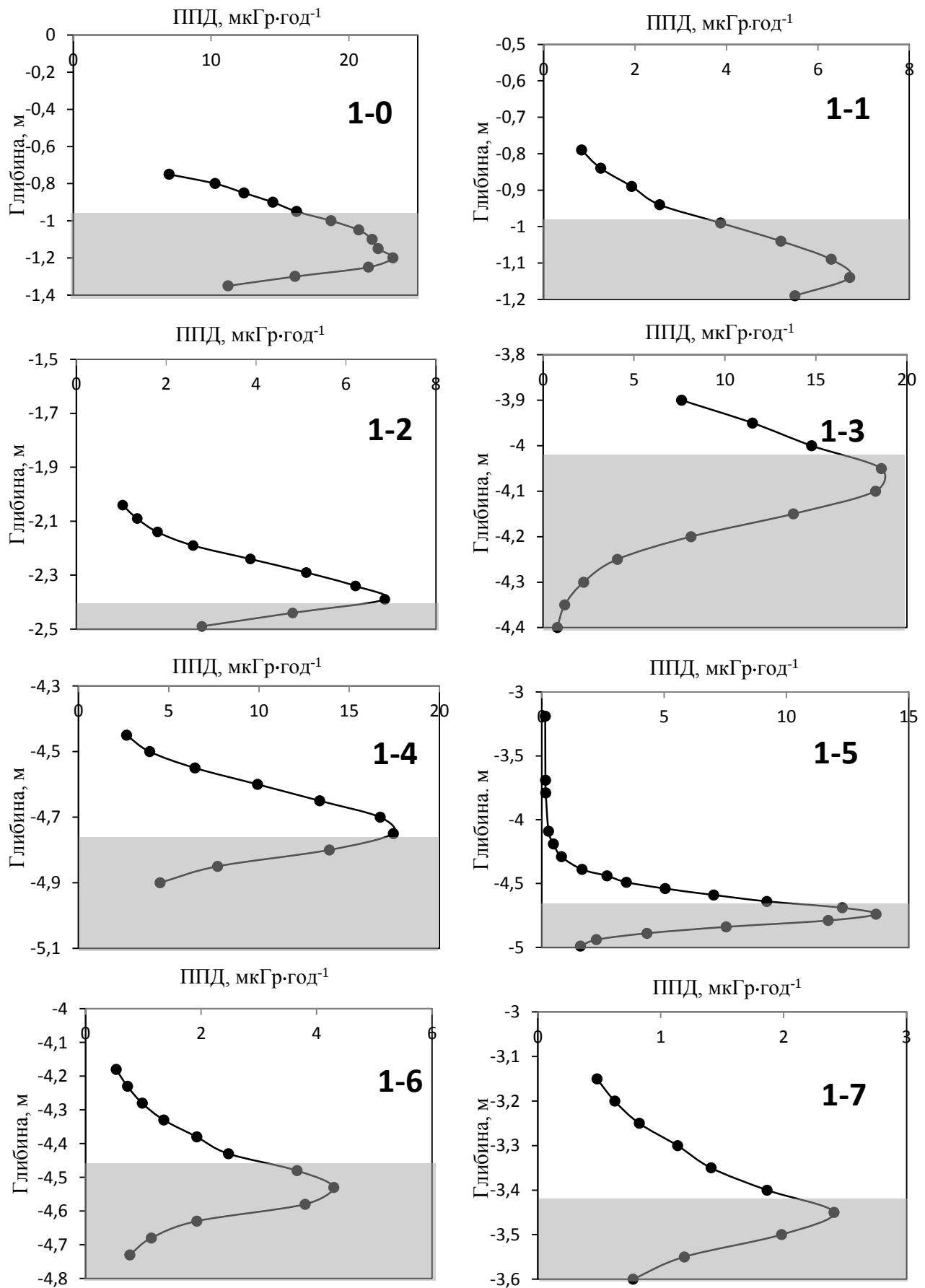


Рис. 3. Вертикальний профіль потужності поглиненої дози в точках 1-0 – 1-7 оз. Бріт

