

# РАДІАЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА

О. Войцехович

## ІСТОРИЧНИЙ НАРИС

Дослідження за напрямком “радіаційний моніторинг природного середовища” в інституті є невід’ємною сторінкою його розвитку протягом останніх 35 років, що минули після аварії на Чорнобильській АЕС. Фахівці інституту з перших днів після аварії спочатку у складі провідних наукових установ Держгідромету СРСР, а потім і самостійно брали участь у відборі проб ґрунтів і води, проводили радіаційно-дозиметричні обстеження забруднених територій і населених пунктів, обслуговували аеро-гамма-спектрометричні вимірювання для забезпечення картографування забруднених територій. Саме в цей період було розпочато наукові дослідження характеристик радіоактивності у природному середовищі, зокрема такі як: оцінки стану радіоактивного забруднення територій, характеристики радіоактивного забруднення аерозолів і їх розповсюдження в атмосфері, вивчення процесів змиву радіонуклідів з поверхні водозборів у водні об’єкти і фізико-хімічних трансформації їх у водно-ґрунтових середовищах; вивчення основ радіаційного захисту, які були пізніше втілені в розробках стратегії водоохоронних заходів у зоні відчуження ЧАЕС, а також методичні дослідження з

адаптації методів аналітичного супроводу програм моніторингу довкілля з метою аналізу безпеки і планування реабілітаційних заходів. Деякі фото з історії розвитку таких досліджень свідчать про той шлях, який пройшли фахівці інституту, формуючи сучасний колективний досвід вивчення радіоактивності у природному середовищі.

Вивченню стану радіоактивного забруднення природного середовища в організаціях Державної гідрометеорологічної служби на той час приділяли значну увагу. Було очевидним, що подолання наслідків чорнобильського радіоактивного забруднення для довкілля матиме довготривалий характер, відповідно, потрібно було створювати власну науково-методичну і технічну базу радіаційного моніторингу і радіоекологічних досліджень. Тому вже у 1987 р. за ініціативою колишнього директора інституту В.С. Максимова в інституті було створено сектор радіо-спектрометрії і радіохімії, почали розвиватися власна аналітична і експериментальна бази інституту під науковим керівництвом НПО “Тайфун”, “Інституту прикладної геофізики”, а також інших наукових закладів Держгідромету СРСР. Пізніше, у 1989 р., на базі сектору радіоспектрометрії і лабораторії радіаційного моніторингу водних



Фрагменти участі фахівців відділу в роботах у період 1986–1995 років за напрямком вивчення впливу на навколишнє природне середовище радіоактивного забруднення як наслідка аварії на ЧАЕС

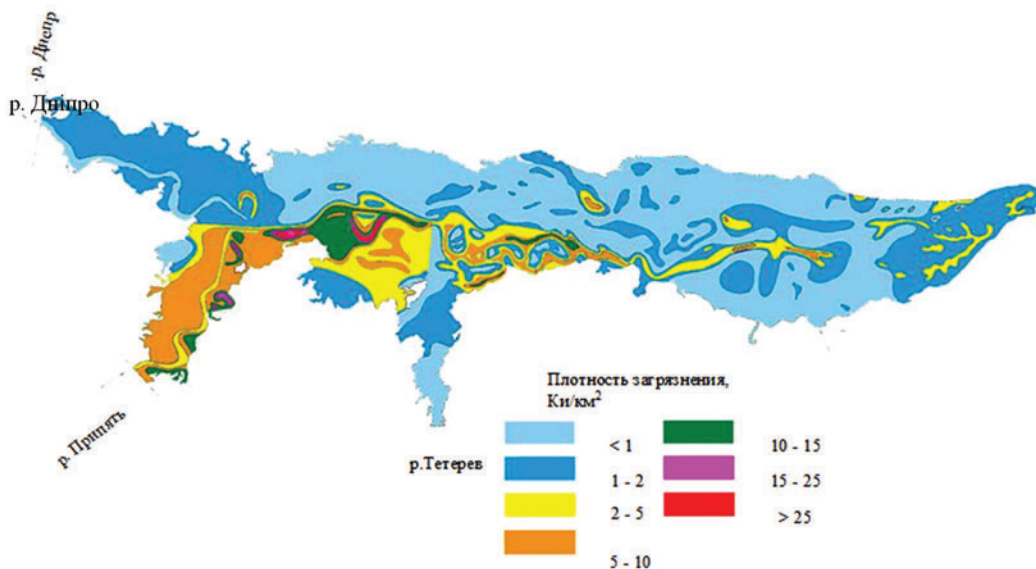
об'єктів у складі відділу гідрології інституту, а також експедиційного підрозділу було створено відділ радіаційного моніторингу природного середовища (ВРМПС).

Основними напрямками досліджень відділу протягом 90-х років були експериментальні дослідження параметрів змиву радіонуклідів з поверхні забруднених водозборів малих річок зони відчуження (різних типів і ландшафтів), щорічні експедиційні дослідження стану забруднення і процесів розповсюдження радіонуклідів у дніпровських водосховищах, а також параметризація математичних моделей міграції радіонуклідів у геохімічній системі "ґрунти-вода-зважені частки-донні відклади", а також процеси їх трансформації під впливом гідрологічних процесів. Результати цих досліджень опубліковано у десятках наукових статей (наприклад, у [1-12]).

В цей період у відділі виконується детальне вивчення структури і фізико-хімічних форм забруднення заплавної території ближньої зони ЧАЕС, як одного із основних джерел формування радіоактивного забруднення вод р. Прип'яті і всієї дніпровської водної системи в період високих повеней. Особливу увагу у дослідженнях приділяли характеристикам забруднення і трансформації, так званих "гарячих" часток дрібно дисперсного ядерного палива на поверхні заплави річки у зонах потенційного затоплення [8, 10, 12, 13]. Результати цих досліджень було покладено в основу обґрунтування оптимальних стратегій водоохоронних заходів, які дозволили зменшити змив радіоактивних

часток і стік радіонуклідів у водну систему р. Прип'яті з поверхні забруднених територій її лівобережної заплави у ближній зоні навколо ЧАЕС. Обґрунтування будівництва водоохоронного комплексу (захисної дамби, насосних станцій і режиму регулювання дренажних вод) для запобігання і зменшення радіоактивних стоків із заплави і меліоративних систем на радіоактивно-забруднених територіях зони відчуження ЧАЕС були розроблені в інституті у тісному партнерстві із фахівцями інститутів Національної Академії наук України і проектного інституту "Укрводпроект". Результати пошуку оптимальних стратегій і обґрунтування водоохоронних заходів за участю відділу викладено у багатьох публікаціях, наприклад, [4, 6, 8, 9, 11, 12, 14, 15]. Оцінки ефективності і вибір оптимальних стратегій управління водними об'єктами з метою радіаційного захисту стали можливими тільки на підставі всебічного аналізу характеристик забруднення водних систем і результатів прогнозування тенденцій формування їх забруднення у майбутньому під впливом природних процесів і техногенних факторів.

У ВРМПС приділяли значну увагу розвитку методів відбору донних відкладів і вивченню просторової і вертикальної структури забруднення дна водойм, де з часом накопичувалися радіонукліди, що надходили з прилеглих водозбірних територій. Це дозволило виконати системні дослідження стану радіоактивного забруднення донних відкладів озер зони відчуження, водойми-охолоджувача ЧАЕС [16], а також дніпровських водосховищ за результатами



Формування забруднення дна Київського водосховища цезієм-137 протягом перших 5 років після аварії на ЧАЕС (станом на 1992 р.): найбільш забрудненими було виявлено гирлову зону р. Прип'ять, а також відносно глибокі ділянки старого русла і судноплавного каналу, де осідали забруднені частки завислих наносів (рівні забруднення в одиницях Кюрі на км<sup>2</sup> показано різним кольором)

практично щорічних експедицій, які виконувалися в період з 1986 по 1993 рр. [17, 18].

Протягом 90 х років суттєво розвивається міжнародне співробітництво у вивченні екологічних наслідків радіоактивного забруднення. Фахівці відділу залучаються до виконання досліджень в рамках багатьох міжнародних проектів, отримали можливість вивчати міжнародний досвід, а також брали участь в роботах на різних майданчиках Європи, які зазнали радіоактивного забруднення внаслідок аварії на ЧАЕС.

Досвід вивчення радіоактивності у водосховищах дніпровського каскаду було поширено на моніторингові дослідження р. Дунай [19], а також інших річок ЄС, зокрема, р. По в Італії, де спільно з італійськими фахівцями тестувалися методи для визначення ролі зважених часток різного фракційного складу і мінералогії у транспортуванні цезію-137 у водних потоках [20]. Також в рамках проектів міжнародного співробітництва за участю фахівців відділу вивчалися процеси формування забруднення озер у Німеччині (оз. Бодензее) і Великобританії (оз. Девоке) [21], вивчалися механізми формування радіоактивного забруднення Чорного моря водами річок Дніпро і Дунай [22, 23].

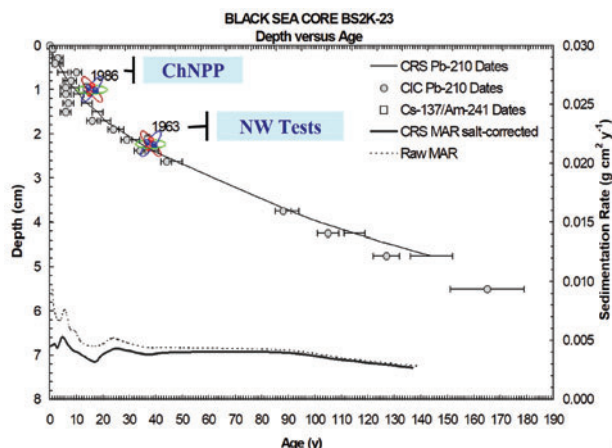
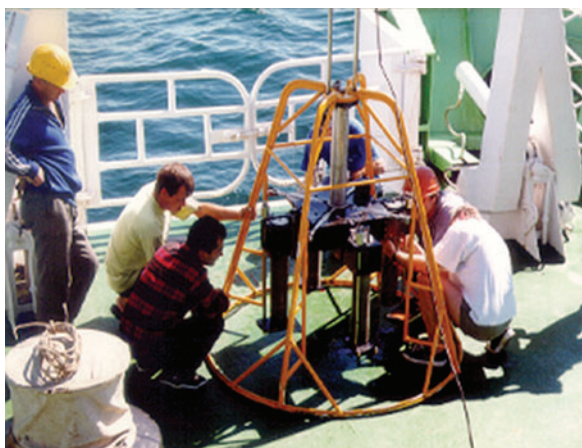
Основні результати робіт відділу того періоду опубліковані у звітах міжнародних проектів ECP-3 (1993–1996) [24]; AQUASCOPE (1998–2001) [25], а також в інших звітах і міжнародних публікаціях [26–28]. В рамках франко-німецького співробітництва (проекти TRANSAQUA і RUNOFF) [29,30] розроблено бази даних про стан забруднення водних екосистем і параметри поверхневого змиву радіонуклідів з водозборів.

У другій половині 90-х років, завдяки участі у проектах технічного співробітництва з МАГАТЕ в ін-

ституті було здійснено перше суттєве переоснащення радіо-спектрометричного обладнання, розпочато впровадження сучасних методів напівпровідникової гамма-спектрометрії, а також рідинно-сцинтиляційної спектрометрії. В цей спільно із морським відділенням УкрГМІ у м. Севастополі розпочато системні спостереження за процесами формування забруднення прибережних вод Чорного моря, а також вивчення ролі процесів седиментації радіонуклідів різного походження, які надходили з атмосферними випадіннями у якості ізотопних маркерів [31, 32, 33].

### СУЧАСНИЙ ЕТАП НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ (2001–2020 рр.)

На початку 2000-х активно розвиваються партнерство в рамках наукових проектів і технічного співробітництва з Міжнародним Агентством з Атомної Енергії (МАГАТЕ). Співробітники ВРМПС залучалися до участі у таких програмах Агентства як VAMP, BIOMOVIS, EMRAS (аналіз даних, параметризація і валідація математичних моделей для моделювання поведінки радіонуклідів у різних елементах природного середовища). В цей період виконано перші системні узагальнення наслідків аварійного забруднення для водних систем, активно розвиваються технології моделювання і розробки систем інформаційної підтримки прийняття рішень для застосування отриманого досвіду у попередженні і мінімізації можливих ситуацій аварійного забруднення природного середовища у майбутньому [34]. В інституті систематизовано і зібрано всі доступні дані про результати вивчення радіоактивного забруднення річок зони впливу аварії, удосконалюються методи спостережень за радіоактивним забрудненням річок і водозбірних територій, підготовлено перші



Фрагменти роботи фахівців УкрГМІ на борту науково-дослідного судна "Професор Водяницький" (2000 р.): підготовка системи відбору донних відкладів до спуску (зліва) і приклад оцінки накопичення маси і шару седиментів ( $\text{г}\cdot\text{см}^2/\text{с}$ ) за даними ізотопного датування шарів донних відкладів Чорного моря на одній із глибоководних станцій (справа) [37]



за період незалежності України рекомендації, щодо організації і проведення радіаційного моніторингу на водних об'єктах [35, 36].