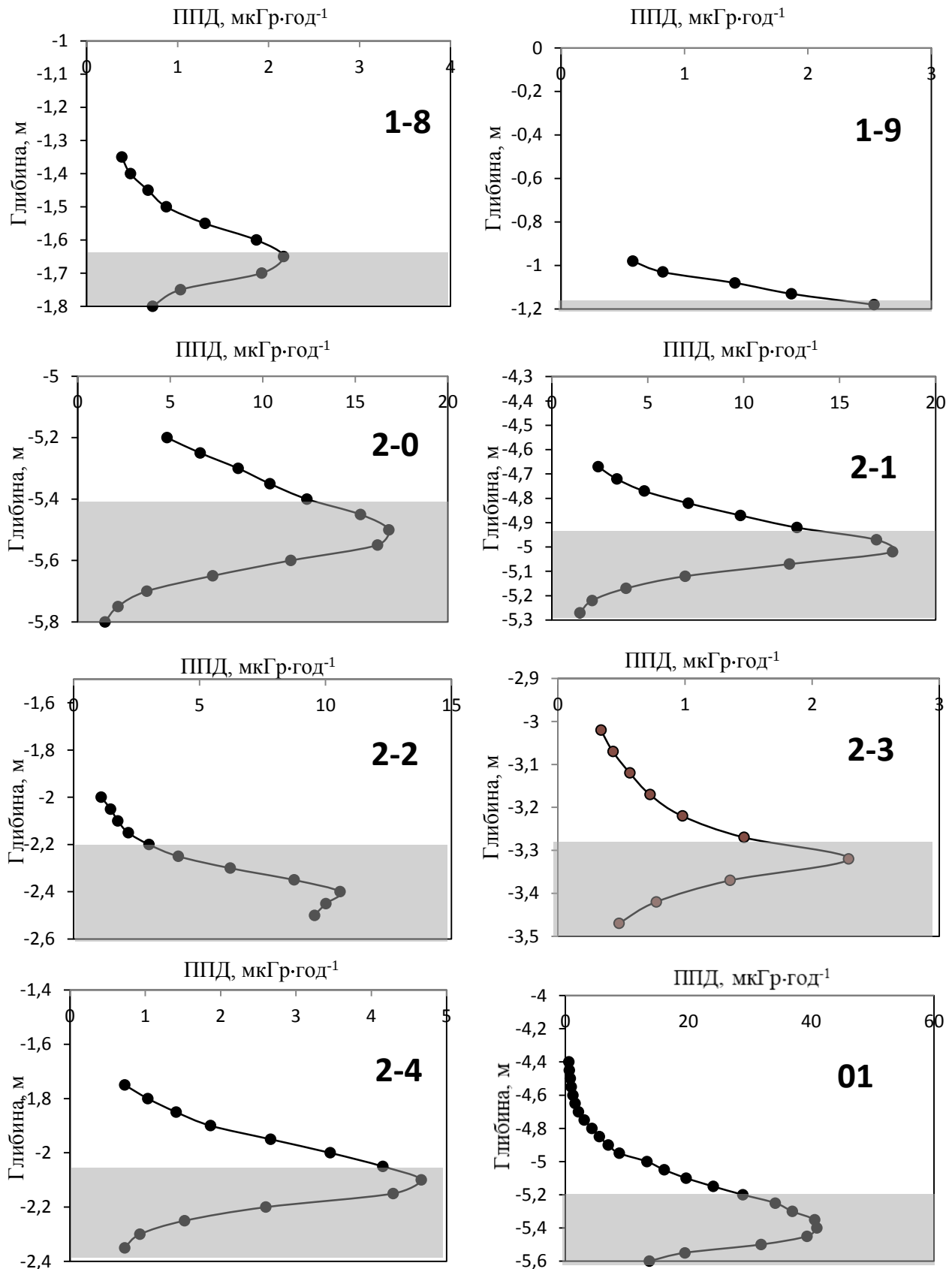
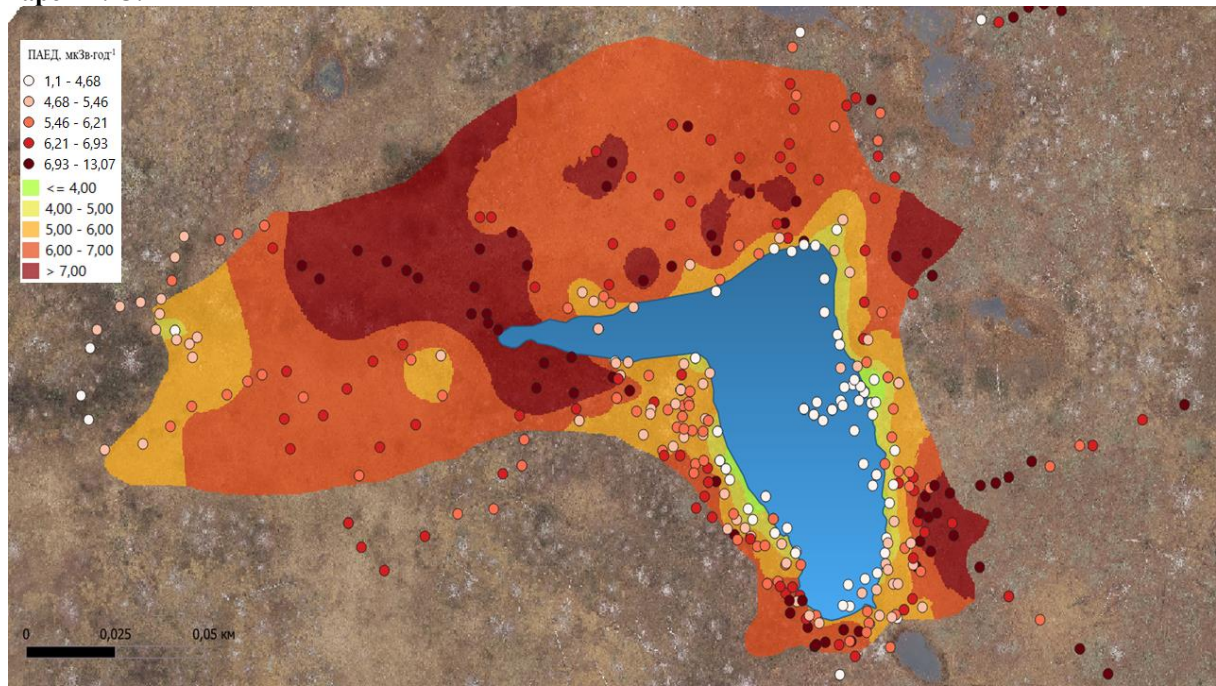
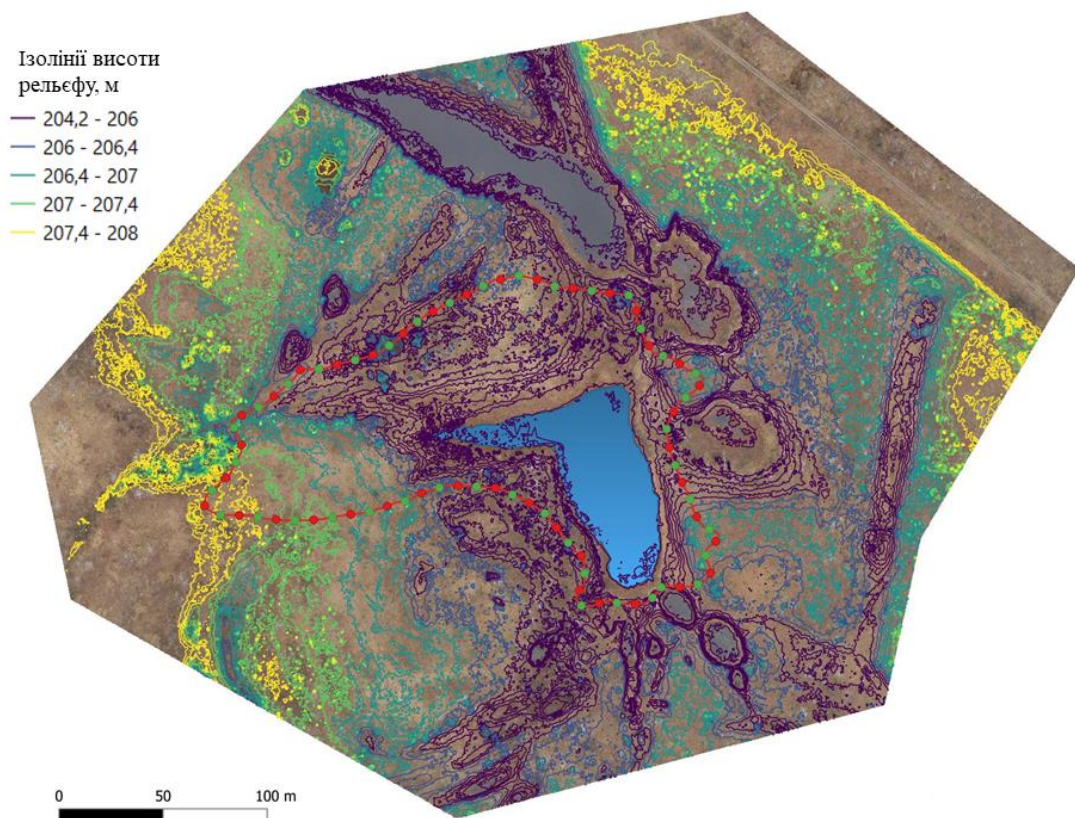