Продовжується співробітництво з МАГАТЕ і провідними інститутами Європи у застосуванні ізотопних технологій для вивчення геофізичних процесів природного середовища. На основі використання методики датування віку донного осаду, визначено характеристики швидкості накопичення осаду у глибоководних районах Чорного моря [33, 37]. Оцінки, що отримано дають підстави для кореляції параметрів седиментаційних процесів, евтрофікації моря і подальшого вивчення впливу змін клімату на ці процеси. У рамках міжнародних програм (BSERP, 2003–2004) вивчалися роль атмосферних випадіннь на поверхню моря за даними прибережних спостережень і роль седиментаційних процесів у трансформації біогенних речовин, що надходять із річковим стоком.

Методи ізотопного датування [38] знайшли своє застосування також у Національній антарктичній програмі для вивчення швидкості наростання льоду в Антарктиді з перспективою вирішення деяких проблем зміни клімату на планеті.

З 2004 р. у ВРМПС розпочинаються системні дослідження оцінки наслідків для природного середовища об'єктів, радіаційної спадщини видобутку і переробки уранових руд, зокрема, на майданчику колишнього ВО "Придніпровський хімічний завод" у м. Дніпродзержинськ (на сьогодні м. Камянське) [39, 40]. Роботи із радіоактивними залишками уранового виробництва сприяли необхідності адаптувати і розвинути сучасні методи низько-фоновий гамма-спектрометрії і рідинно-сцинтиляційного лічення для визначення вмісту радіонуклідів ураноторієвих рядів в ґрунтах, аерозолях, поверхневих і підземних водах [41]. Фахівці лабораторії відділу (Лаврова Т.В., Пірнач Л.С., Деревець Т.Г.), отримали можливість навчатися і стажуватися у Німеччині і

РФ у провідних наукових інститутах, опановуючи сучасні методи радіохімії і рідинно-сцинтиляційної спектрометрії. Це дозволило адаптувати отриманий досвід і сучасні методи досліджень радіонуклідів природного походження в лабораторії УкрГМІ і, зокрема, успішно застосовувати їх для участі в програмах моніторингу природного середовища зон впливу об'єктів уранової спадщини, а згодом розпочати навчати фахівців підприємств операторів уранових об'єктів, а також стажерів із Таджикистану, Киргизії, Узбекистану та інших країн, які направлялися в УкрГМІ в рамках проектів МАГАТЕ для підвищення кваліфікації в організації програм об'єктового моніторингу [42,43].

Цей напрямок досліджень став одним із основних у роботах відділу на період з 2009 по 2017 р., протягом якого було організовано системні роботи за програмами оцінки стану і вивчення наслідків для навколишнього природного середовища майданчиків спадщини уранових виробництв, виконано дослідження форм і міграційних властивостей радіонуклідів уранового ряду в атмосферному повітрі, у ґрунтах, поверхневих і підземних водних системах. У співпраці з оператором майданчика уранової спадщини ВО "ПХЗ" фахівці відділу брали участь у вивченні просторового забруднення території майданчика, а також вертикальної структури вмісту радіонуклідів у ґрунтах [44,45].

Комплексні дослідження впливу майданчиків уранової спадщини на майданчику колишнього ВО "ПХЗ" дозволили визначити пріоритетні шляхи формування радіаційних і екологічних ризиків, довести провідну роль факторів зовнішнього гамма-випромінювання, а також інгаляційних шляхів опромінення людей, що формуються ексхалтацією газу радону-222 з поверхні і аерозольним забрудненням атмосферного повітря.

Результати робіт відділу також показали, що водні шляхи (поверхневий стік і підземний стік радіо-



Приклади роботи і результати оцінок забруднення майданчиків спадщини уранового виробництва в Україні ("колишній ВО "ПХЗ", м. Камянське)

нуклідів з території майданчика) на теперішній час не є значущими у формуванні радіоактивного забруднення дніпровської водної системи і опромінення людей, але з часом вони можуть стати суттєвими факторами радіаційної небезпеки через поступове розширення ареолу забруднення підземних вод, що розвантажуються у р. Дніпро, а тому такі об'єкти потребують довготривалого контролю радіаційної обстановки і здійснення заходів приведення їх у безпечний стан. Результати узагальнення даних спостережень і наукових досліджень відділу на майданчиках уранової спадщини стали основою для комплексних оцінок безпеки і обґрунтування реабілітаційних заходів на них в Україні.

Фахівці ВРМПС також неодноразово запрошувалися у якості консультантів для надання методичної допомоги лабораторіям, які беруть участь у здійсненні програм комплексного моніторингу навколишнього природного середовища у зоні впливу уранових хвостосховищ (Войцехович О.В., Лаптев Г.В., Костеж О.Б., Лаврова Т.В.), і, зокрема, для вивчення ефектів впливу уранових виробництв на стан забруднення оз. Іссик-Куль (Киргизія) і р. Сирдар'я (Таджикистан), та інших країн.

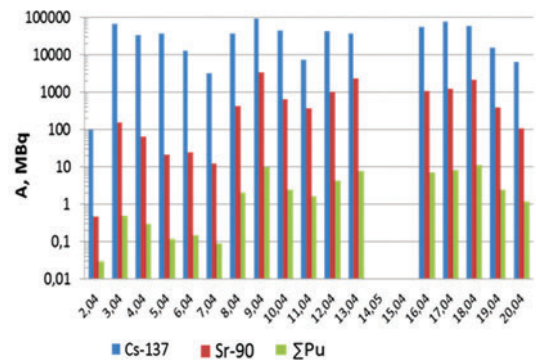
Досвід організації і аналітичного забезпечення об'єктових програм моніторингу майданчиків спадщини уранового виробництва з метою оцінювання стану безпеки і обґрунтування реабілітаційних заходів узагальнено також в роботах [46–48].