Рис. 4. Вертикальний профіль потужності поглиненої дози в точках 1-8 – 2-4 оз. Бріт і в точці 01 оз. Глибоке (сірим кольором позначено розташування донних відкладів, білим – води)



а



б

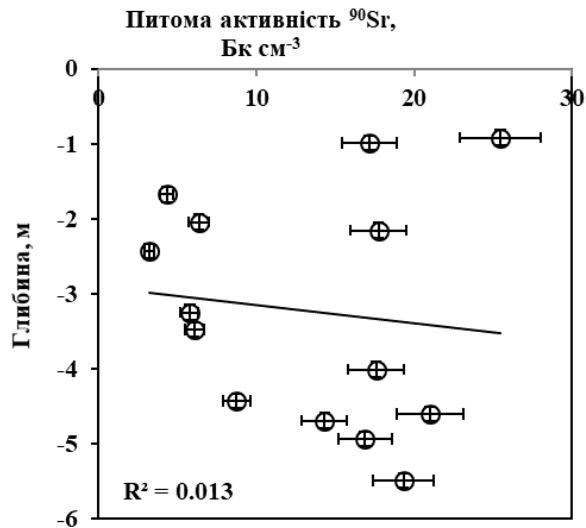
Рис. 5. Розподіл ПАЕД (а) та ізолінії висоти рельєфу навколо оз. Бріт (б), отримані з використанням квадрокоптера DJI Phantom 4 Pro (208 м відповідає 108 м висоти над рівнем моря)

На нашу думку відсутність кореляції між величиною питомої

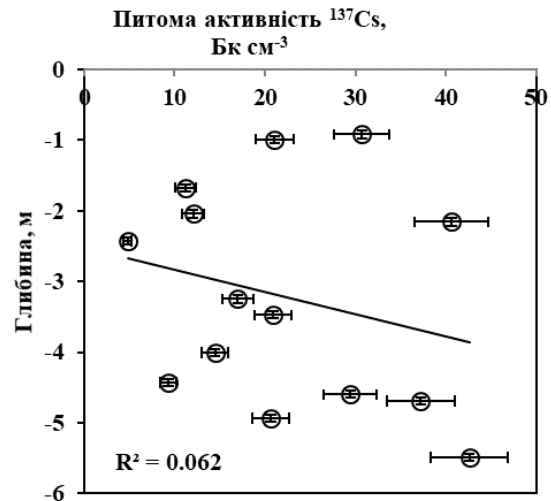
Гречанюк М. О., Голяка Д. М., Левчук С. Є., Павленко П. М., Теїєн Х.-К., Хауген Т. О., Максін В. І., Кашпаров В. О.

активності радіонуклідів і глибиною залягання донних відкладів у оз. Бріт (Рис. 6) пов'язана із впливом змиву радіонуклідів з водозабору (Рис.5) на формування радіоактивного забруднення профілю донних

відкладів (Рис. 3, 4). У оз. Глибоке, враховуючи відносно більшу площу озера і менший вплив змиву радіонуклідів з водозабору, така кореляція спостерігається [10].



а

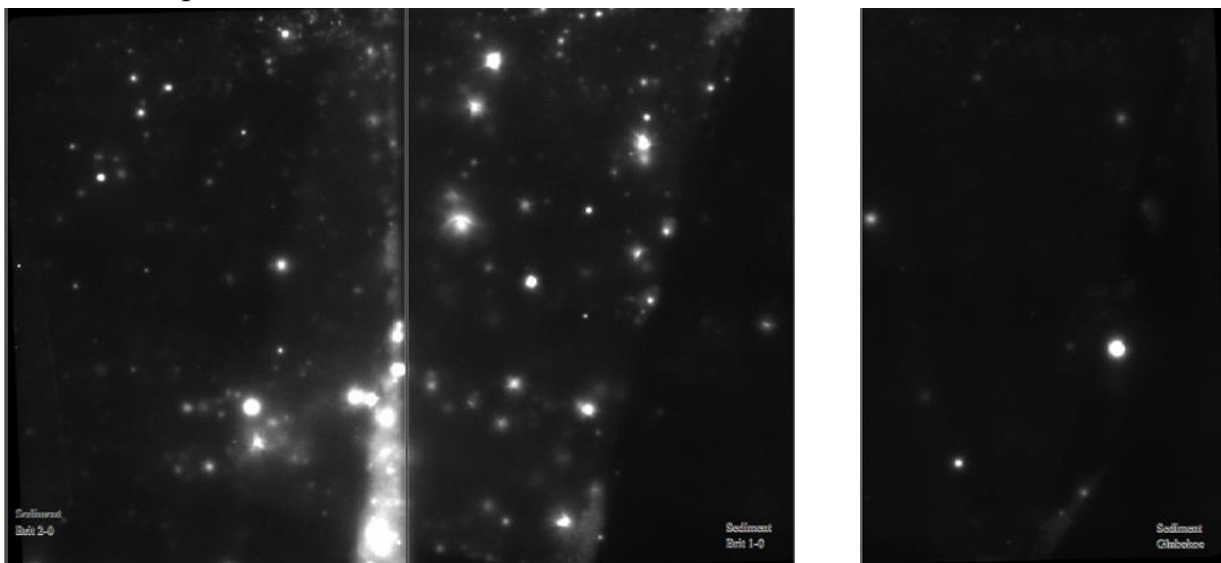


б

Рис. 6. Залежність питомої активності ^{90}Sr (а) та ^{137}Cs (б) у відібраних точках з глибиною оз. Бріт

Результати авторадіографії донних відкладів озер Бріт та Глибоке (Рис. 7) підтверджують наявність гарячих частинок, що може

бути причиною нерівномірного просторового розподілу активності радіонуклідів [20].