Традиційно протягом останніх кількох десятиліть у відділі продовжуються роботи із методичного супроводу оперативних програм моніторингу радіоактивного забруднення водних систем. Було показано, що на початку 2000-х рівні забруднення природного середовища, зокрема вод р. Дніпра, р. Десна, і дніпровських водосховищ за показниками вмісту  $^{137}\text{Cs}$  наблизилися до рівнів, які спостерігалися до аварії на ЧАЕС, а також суттєво знизилися до безпечних і рівні забруднення вод  $^{90}\text{Sr}$  чорнобильського походження [6, 8, 23, 49]. Натомість рівні

забруднення вод радіонуклідами природного походження, в тому числі у техногенно підсилених концентраціях на деяких річках зросли, тоді як в системі фонових радіаційного моніторингу спостереження за показниками сумарної альфа-активності і, зокрема радіонуклідів уранового ряду не виконувалися.

Стало очевидним, що потрібно змінювати парадигму радіаційного моніторингу природного середовища, розвивати методи визначення природних радіонуклідів у природному середовищі і впроваджувати їх також в оперативну практику системи радіаційного моніторингу радіометричної мережі гідрометеорологічної служби [50]. Методи, які були адаптовані і удосконалені в роботах відділу на замовлення об'єктових програм моніторингу, стали у нагоді для впровадження на мережі фонових спостережень.

Новим етапом і суттєвим фактором розвитку наукових досліджень у відділі стали події значної комунальної радіаційної аварії на АЕС Фукусіма Дайчі в Японії у 2011 р. З перших днів аварійного викиду радіоактивної суміші в атмосферу фахівці відділу, використовуючи можливості спостережень за радіоактивними випадіннями на дослідному майданчику УкрГМІ вивчали динаміку радіоактивних випадіннь над територією Києва, які відбувалися в період з 17 березні до 4 квітня 2011 р. [51]. Можливості сучасних засобів автоматизованого відбору аерозолів і низько-фонові гамма-спектрометрії дозволили довести можливість залучення технічного і кадрового потенціалу відділу для участі в оперативних програмах радіаційного контролю в умовах аварійних ситуацій. Такі можливості неодноразово було доведено аналітичними оцінками фахівців відділу відслідковувати викиди рутенію-106 під час аварії на комбінаті переробки ядерних відходів "МАЯК" у РФ (2017 р.), виконаним аналізом треку викидів радіоактивної хмари, яка була сформована після вибуху підводного ядерного засобу у Білому морі біля



Результати оцінки емісії викидів радіонуклідів в атмосферу в період пожеж у зоні відчуження протягом квітня 2020 р.

Архангельську у 2019 р., а також під час масштабних пожеж у зоні відчуження весною 2020 р.

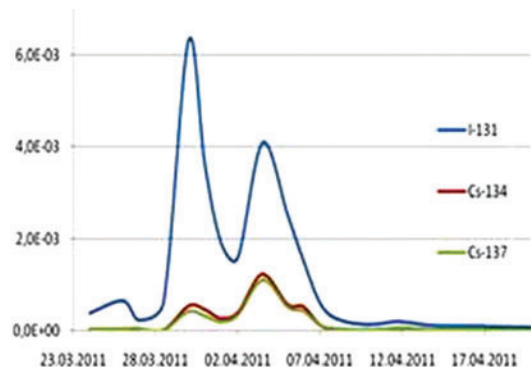
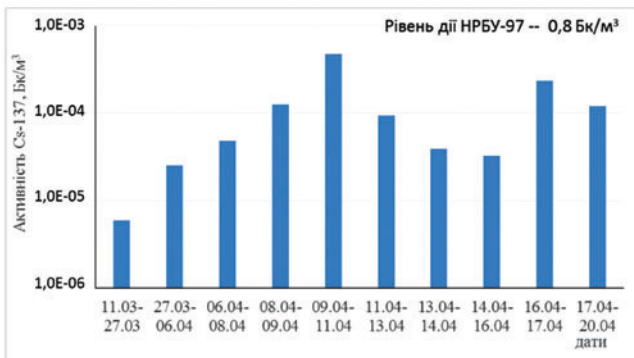
В період надзвичайної ситуації розвитку пожеж на радіоактивно-забруднених територіях зони відчуження протягом квітня 2020 р., фахівці відділу не тільки провели комплекс оцінювання радіоактивного забруднення аерозолів і допомагали оперативним підрозділам ГМС провести просторовий аналіз розповсюдження радіоактивних аерозолів на території України, але також виконали комплексний аналіз джерел загоряння і емісії радіоактивних домішок в атмосфері у газовій і сорбованій фазах з частками пилу [51, 52]. Результати аналізу емісії радіоактивних аерозолів із осередків загорянь і результати щоденного аналізу визначення вмісту радіонуклідів в аерозолях і просторової дисперсії радіонуклідів надавалися в українські і європейські центри прогнозування наслідків радіаційних аварій. Просторовий аналіз рознесення аерозолів, який виконано спільними зусиллями вчених і моніторингових служб Європи за участю фахівців відділу наведено в публікації [52].

Результати спостережень в пункті атмосферного моніторингу УкрГМІ показали, що концентрації цезію-137 в атмосфері м. Києва у квітні 2020 р. спостерігалися на рівні тих, що мали місце у квітні 2011 р. в результаті глобального забруднення атмосфери в результаті фукусімської аварії (максимальні активності досягали величин біля  $1 \text{ мБк/м}^3$ ).

Протягом останнього десятиріччя продовжується партнерське наукове співробітництво із університетами міст Фукусіма і Цукуба (Японія), які є основними виконавцями проектів вивчення екологічних наслідків радіоактивного забруднення природного середовища в Японії після аварії на АЕС Фукусіма-Дайчі 2011 р. в рамках проекту SATREPS в кооперації із науковими установами України у вивченні довготривалих наслідків для природного середовища аварійних викидів чорнобильського походження.

В рамках проекту у зоні відчуження було побудовано сучасно оснащені експериментальні стокові майданчики, на яких фахівці відділу спільно із японськими вченими продовжують спостереження за трансформацією радіонуклідів чорнобильського походження і процесами формуванням змиву і міграції радіонуклідів під впливом дощового стоку і сніготанення в умовах довготривалих змін, які відбулися в структурі і фізико-хімічних формах радіонуклідів на водозборах і у ґрунтах заплавлених територій річок зони відчуження. Отримані результати [53–57] дозволили перевірити і коригувати математичні моделі, які були розроблені протягом першого десятиліття після аварії на ЧАЕС і адаптувати розроблені моделі для прогнозування процесів довготривалого забруднення річок у зоні радіоактивних випадів префектури Фукусіма в Японії. Фахівці відділу неодноразово запрошувалися до Японії для спільних експериментальних досліджень на річках і водозборах, а також для читання лекцій і поширення досвіду водоохоронних заходів. Співробітництво з японськими вченими дозволило також суттєво розвинути технічну базу відділу сучасними польовими спектрофотометрами і засобами відбору проб, дроном для обстеження забруднених територій, а також рентген-флуоресцентним аналізатором елементного складу проб, а також отримати досвід радіоекологічних досліджень на полігонах і лабораторіях Японії.

Майже 20 років з 1999 по 2020 р. фахівці ВРМПС брали участь у різних проектах і етапах вивчення стану радіоактивного забруднення водойми охолоджувача ЧАЕС і розробках стратегії виведення його із експлуатації. Роботи виконувалися як в рамках міжнародних проектів, так і в рамках бюджетного фінансування НДР. Після початку випуску вод із водойми охолоджувача у 2013 р і до 2021 р. продовжуються комплексні дослідження трансформації водойми охолоджувача і процесів формування на його місці нових водойм із особливими процесами



Об'ємні концентрації активності цезію-137 в Києві (пункт спостережень УкрГМІ) протягом пожеж у зоні відчуження у квітні 2020 р. (зліва) і в період проходження радіоактивної хмари після аварії на АЕС Фукусіма Дайчі у 2011 р. (справа)



формування їх залишкового радіоактивного забруднення. Результати досліджень за участю фахівців відділу опубліковано в роботах [58, 59]. Дослідження будуть продовжуватися, враховуючи унікальність нової озерно-водно-болотної системи, яка сформувалася на місці колишньої водойми охолоджувача ЧАЕС і процесів, які в них відбуваються.

Протягом майже 30 років продовжуються спостереження на унікальних водоймах у зоні відчуження (оз. Глибоке і оз. Азбучин), які стали багаторічним міжнародним полігоном для комплексу наукових досліджень. Зокрема співробітниками відділу виконано комплекс спостережень, що дозволили виконати параметризацію дифузійної моделі формування забруднення водних мас озера за рахунок масообміну із радіонуклідами, які накопичені на дні з урахуванням процесів додаткового надходження радіонуклідів за рахунок змиву з поверхні водозборів прилеглих територій, а також процесів седиментації і дифузійного заглиблення радіонуклідів у донних відкладах [60,61]. Це дозволило пояснити динаміку формування їх забруднення із надзвичайно високим вмістом радіонуклідів чорнобильського походження у воді за рахунок тривалого процесу вилуговування радіонуклідів із залишків часток ядерного палива ЧАЕС, які були накопичені на дні і на водозбірних територіях цих водойм. Зокрема, було також показано, що причиною суттєвого зростання активності концентрацій  $^{90}\text{Sr}$  у воді оз. Азбучин, а також нових водойм, що сформувалися після випуску вод із водойми охолоджувача ЧАЕС у 2013 р.,

стали процеси відновлення нового циклу вилуговування і змиву раніше законсервованих у донних відкладах "гарячих часток" дрібно-диспергованого ядерного палива. Узагальнення результатів багаторічних досліджень трансформації радіонуклідів у водоймах і роботи з параметризації математичних моделей опубліковано в роботах [61, 62]. Такі дослідження продовжуються і дозволять удосконалити комплекс математичних моделей для прогнозування довготривалих наслідків можливого забруднення водних систем для різних умов аварійних викидів, а також для різних геохімічних і гідрологічних процесів, які можуть мати місце на радіоактивно забруднених територіях.

З 2005 р. відділ є членом програми МАГАТЕ "АЛЬМЕРА", що об'єднує кілька десятків провідних радіо-аналітичних лабораторій світу, які зобов'язані брати участь у міжнародних між лабораторних порівняннях результатів і професійних тестах з метою постійного удосконалення методів аналітичних вимірювань для широкого спектру іонізуючих випромінювачів у природному середовищі, а також підтримки високого професійного рівня персоналу лабораторій. Участь відділу у заходах програми "АЛЬМЕРА" створює засади реалізації програм контролю і гарантії якості даних аналітичних вимірювань, що мають бути впроваджені і у діяльності всіх аналітичних лабораторій суб'єктів державної системи радіаційного моніторингу країни. Щорічні тести, які пропонує МАГАТЕ членам програми для досліджень і підготовки детальних звітів різняться



Фрагменти роботи фахівців ВРМПС на міжнародних майданчиках вивчення процесів міграції радіонуклідів (зверху), а також робіт на теплоході УкрГМІ в озерах зони відчуження українсько-японської групи проекту SATREPS (2018 р.)





### Технічні можливості для оцінки стану радіоактивного забруднення довкілля



Засоби відбору проб, а також польове вимірювальне обладнання, які використовуються в УкрГМІ для наукових і моніторингових досліджень стану забруднення природного середовища

гірських і переробних виробництв мінеральних речовин, що містять радіонукліди природного походження, а також обстеження і здійснення моніторингу територій, майданчиків і об'єктів, які були забруднені в результаті діяльності у минулому або як наслідок аварійних ситуацій. Технічні засоби, які постійно удосконалюються, дозволяють провести відбір проб ґрунтів, атмосферного повітря (стаціонарна станція і мобільні пристарої), працювати на водних об'єктах річок, озер і водно-болотних угідь, а також на морських акваторіях.

У відділі також є доступним для роботи широкий набір радіометричних засобів для визначення радіаційної обстановки на місцевості, радонometri та інше допоміжне обладнання для визначення метеорологічних, гідрологічних, геохімічних характеристик довкілля, а також хімічного забруднення природного середовища. Відділ забезпечено автотранспортом, а також плавзасобами, у тому числі має можливість виконувати завдання радіаційного і екологічного моніторингу на акваторіях дніпровських водосховищ, річках Дніпро, Десна і Прип'ять із використанням плавучої лабораторії-теплоходу "Георгій Готовчиць".

Для радіометричних досліджень у відділі широко застосовуються методи і технології авторадіографічного аналізу, зокрема, для виділення і визначення характеристик часток ядерного палива у складі пилу, ґрунтів, донних відкладів і на поверхні рослин. Аналітичні можливості відділу були суттєво роз-

ширені у 2019 р, коли в рамках співробітництва з Фукусіма Університетом лабораторія отримала — енерго-дисперсійний рентген-флуоресцентний спектрометр EDX-8100 (SHIMADZU, Japan), що дозволяє визначати широкий спектр хімічних елементів у природному середовищі.