а

б

Рис. 7. Автографи зразків донних відкладів оз. Бріт (точки 1-0 і 2-0) (а) та оз. Глибоке (точка 01) (б)

Гречанюк М. О., Голяка Д. М., Левчук С. Є., Павленко П. М., Теїєн Х.-К., Хауген Т. О., Максін В. І., Кашпаров В. О.

У таблиці наведено виміряну питому активність ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{154}Eu , ^{241}Am в донних відкладах оз. Бріт та оз. Глибоке. Питома активність ^{137}Cs

в донних відкладах, що визначає ППД, змінюється всього у 8 разів – від 5 до 43 Бк·см⁻³.

1. Середня питома активність радіонуклідів у профілях донних відкладів та величин середня потужність поглинутої дози зовнішнього опромінення (M± SD)

Проба	Донні відклади, см		Питома активність, Бк·см ⁻³				Середня потужність дози зовнішнього опромінення	
	Глибина	Товщина	^{90}Sr	^{137}Cs	^{241}Am	^{154}Eu	Розрахована, мкГр·год ⁻¹	Виміряна, мкГр·год ⁻¹
оз. Бріт								
1-0	92	43,0	26±3	31±2	1,4±0,3	0,08±0,01	9,7±0,6	19±4
1-1	99	20,0	17±2	21±1	1,2±0,2	0,05±0,01	6,6±0,6	5,5±1,1
1-2	243	6,0	3,2±0,6	4,8±0,2	0,19±0,01	0,010±0,001	1,5±0,1	5±2
1-3	401	39,0	18±4	14,5±0,7	0,72±0,08	0,047±0,005	4,7±0,2	9±7
1-4	460	30,0	21±3	29±2	1,3±0,1	0,09±0,01	9,2±0,4	12±5
1-5	469	30,0	14±3	37±2	2,1±0,3	0,16±0,02	11±1	7,6±5,0
1-6	443	30,0	9±2	9±1	0,35±0,09	0,02±0,01	2,9±0,2	2,6±1,4
1-7	347	12,6	6±1	21±1	0,93±0,04	0,053±0,009	6,3±0,3	1,6±0,7
1-8	168	12,5	4,3±0,8	11,2±0,6	0,3±0,1	0,024±0,006	3,4±0,2	1,6±0,7
2-0	549	31,0	19±3	43±2	1,6±0,3	0,10±0,02	13±1	8,5±6,5
2-1	494	33,5	17±2	21±1	1,3±0,2	0,07±0,01	6,6±0,3	9,3±6,5
2-2	216	34,2	18±3	41±2	1,5±0,2	0,09±0,01	12±1	6,8±3,4
2-3	325	22,0	6±1	17±1	0,41±0,05	0,03±0,01	5,1±0,3	1,3±0,7
2-4	204	30,6	6,4±0,5	17±1	0,31±0,03	0,013±0,003	5,1±0,2	2,7±1,7
оз. Глибоке								
01	518	42,2	15±3	23±1	0,8±0,2	0,07±0,01	7,1±0,3	31±9

На основі питомої активності радіонуклідів у донних відкладах і дозових коефіцієнтів можна оцінити середню створювану ними потужність поглиненої дози зовнішнього опромінення [11]. Для оцінки потужності поглинутих доз зовнішнього опромінення були використані такі дозові коефіцієнти для гамма-випромінювання: $^{137}\text{Cs} \rightarrow ^{137\text{m}}\text{Ba}$ (0,3

(мкГр·год⁻¹) · (Бк·см⁻³)⁻¹), ^{241}Am (0,01 (мкГр·год⁻¹) · (Бк·см⁻³)⁻¹) і ^{154}Eu (0,6 (мкГр·год⁻¹) · (Бк·см⁻³)⁻¹) [11, 13, 21]. В точках відбирання проб середня розрахована та виміряна ППД в донних відкладах оз. Бріт змінювалась в межах 1,3-19 мкГр·год⁻¹ (Таблиця) і була сумісною з внутрішньою дозою опромінення риб (5-15 мкГр·год⁻¹). Враховуючи, що риби перебувають в донних

Гречанюк М. О., Голяка Д. М., Левчук С. Є., Павленко П. М., Теїєн Х.-К., Хауген Т. О., Максін В. І., Кашпаров В. О.

відкладах тільки в зимовий період, можна зробити висновок, що річні поглинені дози внутрішнього опромінення риб в о. Бріт будуть перевищувати дози зовнішнього опромінення.

Отримані результати показують помірну кореляцію за шкалою Чеддока (коефіцієнт рангової кореляції Спірмена 0.4 за рівня значимості < 0.1) між виміряними і розрахунковими значеннями ППД у донних відкладах (Рис. 8). Результати

підтверджують високу невизначеність оцінки зовнішніх доз опромінення організмів від донних відкладів на основі лише вимірювань середньої питомої активності радіонуклідів та відсотка сухої ваги у всьому шарі донних відкладів (Таблиця, Рис.8), не враховуючи їх вертикального профілю розподілу, та часу перебування і просторового місцезнаходження організмів відносно донних відкладів у кожному конкретному водоймищі.

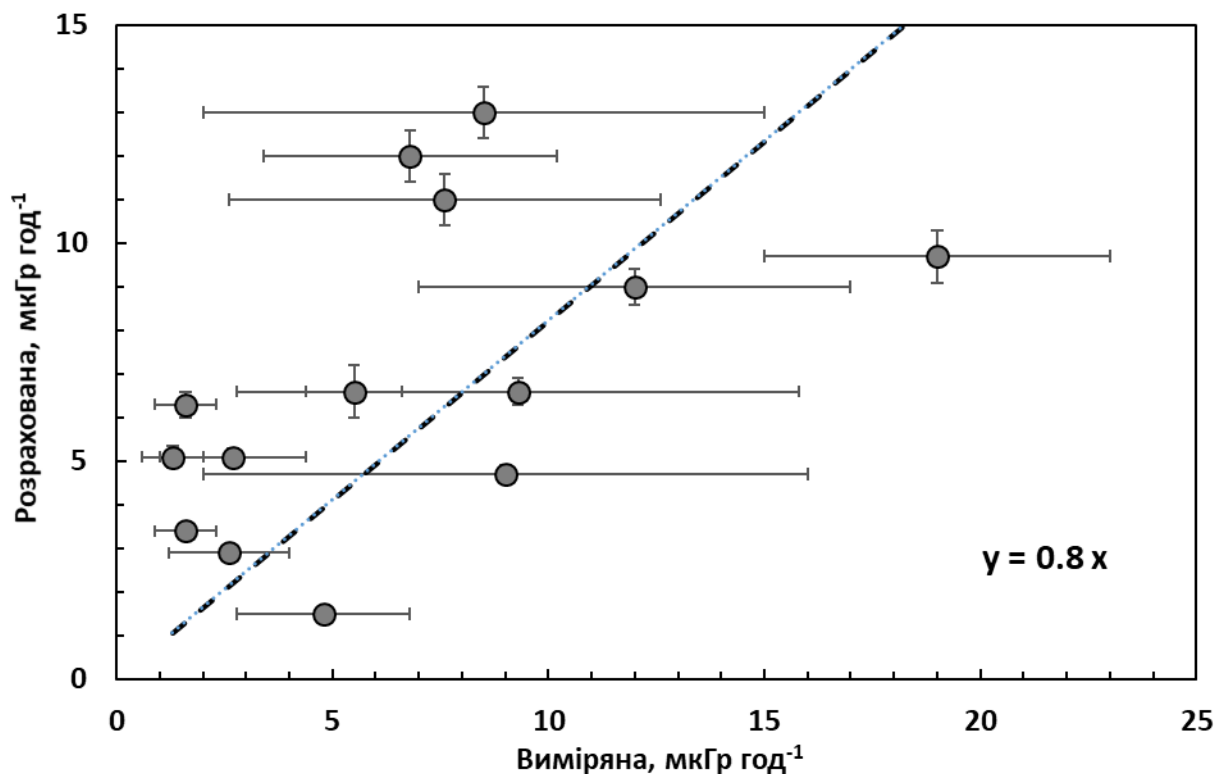


Рис. 8. Співвідношення між експериментальними і розрахунковими значеннями ППД у профілі донних відкладів оз. Бріт

"ERICA Assessment Tool" [11] була рекомендована ICRP як базовий метод розрахунку доз для нелюдської біоти. При оцінці доз для водних організмів на поверхні (2π геометрія опромінення) або всередині донних

відкладів (4π геометрія опромінення) в ERICA використовується лише середня питома активність донних відкладів (при гомогенному розподілі радіонуклідів в шарі без урахування його товщини). Таке спрощення

Гречанюк М. О., Голяка Д. М., Левчук С. Є., Павленко П. М., Теєн Х.-К., Хауген Т. О., Максін В. І., Кашпаров В. О.

використовується оскільки неможливо достеменно встановити на яку саме глибину зависі можуть занурюватися придонні види риб або на якій відстані від донних відкладів вони знаходяться упродовж певних періодів життєвого циклу у конкретній водоймі. Потужність поглиненої дози у воді на відстані 50-60 см від донних відкладів, забруднених ^{137}Cs , зменшується на порядок величини (Рис.3, 4). Розподіл ППД у воді і донних відкладах разом із інформацією щодо просторово-часового положення організмів у конкретній водоймі дозволить більш точно оцінити поглинуті дози зовнішнього опромінення у порівнянні з "ERICA Assessment Tool" [11] і валідувати отримані оцінки з прямими прижиттєвими вимірюваннями.

Для зменшення невизначеності оцінок доз зовнішнього опромінення аборигенних риб у жовтні 2021 року Норвезьким університетом наук про життя у співпраці з НУБіП України було встановлено відповідне обладнання для акустичної 3-D телеметрії сріблястих карасів (*Carassius gibelio*), щук (*Esox lucius*) і линів (*Tinca tinca*) на оз. Бріт (3 ресивера) і оз. Глибоке (7 ресиверів) - червоні буйки та автоматичні логери реєстрації температури (Onset HOBO UA-001-64) та вмісту кисню (HOBO Dissolved Oxygen Data Logger) на різних глибинах - червоні та фіолетові буйки (Рис.1а) аналогічно роботі [12].

У рибу хірургічним шляхом було вживлено чіпи для її ідентифікації, логери для телеметрії та відкалібровані дозиметри nanoDot (Landauer) для вимірювання поглиненої дози іонізуючого випромінювання аналогічно роботі [22]. Після завершення експерименту, на додаток до представлених у цій роботі профілям ППД, вперше в світі будуть отримані дані щодо трьохвимірного просторового переміщення різних видів риб в озерах над і всередині донних відкладів, включаючи зимувальні ями, а також обумовлені цим реальні індивідуальні поглинуті дози опромінення різних видів риб в прісноводних водоймах. Профілі температури і вмісту кисню у воді на різних глибинах будуть корисними для розуміння міграції риб протягом року. Внутрішня складова поглиненої дози риб буде розрахована за питомою активністю радіонуклідів у тканинах риб після їх вилову.

Висновки і перспективи.

Потужність поглиненої дози в оз. Бріт у різних точках змінюється в широкому діапазоні і досягає максимального значення біля $23 \text{ мкГр} \cdot \text{год}^{-1}$ на глибині всього 1,2 м та $13\text{--}18 \text{ мкГр} \cdot \text{год}^{-1}$ в найглибших місцях у центрі озера. Середня питома активність ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{154}Eu і ^{241}Am в донних відкладах оз. Бріт досягає $26 \pm 3 \text{ Бк} \cdot \text{см}^{-3}$, $43 \pm 2 \text{ Бк} \cdot \text{см}^{-3}$, $0,10 \pm 0,02 \text{ Бк} \cdot \text{см}^{-3}$ і $2,1 \pm 0,3 \text{ Бк} \cdot \text{см}^{-3}$, відповідно.