Аналітичне забезпечення лабораторій відділу також є достатньо розвинутим і дозволяє виконувати визначення вмісту радіонуклідів широкого спектру. у пробах природного середовища. Для радіоекологічних досліджень використовуються напівпровідникові гамма-спектрометри, а також альфа- і бета-радіометри різного типу (у т.ч УМФ-2000 із спектрометричною платою); рідинно-сцинтиляційні спектрометри Triathlor і TriCarb-2900, які дозволяють вимірювати питому активність альфа- і бета-випромінюючих нуклідів у водному середовищі, зокрема, вміст стронцію-90, радіонуклідів уранторієвих рядів, а також тритію.

Технічні засоби і можливості відділу постійно розвиваються і у поєднанні із високим рівнем кваліфікації і досвідом фахівців дозволяють виконувати широкий спектр наукових завдань в рамках основної діяльності у складі ДСНС і НАНУ (розвиток, методичне забезпечення і дослідження за напрямком моніторинг навколишнього природного середовища), а також вивчення інших наукових і прикладних проблем радіоактивності у довкіллі для різних ситуацій опромінення і на об'єктах радіаційної спадщини.

## ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПУБЛІКАЦІЙ СПІВРОБІТНИКІВ ВІДДІЛУ РАДІАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА

1. Voitsekhovich, O.V., Borzilov V.A., Konoplyov, A.V. Hydrological aspects of Radionuclide Migration in Water Bodies Following the Chernobyl Accident. Proceedings of Seminar on Comparative Assessment of the Environmental Impact of Radionuclides Released during Three Major Nuclear Accidents: Kyshtym, Windscale, Chernobyl. CEC, RP-53, EUR-13574, 1991. P. 528–548.
2. Demchuk V.V. Voitsekhovich O.V., Kashparov V.A., Viktorova N.V., Laptev G.V. — Analysis of Chernobyl Fuel Particles and their Migration Characteristics in Water and Soil. Proceedings of Seminar on Comparative Assessment of the Environmental Impact of Radionuclides Released during Three Major Nuclear Accidents: Kyshtym, Windscale, Chernobyl. CEC, RP 53, EUR-13574, 1991. P. 493–513.
3. Лаптев Г.В., Войцехович О.В. Экспериментальные исследования вымывания радионуклидов из пойменных почв Припяти в условиях их затопления. *Труды УкрНИГМИ*. 1993. Вып. 245. С. 127–143.
4. Войцехович О.В., Канивец В.В., Лаптев Г.В. Анализ формирования радиоактивного загрязнения Днепровской водной системы в течение пяти лет после Чернобыльской аварии. *Труды УкрНИГМИ*. 1993. Вып. 245. С. 106–125.
5. Voitsekhovitch O., Sansone U., Zheleznyak M., Bugai D. Water quality management of contaminated areas and its effect on doses from aquatic pathways. In: The radiological consequences of Chernobyl accident. Proceedings of the first international conference. Minsk, Belarus 18–22 March, 1996 EC. Luxembourg, 1996. P. 401–410.
6. Канивец В.В. Анализ основных тенденций развития радиационной обстановки в Днепровской водной системе после Чернобыльской аварии. *Вісник аграрної науки*. 1996. № 4. С. 40–56.
7. Umberto Sansone, Maria Belli, Oleg Voitsekhovitch, Vladimir Kanivets. <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*. 1996. Vol. 186. № 3. P. 257–271.
8. Войцехович О.В., Канивец В.В., Лаптев Г.В. и др. Радиоэкология водных объектов зоны влияния аварии на Чернобыльской АЭС. Том 1. Мониторинг радиоактивного загрязнения природных вод Украины. К.: Чернобыльинтеринформ, 1997. 308 с.
9. Войцехович О.В. Развитие и перспективы водоохранной деятельности в зоне отчуждения ЧАЭС *Бюллетень экологического состояния зоны отчуждения*. 1997. № 4 (9). С. 36–45.
10. Пирнач Л.С., Лаптев Г.В. Исследование влияния свойств компонентов водно-грунтовой системы на процессы адсорбции-десорбции <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr в совместном присутствии на иллите. *Труды УкрНИГМИ*. 1998. Вып. 246. С. 119–132.
11. Войцехович О.В., Панасевич Э.Л. Про дозову и соціально-економічну цілесобразність сучасної водоохрної діяльності в зоні отчуждения ЧАЭС. *Бюллетень екологічного станяння зони отчуждения*. № 12. 1998. С. 3–8.
12. Войцехович О.В. и др. Радиоэкология водных объектов зоны влияния аварии на Чернобыльской АЭС. Том 2. Прогнозы загрязнения вод, оценки рисков водопользования и эффективности водоохраных контрмер для водных экосистем зоны влияния Чернобыльской аварии. К.: Чернобыльинтеринформ, 1998. 277 с.
13. Viktorova N., Voitsekhovitch O., Sorochinski B., Vandenhove H. Phytoremediation of Chernobyl Contaminated lands. *Radiation Protection Dosimetry*. 1999. Vol. 92. № 1–3. P. 59–64.
14. Войцехович О.В. Управление качеством поверхностных вод в зоне влияния аварии на Чернобыльской АЭС. К.: Віпол, 2001. 136 с.
15. Войцехович О.В., Шестопапов В.М., Скальский А.С., Канивец В.В. Мониторинг радиоактивного загрязнения поверхностных и подземных вод после аварии на ЧАЭС. К.: Віпол, 2001. 147 с.
16. Канивец В.В., Войцехович О.В. Радиоактивное загрязнение донных отложений водоема-охладителя Чернобыльской АЭС. *Труды УкрНИГМИ*. 2000. Вып. 248. С. 154–171.
17. Voitsekhovitch O., Kanivets V. Maps of Cs-137 in the bottom sediments of the Dnieper reservoirs. Ukrainian Hydrometeorological Institute. 1997
18. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Radiation Condition in the Dnieper River Basin (contributors: Voitsekhovitch O., Kanivets V, Laptev G. and other). 2006.
19. Kanivets V, Derkach G. <sup>137</sup>Cs in the Water and Suspended Matter of the Ukrainian Section of the Danube River. *Hydrobiological Journal*. 2012. 48 (2).
20. Galas C., Sansone U., Belli M., Barbizzi S., Fanzutti G.P., Kanivets V. and O.V. Voitsekhovitch. Freshwater suspended particles: An intercomparison of long-term integrating sampling systems used for environmental radioactivity monitoring. 2006. Vol. 267. № 3. P. 623–629.
21. Comans R., Hilton J., Voitsekhovitch O., Laptev G., Popov V., Madruga M., Bulgakov A. et al. A comparative study of radiocesium mobility measurements in soils and sediments from the catchment of a small upland oligotrophic lake (Devon Water, UK). *Water Research*. 1998. Vol. 32. № 9. P. 2846–2855.
22. Kanivets V. Voitsekhovitch O., Khristchuk B.. Riverine transport of Cs-137 and Sr-90 into the Black Sea after Chernobyl accident (data analysis and methodological aspects of monitoring). Proc. of Symposium Marine Pollution. IAEA, 1999. P. 44–52.
23. Kanivets V. Voitsekhovitch O. et al. The post-Chernobyl budget of Cs-137 and Sr-90 in the Black Sea. *Journal of Environmental Radioactivity*. 1999. Vol. 43. P. 121–135.
24. Sansone U. and O. Voitsekhovych (editors). Modelling and Study of the Mechanisms of the Transfer of Radioactive Material from Terrestrial Ecosystems to and in Water Bodies around Chernobyl: International Scientific Collaboration on the Consequences of the Chernobyl Accident (ECP-3 Final Report) EUR16529 EN. European Commission, 1996.
25. Kanivets V.V., Voitsekhovich O.V. Effects of half lives in Ukrainian Rivers / In: Smith J.J (editor) "AQUASCOPE" project Final Report. Centre for Ecology and Hydrology. Dorset. UK. 2002. 116 p.
26. Пирнач Л.С., Лаптев Г.В. Экспериментальное исследование долговременной кинетики адсорбции-десорбции Cs-137 почвами и донными отложениями. *Труды УкрНИГМИ*. 2001. Вып. 249. С. 198–210.
27. Smith J.T., Voitsekhovitch O.V., Håkanson L., Hilton J. A critical review of measures to reduce radioactive doses from drinking water and consumption of freshwater foodstuffs. *Journal of environmental radioactivity*. 2001. Vol. 56. № 1–2. P. 11–32.
28. Onishi Y., Voitsekhovich O., Zheleznyak M. Chernobyl: What Have We Learned ? The Successes and Failures to Mitigate Water Contamination over 20 Years. Springer, 2007. 360 p.