В оз. Бріт відсутня кореляція між

Гречанюк М. О., Голяка Д. М., Левчук С. Є., Павленко П. М., Теїєн Х.-К., Хауген Т. О., Максін В. І., Кашпаров В. О.

середніми рівнями вмісту радіонуклідів у донних відкладах і глибиною озера, а також спостерігається помірна кореляція виміряною дозиметром та розрахунковою потужністю поглинутої дози зовнішнього опромінення на основі середньої питомої активності радіонуклідів у донних відкладах. Відсутність кореляції між величиною питомої активності радіонуклідів і глибиною залягання донних відкладів у оз. Бріт пов'язана із впливом змиву радіонуклідів з водозабору на

формування радіоактивного забруднення профілю донних відкладів.

У зв'язку з цим, для зменшення невизначеності доз зовнішнього опромінення організмів в оз. Бріт і оз. Глибоке, яке є одним із найбільш забруднених радіонуклідами водойм ЧЗВ, необхідні дані про місцезнаходження різних організмів, включаючи риб, відносно донних відкладів протягом року з коригуванням до експериментальних результатів прижиттєвої дозиметрії аналогічно роботам [12, 22].

ПОДЯКА

Автори висловлюють подяку професорці Норвежського університету наук про життя і почесному професору НУБіП України Бріт Салбу, активній учасниці ліквідації наслідків Чорнобильської Катастрофи, на честь якої було названо оз. Бріт в ЧЗВ. Ці роботи було підтримано НУБіП України в межах теми №110/1-пр-2022 (№ держреєстрації 0122U001794) і гранту СРЕА-2015/10108 Норвежського центру міжнародного співробітництва в галузі освіти / the Norwegian Centre for International Cooperation in Education (SiU) «Joint Ukrainian-Norwegian education programme in Environmental Radioactivity», а також частково в 2020–2021 рр. в межах проєкту НФДУ № 93/02.2020.

Список використаних джерел

1. Pomortseva N.A., Gudkov D.I. Effect of additional acute irradiation on cytomorphological abnormalities of erythrocytes of the prussian carp (*Carassius gibelio* Bloch) from water body contaminated with radionuclides. *Problems of Radiation Medicine and Radiobiology*. 24 (2019), 270–283 <https://doi.org/10.33145/2304-8336-2019-24-270-283>.
2. Lerebours A., Gudkov D., Nagorskaya L., Kaglyan A., Rizewski V., Leshchenko A., Bailey E. H., Bakir A., Ovsyanikova S., Laptev G. & Smith J. T. Impact of Environmental Radiation on the Health and Reproductive Status of Fish from Chernobyl. *Environ. Sci. Technol.* 52 (2018),

9442–9450

<https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02378>

3. Fuller N., Ford A.T., Lerebours A., Gudkov D.I., Nagorskaya L., Smith J. Chronic radiation exposure at Chernobyl shows no effect on genetic diversity in the freshwater crustacean, *Asellus aquaticus* thirty years on. *Ecology and Evolution*. 9 (2019), 10135–10144. <http://dx.doi.org/10.1002/ece3.5478>
4. Kashparova E., Levchuk S., Morozova V., Kashparov V. A dose rate causes no fluctuating asymmetry indexes changes in silver birch (*Betula pendula* (L.) Roth.) leaves and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles in the Chernobyl Exclusion Zone. *Journal of Environmental Radioactivity*. 211 (2020), 105731.

Гречанюк М. О., Голяка Д. М., Левчук С. Є., Павленко П. М., Теєн Х.-К., Хауген Т. О., Максін В. І., Кашпаров В. О.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.05.015>

5. Gudkov D.I., Shevtsova N.L., Pomortseva N.A., Dzyubenko E.V., Kaglyan A.E., Nazarov A.B. Radiation-induced cytogenetic and hematologic effects on aquatic biota within the Chernobyl exclusion zone. *Journal of Environmental Radioactivity*. 151 (2016) 438-448,

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.09.004>

6. ICRP, Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants. (ICRP Publication 108), (2008), 242p. <https://www.icrp.org/publication.asp?id=icrp%20publication%20108>

7. Беляєв В.В., Волкова О.М., Гудков Д.І., Пришляк С.П., Скиба В.В. Реконструкція поглиненої дози опромінення риби оз. Глибокого впродовж ранньої фази аварії на Чорнобильській АЕС. *Гідробіол. журн.* 57(2) (2021), 96-106.

8. Гречанюк М.О., Кашпарова О.В., Павленко П.М., Левчук С.Є., Максін В.І., Кашпаров В.О. Радіоактивне забруднення і дози внутрішнього опромінення риби в озері Глибоке Чорнобильської зони відчуження. *Наукові доповіді НУБіП України*. № 3 (97) (2022),

<http://dx.doi.org/10.31548/dopovidi2022.03.003>

9. Каглян О.Є., Гудков Д.І., Кіреєв С.І., Кленус В.Г., Беляєв В.В., Юрчук Л.П., Дроздов В.В., Гупало О.О. Динаміка питомої активності ^{90}Sr і ^{137}Cs у представників іхтіофауни водойм Чорнобильської зони відчуження. *Ядерна фізика та енергетика*. 22(1) (2021), 62-73. <https://doi.org/10.15407/jnpae2021.01.062>

10. Kaglyan A.Ye., Gudkov D.I., Kireyev S.I., Yurchuk L.P., Gupalo Ye.A. Fish of the Chernobyl exclusion zone: modern levels of radionuclide contamination and radiation doses. *Hydrobiological Journal*. 55(5) (2019), 81-99.

<https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v55.i5.80>

11. ERICA Assessment Tool 1.0. The integrated approach seeks to combine exposure/dose/effect assessment with risk characterization and managerial considerations (<http://www.ERICA-tool.com>).

12. Monk C. T., Arlinghaus R. Encountering a bait is necessary but insufficient

to explain individual variability in vulnerability to angling in two freshwater benthivorous fish in the wild. *PLOS ONE*. March 16, 2017, 1-25 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0173989>

13. Ulanovsky A., Pröhl G., Gómez-Ros J.M.. Methods for calculating dose conversion coefficients for terrestrial and aquatic biota. *J Environ Radioact.* 99(9) (2008), 1440-1448.

14. Teien, H.-C., Kashparova, O., Salbu, B., Levchuk, S., Protsak, V., Eide D.M., Jensen, K.A., Kashparov V. Seasonal changes in uptake and depuration of ^{137}Cs and ^{90}Sr in silver Prussian carp (*Carassius gibelio*) and common rudd (*Scardinius erythrophthalmus*). *Science of the Total Environment*. 786 (2021), 147280, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147280>

15. Ramzaev V.P., Barkovsky A.N. On the relationship between ambient dose equivalent and absorbed dose in air in the case of large-scale contamination of the environment by radioactive cesium. *Radiation hygiene*. 8(3) (2015), 6-20

16. Павлоцкая Ф.И.. Основные принципы радиохимического анализа объектов окружающей среды и методы определения радионуклидов стронция и трансурановых элементов. *Журнал аналитической химии*. 52(2) (1997), 126.

17. Набиванець Б. Й., Осадчий В. І., Осадча Н. М., Набиванець Ю. Б. Аналітична хімія поверхневих вод. Київ: Наукова думка, (2007) 455 с.

18. Павленко П. М., Кашпарова О. В., Левчук С. Є., Гречанюк М. О., Гудков І. М., Кашпаров В. О. Вплив додаткового «чистого» годування на вміст ^{90}Sr і ^{137}Cs в карасях сріблястих (*Carassius gibelio*) у Чорнобильській зоні відчуження. *Ядерна фізика та енергетика*. 22(3) (2021), 272-283 <https://doi.org/10.15407/jnpae2021.03.272>

19. Гречанюк М. О., Кашпарова О. В., Павленко П. М., Левчук С.Є., Максін В.І., Кашпаров В.О. Гранично допустимі концентрації радіонуклідів у водоймах. *Наукові доповіді НУБіП України*. № 99(5) (2022),

<http://dx.doi.org/10.31548/dopovidi2022.05.002>

20. Kashparov V., Salbu B., Levchuk S., Protsak V., Maloshtan I., Simonucci C., Courbet C., Nguyen H., Sanzharova N.,

Гречанюк М. О., Голяка Д. М., Левчук С. Є., Павленко П. М., Теїєн Х.-К., Хауген Т. О., Максін В. І., Кашпаров В. О.

Zabrotsky V. Environmental behaviour of radioactive particles from Chernobyl. *Journal of Environmental Radioactivity*. 208-209 (2019), 106025

<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106025>

21. Ulanovsky A., Coppleson D., Vives i Batlle J. ICRP Publication 136: Dose Coefficients for Non-human Biota Environmentally Exposed to Radiation. 46(2) (2017)

<https://doi.org/10.1177/0146645317728022>.

22. Woodhead D. S.. The Radiation Dose Received by Plaice (*Pleuro-Nectes Platessa*) from the Waste Discharged into the North-east Irish Sea from the Fuel Reprocessing Plant at Windscale. *Health Physics*. 25 (1973), 115-121.

https://journals.lww.com/health-physics/Abstract/1973/08000/The_Radiation_Dose_Received_by_Plaice.4.aspx

References

1. Pomortseva, N.A. & Gudkov, D.I. (2019) Effect of additional acute irradiation on cytomorphological abnormalities of erythrocytes of the prussian carp (*Carassius gibelio* Bloch) from water body contaminated with radionuclides. *Problems of Radiation Medicine and Radiobiology*. 24, 270-283 <https://doi.org/10.33145/2304-8336-2019-24-270-283>.

2. Lerebours, A., Gudkov, D., Nagorskaya, L., Kaglyan, A., Rizewski, V., Leshchenko, A., Bailey, E.H., Bakir, A., Ovsyanikova, S., Laptev, G. & Smith J.T. (2018) Impact of Environmental Radiation on the Health and Reproductive Status of Fish from Chernobyl. *Environ. Sci. Technol.* 52, 9442–9450 <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02378>

3. Fuller, N., Ford, A.T., Lerebours, A., Gudkov, D.I., Nagorskaya, L. & Smith J. (2019). Chronic radiation exposure at Chernobyl shows no effect on genetic diversity in the freshwater crustacean, *Asellus aquaticus* thirty years on. *Ecology and Evolution*. 9, 10135–10144. <http://dx.doi.org/10.1002/ece3.5478>

4. Kashparova, E., Levchuk, S., Morozova, V. & Kashparov V. (2020) A dose rate causes no fluctuating asymmetry indexes changes in silver birch (*Betula pendula* (L.) Roth.) leaves and Scots pine (*Pinus sylvestris*

L.) needles in the Chernobyl Exclusion Zone. *Journal of Environmental Radioactivity*. 211, 105731.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.05.015>

5. Gudkov, D.I., Shevtsova, N.L., Pomortseva, N.A., Dzyubenko, E.V., Kaglyan, A.E. & Nazarov A.B. (2016). Radiation-induced cytogenetic and hematologic effects on aquatic biota within the Chernobyl exclusion zone. *Journal of Environmental Radioactivity*. 151, 438-448,

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.09.004>

6. ICRP, Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants. (ICRP Publication 108), (2008), 242p. <https://www.icrp.org/publication.asp?id=icrp%20publication%20108>

7. Belyaev, V.V., Volkova, O.M., Gudkov, D.I., Prishlyak, S.P. & Skyba, V.V. (2021). Reconstruction of the absorbed dose of fish irradiation of the Glubokoye Lake during the early phase of the accident at the Chernobyl NPP. *Hydrobiological Journal*. 57(2), 96-106.

8. Hrechaniuk, M., Kashparova, O., Pavlenko, P., Levchuk, S., Maksin, V. & Kashparov, V. (2022). Radioactive contamination and doses of internal irradiation of fish in the deep lake of the Chernobyl exclusion zone. *Scientific reports of NUBiP of Ukraine*. 3(97) (2022), <http://dx.doi.org/10.31548/dopovidi2022.03.003>

9. Kaglyan, A.Ye., Gudkov, D.I., Kireev, S.I., Klenus, V.G., Belyaev, V.V., Yurchuk, L.P., Drozdov, V.V. & Hupalo O.O. (2021). Dynamics of specific activity of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in representatives of ichthyofauna of Chernobyl exclusion zone. *Nuclear physics and atomic energy*. 22(1), 62-73. <https://doi.org/10.15407/jnpae2021.01.062>

10. Kaglyan, A.Ye., Gudkov, D.I., Kireyev, S.I., Yurchuk, L.P. & Gupalo Ye.A. (2019). Fish of the Chernobyl exclusion zone: modern levels of radionuclide contamination and radiation doses. *Hydrobiological Journal*. 55(5), 81–99. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v55.i5.80>

11. ERICA Assessment Tool 1.0. The integrated approach seeks to combine exposure/dose/effect assessment with risk characterization and managerial considerations

Гречаниук М. О., Голяка Д. М., Левчук С. Є., Павленко П. М., Теєн Х.-К., Хауген Т. О., Максим В. І., Кашпаров В. О.