29. Konoplev A.V., Deville-Cavelin G., Voitsekhovich O.V. and O.M. Zhukova. Transfer of Chernobyl  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  by surface run-off. Radioprotection-Colloques 37 C1. 2002. P. 315–318.
30. French-German Initiative for Chernobyl. Radioecology Project Synthesis Report. Sub-project/ Radionuclide transfer by surface Runoff (SP3c) and Sub-project: Radionuclide transfer in aquatic environment (SP 3d). Contributors (Voitsekhovich O., Kanivets V., Todosienko S. 2001.
31. Laptev G.V., Votsekhovitch O.V., Kostezh A.B. and I. Osvath. Reading records of artificial radionuclide fluxes in abyssal sediment of the Black sea using Pb-210 dating chronology. International Conference on Radioactivity in the Environment. 1–5 September 2002, Monaco 2002.
32. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Marine Environment Assessment of the Black Sea Final Report Technical Cooperation Project RER /2/003 IAEA/2003 (contributors G. Laptev, V. Kanivets, O. Voitsekhovich)
33. Laptev G.V., Voitsekhovich O.V., Kostezh A.B., Osvath I. Mass Accumulation Rates and Fallout Radionuclides  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{241}\text{Am}$  Inventories Determined in Radiometrically Dated Abyssal Sediments of the Black Sea. Isotope in Environment Studies. IAEA Aquatic Forum 2004.
34. Smith J., Voitsekhovich O., Konoplev F., Kudelskiy F. Radioactivity in aquatic system. In. Chernobyl Catastrophe and Consequences. Springer. 2005. P. 139–181.
35. Сербін П., Куртач Е., Канівець В., Войцехович О., Аксюк О., Деркач Г., Христюк Б. Порівняльне дослідження методів радіаційного моніторингу поверхневих вод. Збірник доповідей Другої Всеукраїнської наукової конференції "Гідрологія, гідрохімія та гідроекологія", 24–26.11.2003, Наукові Праці УкрНДГМІ, 2003.
36. Воцехович О.В., Канівець В.В. Методичні рекомендації для ведення спостережень за радіоактивним забрудненням навколишнього природного середовища К. 2001. 218 с.
37. Laptev G.V.  $^{226}\text{Ra}$  disequilibrium in the Black Sea in the last 50 years: Proxy for implication of climate change and increased eutrophication. In: 1<sup>st</sup> Biannual Scientific Conference: Black Sea Ecosystem 2005 and Beyond, 8-10 May 2006, Istanbul, Turkey [http://www.blacksea-commission.org/\\_publ-1BSCConf.asp](http://www.blacksea-commission.org/_publ-1BSCConf.asp)
38. Лаптев Г.В., Костез А.Б., Грищенко В.Ф. О датировании антарктического льда по содержанию  $^{210}\text{Pb}$ . Труды УкрГМИ. Вып. 247. 1999. С. 207–216.
39. Voitsekhovich O.V., Lavrova T.V., Soroka Y.N. "Uranium Mining and Ore Processing in Ukraine and its Radioecological Effects on to the Dnieper River Water Ecosystem and Human Health" Aquatic Forum-2004.
40. Voitsekhovich O.V., Lavrova T.V. Remediation Planning of Uranium Mining and Milling Facilities: The Pridneprovsky Chemical Plant Complex in Ukraine // In Remediation of Contaminated Environments (2009). P. 343–356.
41. Костез А.Б., Лаврова Т.В. Прикладная ядерная спектрометрия радионуклидов уран-ториевых рядов в пробах окружающей среды. Часть 1 К.: УкрНИГМИ, ЗАО "Випол", 2011. 212 с.
42. Jackubik A., Kurylchuck M., Voitsekhovich O., Waggitt P., "Monitoring and remediation of the legacy sites of uranium mining in Central Asia" / In: Uranium Mining and Hydrogeology. 2008. P. 389–404.
43. Voitsekhovich O., Lavrova T. Case Studies. Uranium Legacy sites in Central Asia and Ukraine. Chapter 9 / In: The Environment behavior of Uranium. IAEA. Vienna, 2021. P. 201–210.
44. Войцехович О.В. Приднепровский химический завод — масштабы бедствия и перспективы приведения площадки уранового наследия ("ПХЗ") в безопасное состояние // веб-сайта "Uatom.org" 2017.
45. Voitsekhovich O., Lavrova T., "Remediation Strategy for Former PChP Uranium Production Site in Ukraine". Proc. 44<sup>th</sup> Annual Waste Management Conference (WM2018), Phoenix, Arizona (2018).
46. Voitsekhovich O., Lavrova T. Optimizing monitoring of legacy Uranium processing site. Journal. Nuclear Engineering International. February 2012. [www.neimagazine.com](http://www.neimagazine.com).
47. Korychenskiy K.O., Laptev G.V., Lavrova T.V., Dyvak T.I. Speciation and mobility of uranium in tailings materials at the U-production legacy site in Ukraine. Journal. Nuclear Physics and Energy. *Radiobiology and Radioecology*. 2018. № 19 (3). P. 270–279.
48. Лаврова Т.В. Методичні засади моніторингу природного середовища на об'єктах спадщини уранового виробництва. Автореферат дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеню кандидат географічних наук. УкрГМІ. 2021.
49. Войцехович О., Канівець В., Лаптев Г., Кіреєв С., Обрізан С. Стан радіоактивного забруднення поверхневих вод Збірник доповідей "30 років Чорнобильської катастрофи" / В: 30 років Чорнобильської катастрофи. Огляди. Збірник інформаційно-аналітичних доповідей. Publisher: К.: КІМ., <http://www.chornobyl.net/збірник-30-рок> Project: Chernobyl 2016
50. Войцехович О.В., Грій В.А. Сучасний стан і перспективи розвитку загальнодержавної мережі радіаційного моніторингу природного середовища. *Праці Центральної геофізичної обсерваторії*. Вип. 17 (31). 2021. С. 70–82.
51. Процак В.П., Войцехович О.В., Лаптев Г.В. Оцінка динаміки виносу радіонуклідів за межі зони відчуження повітряним шляхом за період пожеж 02-20.04. 2020 рр. Український гідрометеорологічний інститут м. Київ: <https://uhmi.org.ua/msg/fire2020/analytical.pdf>, 2020
52. Masson O., Romanenko O., Saunier O., Kirieiev S., Protsak V., Laptev G., Voitsekhovich O. et al. "Europe-wide atmospheric radionuclide dispersion by unprecedented wildfires in the Chernobyl Exclusion Zone, April 2020". Journal: Environmental Science & Technology. 2021.
53. Konoplev, A., V. Golosov, G.Laptev, K. Nanba, Y. Onda, et al. Behavior of accidentally released radiocesium in soil-water environment: Looking at Fukushima from a Chernobyl perspective. *Journal of environmental radioactivity*. 2016. № 151. P. 568–578.
54. Igarashi Y., Onda Y., Wakiyama Y., Konoplev A., Zheleznyak M., Lisovyi H., Laptev G. et al. Impact of wildfire on  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  wash-off in heavily contaminated forests in the Chernobyl exclusion zone. *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 259.
55. Konoplev, A., Kanivets, V., Zhukova, O., Germenchuk, M., Derkach, G. Mid- to long-term radiocesium wash-off from contaminated catchments at Chernobyl and Fukushima. *Water Research*. 2021. Vol. 188. 116514. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135420310496>
56. Konoplev A., Wakiyama Y., Wada T., Udy C., Kanivets V. Radiocesium distribution and mid-term dynamics in the ponds of the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant exclusion zone in 2015–2019. *Chemosphere*, 2021. Vol 265. 12 p.
57. Konoplev A., Kanivets V., Zhukova O., Germenchuk M., Derkach G. Semi-Empirical Diffusional Model of Radionuclide Wash-Off from Contaminated Watersheds and Its Testing Using Monitoring Data for Fukushima and Chernobyl Rivers. *Geochemistry International*. 2021. 59 (6). P. 607–617.
58. IAEA-TECDOC-1886: Environmental Impact Assessment of the Drawdown of the Chernobyl NPP Cooling Pond as a Basis for