(<http://www.ERICA-tool.com>).

12. Monk C. T. & Arlinghaus R. (2017) Encountering a bait is necessary but insufficient to explain individual variability in vulnerability to angling in two freshwater benthivorous fish in the wild. *PLOS ONE*. March 16, 1-25 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0173989>

13. Ulanovsky, A., Pröhl, G. & Gómez-Ros J.M. (2008). Methods for calculating dose conversion coefficients for terrestrial and aquatic biota. *Journal of Environmental Radioactivity*. 99(9), 1440–1448.

14. Teien, H.-C., Kashparova, O., Salbu, B., Levchuk, S., Protsak, V., Eide, D.M., Jensen, K. A. & Kashparov V. (2021). Seasonal changes in uptake and depuration of ^{137}Cs and ^{90}Sr in silver Prussian carp (*Carassius gibelio*) and common rudd (*Scardinius erythrophthalmus*). *Science of the Total Environment*. 786, 147280, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147280>

15. Ramzaev V.P. & Barkovsky A.N. (2015). On the relationship between ambient dose equivalent and absorbed dose in air in the case of large-scale contamination of the environment by radioactive cesium. *Radiation hygiene*. 8(3), 6-20

16. Pavlitskaya F.I. (1997). Basic principles of radiochemical analysis of environmental objects and methods for determination of strontium radionuclides and transuranic elements. *Journal of Analytical Chemistry*. 52 (2), 126-143.

17. Nabyvanets, B.Y., Osadchy, V.I., Osadcha, N.M. & Nabyvanets Y.B. (2007). Analytical chemistry of surface waters. Kyiv: Naukova dumka, 455 p.

18. Pavlenko, P.M., Kashparova, O.V., Levchuk, S. Ye., Hrechaniuk, M. O., Gudkov, I. M. & Kashparov, V.O. (2021). Effect of additional "clean" feeding on ^{90}Sr and ^{137}Cs content in Prussian carp (*Carassius gibelio*) in the Chernobyl exclusion zone. *Nuclear physics and atomic energy*. 22(3), 272-283. <https://doi.org/10.15407/jnpae2021.03.272>

19. Hrechaniuk, M., Kashparova, O., Pavlenko, P., Levchuk, S., Maksin, V. & Kashparov, V. (2022). Threshold limit values of radionuclides in the waterbodies. Scientific reports of NUBiP of Ukraine. 99(5), <http://dx.doi.org/10.31548/dopovidi2022.05.002>

20. Kashparov, V., Salbu, B., Levchuk, S., Protsak, V., Maloshtan, I., Simonucci, C., Courbet, C., Nguyen, H., Sanzharova, N. & Zabrotsky, V., (2019). Environmental behaviour of radioactive particles from Chernobyl. *Journal of Environmental Radioactivity*. 208-209, 106025 <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106025>

21. Ulanovsky, A., Copplestone, D. & Vives i Batlle, J. (2017). ICRP Publication 136: Dose Coefficients for Non-human Biota Environmentally Exposed to Radiation. 46(2) <https://doi.org/10.1177/0146645317728022>.

22. Woodhead, D. S. (1973). The Radiation Dose Received by Plaice (*Pleuronectes platessa*) from the Waste Discharged into the North-east Irish Sea from the Fuel Reprocessing Plant at Windscale. *Health Physics*. 25, 115-121 https://journals.lww.com/health-physics/Abstract/1973/08000/The_Radiation_Dose_Received_by_Plaice.4.aspx

ACTIVITY CONCENTRATION OF RADIONUCLIDE AND EXTERNAL DOSE RATE IN BOTTOM DEPOSITS OF BRIT LAKE IN THE CHORNOBYL EXCLUSION ZONE

M. O. Hrechaniuk, D. M. Holiaka, S. Ye. Levchuk, P. M. Pavlenko, H.-C. Teien, T. O. Haugen, V. I. Maksin, V. O. Kashparov

Abstract. The profiles of the vertical distribution of the gamma dose rate and activity concentrations of ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{154}Eu , and ^{241}Am in the bottom sediments of Brit Lake were obtained. The lake is located within the dammed section of the Krasnenska floodplain of the Pripyat River in the Chernobyl Exclusion Zone (51.44844°;

Гречанюк М. О., Голяка Д. М., Левчук С. Є., Павленко П. М., Теїєн Х.-К., Хауген Т. О., Максим В. І., Кашпаров В. О.

30.06020°). The values of the dose rate and activity concentration of ^{137}Cs in the sediments reached $23 \mu\text{Gy h}^{-1}$ and $43 \text{ Bq}\cdot\text{cm}^{-3}$. In the lake Brit radioactive contamination of bottom sediments did not depend on the depth of the lake due to the washing of radionuclides from the water intake. A weak correlation was observed between values of in-situ measured and calculated gamma dose rates in bottom sediments. The average calculated and measured dose rates of gamma radiation in bottom sediments of the lake varied within the range of $1.3\text{--}19 \mu\text{Gy h}^{-1}$ and was compatible with the internal radiation dose to fish ($5\text{--}15 \mu\text{Gy h}^{-1}$). Contribution of radionuclide content in water to the gamma dose rate does not exceed 2 nGy h^{-1} .

In October 2021, appropriate equipment for acoustic 3-D telemetry and individual dosimetry of various fish species was installed in the lake to reduce uncertainty in estimates of doses of external exposure to aboriginal fish in the lakes

Keywords: ^{90}Sr , ^{137}Cs , absorbed dose rate, bottom sediments, Chornobyl Exclusion Zone