- Its Decommissioning and Remediation 2019 (contributors: V. Kanivets, G. Laptev, V. Protsak, O. Voitsekhovych. <https://www.iaea.org/publications/13595/environmental-impact-assessment-of-the-drawdown-of-the-chernobyl-npp-cooling-pond-as-a-basis-for-its-decommissioning-and-remediation>
59. Kanivets V., Laptev G., Konoplev A., Lisovyi H., Derkach G., Voitsekhovych O. Distribution and dynamics of radionuclides in the Chernobyl Cooling Pond. In: Behavior of Radionuclides in the Environment. Vol. II. P. 349–405.
  60. Konoplev A., Kanivets V., Laptev G., Voitsekhovich O., Zhukova O. Long-Term Dynamics of the Chernobyl-Derived Radionuclides in Rivers and Lakes. In: Behavior of Radionuclides in the Environment. Vol. II. 2020. P. 323–348.
  61. Konoplev A., Laptev G., Igarashi Y., Nanba K. Vertical distributions of Chernobyl-derived  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{241}\text{Am}$  in bottom sediments of water bodies in exclusion zone represent long-term dynamics of water contamination. In: Proc. International Conference on Environmental Radioactivity. 2019.
  62. Bezhenar R., Zheleznyak M., Gudkov D., Kanivets V., Laptev G., Protsak V.. Model & data based assessment of the impacts of drawdown of the Chornobyl NPP Cooling Pond on the Cs-137 concentrations in water, sediments and biota. EGU General Assembly Conference 2021.
  63. Канівець В.В., Аксюк О.М., Скуднава Л.В. Настанова гідрометеорологічним станціям і постамам Вип.12. Спостереження за радіоактивним забрудненням навколишнього середовища. Част. 2. Спостереження за радіоактивним забрудненням поверхневих во суші і моря. Держгідромет України. 2010 143 с.
  64. Пірнач Л.С. Лаптев Г.В., Дивак Т.І. Визначення активності  $^{90}\text{Sr}$  у воді шляхом прямого вимірювання рідино-сцинтиляційним лічильником. *Ядерна фізика та енергетика*. 2015. Т. 16. № 2. С. 177–182/
  65. Пірнач Л.С, Дивак Т.І, Лаптев Г.В. Збірка методик прискореного визначення стронцію-90 у пробах природного середовища. Український гідрометеорологічний інститут. 2020/ 81 с.
  66. Лаврова Т.В. Методичні рекомендації щодо визначення сумарної альфа-та бета-активності у водному середовищі рідинно-сцинтиляційним методом Український гідрометеорологічний інститут. 2021/ 43 с.
  67. Войцехович О.В., Лаврова Т.В, Кориченський К.О Моніторинг і технічний нагляд на майданчиках і об'єктах спадщини уранового виробництва. (Керівництво). 2018. 68 с.

