

ОСОБЛИВОСТІ МІГРАЦІЇ ТЕХНОГЕННИХ РАДІОНУКЛІДІВ У ҐРУНТОВО-РОСЛИННИХ КОМПЛЕКСАХ БЛИЖНЬОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ ЧАЕС

Досліджено сучасний стан радіоактивного забруднення території ближньої зони ЧАЕС, оцінено розподіл радіонуклідів по профілю ґрунту. Експериментально доведено, що основний уміст радіонуклідів сконцентрований в кореневмісному горизонті ґрунту. Встановлено, що швидкість міграції радіонуклідів на зволжених ґрунтах значно вища, ніж в ґрунтах з помірним зволоженням. Оцінені коефіцієнти накопичення радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr рослинністю та грибами.

Ключові слова: радіонукліди, міграція, чорнобильська зона відчуження, радіоактивне забруднення.

Изучено современное состояние радиоактивного загрязнения территории ближней зоны ЧАЭС, оценено распределение радионуклидов по профилю почвы. Экспериментально установлено, что основное содержание радионуклидов сконцентрировано в коренеобитаемом слое почвы. Установлено, что скорость миграции радионуклидов во влажных почвах значительно выше, чем в умеренно увлажненных. Оценены коэффициенты накопления радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr растительностью и грибами.

Ключевые слова: радионуклиды, миграция, чернобыльская зона отчуждения, радиоактивное загрязнение.

Modern state of radioactive contamination near Chernobyl zone (Yaniv) was studied. Distributions of radionuclides in soil profile are estimated. It is experimentally proved that the main content of radionuclides is concentrated in root – forming soil horizon. Distribution of radionuclides in soil profile is confirmed. It is established that the rate of migration of radionuclides in wet soils is much higher than in soils with moderate moisture. Coefficients of radionuclides accumulation of ^{137}Cs and ^{90}Sr by plants and mushrooms are estimated.

Key words: radionuclide, migration, Chernobyl exclusion zone, radioactive contamination.

Характерною особливістю аварійного викиду на ЧАЕС було надходження до наземних екосистем прилеглих територій радіонуклідів у різних фізико-хімічних формах. Радіоактивне забруднення території, що сформувалося внаслідок аварії на ЧАЕС, за щільністю забруднення має надзвичайно плямистий характер. Це пов'язано зі складними фізико-хімічними процесами, що відбувались в аварійному реакторі, що обумовило складний характер розсіювання радіоактивних елементів та їх сполук у навколишньому середовищі [1; 2].

У складі радіоактивних випадінь виділяють два основні компоненти: паливний та конденсаційний. У ближній Чорнобильській зоні відчуження випала основна кількість паливного компонента у вигляді «гарячих» частинок, переважно в нерозчинній формі [3; 4]. Важливими факторами, що впливають на мобільність радіонуклідів у ґрунті на паливних слідах випадінь є ступінь фізико-хімічного трансформування матриці паливних частинок, ґрунтово-рослинний покрив території, що впливає як на інтенсивність трансформу-

вання паливних часток, так і на перенесення різних форм радіонуклідів у ґрунтового профілі.

Уповдовж усього післяаварійного періоду фаховими науковими підрозділами проведено ряд фундаментальних досліджень, присвячених дослідженню міграції радіонуклідів та моделюванню їх обігу в екосистемах [5-10], продовження таких досліджень і сьогодні залишається актуальним завданням. Це пов'язано з необхідністю отримання нової наукової інформації стосовно міграції техногенних радіонуклідів у ґрунтово-рослинних комплексах на слідах паливних випадінь у віддалений післяаварійний період для перевірки існуючих та розробки нових математичних моделей прогнозування радіоактивного забруднення територій. Важливим полігоном для досліджень процесів міграції радіонуклідів та апробації моделей прогнозування являється ближня зона відчуження ЧАЕС.

Мета роботи – дослідити міграцію техногенних радіонуклідів аварійного викиду в ґрунтово-рослинних комплексах ближньої зони відчуження ЧАЕС у віддалений післяаварійний період.

Матеріали та методи. Комплексні радіоекологічні дослідження виконані на дослідному полігоні ближньої ЗВ ЧАЕС у 2012 р., на територіях із різним рельєфом та ступенем зволоження ґрунтів. Для досліджень відбирались ділянки, найбільш типові для даної місцевості. В місцях відбору проб вимірювали потужність експозиційної дози γ -випромінювання. Характер і величину вертикальної міграції радіонуклідів у ґрунтовому профілі досліджували пошарово 0-2 см, 2-4 см, 4-7см, 7-10 см, 10-15 см, 15-20 см, 25-30 см. Ґрунт відбирали методом конверту за допомогою розбірного пробовідбирача. Оцінювали щільність радіоактивного забруднення території та ізотопний склад випадінь. Рослинні зразки та гриби відбирали на місці відбору індивідуальних проб ґрунту на виділеній ділянці [11]. Після

стандартної лабораторної підготовки зразків ґрунту, рослинності та грибів проводили їх γ - та β -спектрометрію.

Вимірювання проводились на γ -спектрометрі CANBERA та β -спектрометрі «СЕБ-50». Обробку спектрів здійснювали за допомогою програми WINSPECTRUM та модифікованої програми «Beta fit» [12]. Калібрування спектрометрів проводили як за енергією, так і за ефективністю з використанням сертифікованих еталонних джерел із об'ємними характеристиками, близькими до експериментальних зразків. Похибка вимірювання значень активностей γ -випромінювання не перевищувала 5-7 %, а β – 15-20 %.

У табл. 1. представлено об'єкти, у яких визначали вміст техногенних радіонуклідів.

Таблиця 1

Об'єкти досліджень

Об'єкт	Вид
трави	Carex (L.) Осока
	Stipa (L.) Ковила
мох	Polýtrichum commune (L.) Зозулин льон
кущі	Calluna vulgaris (L.) Верес
хвойні дерева	Pinus silvestris (L.) Сосна звичайна
гриби	Tricholoma terreum L. ex Fr – Рядовка наземна
	Tricholomopsis rutilans L. ex Fr – Рядовка червоніюча
	Boletus badius Fr. – Польський гриб
	Suillus luteus L. ex Fr. – Маслюк звичайний
	Suillus granulatus L. ex Fr. – Маслюк зернистий
ґрунт	0-30 см (пошарово)
підстилка	тришарова, потужність (4,9±0,81 см)

Біодоступність радіонуклідів (КН) на ділянках оцінювали як відношення питомої активності радіонукліда в рослині, чи в грибі до питомої активності в ґрунті.

Результати досліджень. Територія дослідного полігону Янів знаходиться на відстані ~ 3 км від аварійного енергоблоку ЧАЕС, межує зі сосновим лісом («Рудий ліс»). На полігоні переважають дерново-слабопідзолисті піщані та супіщані ґрунти. Місцями зустрічались заболочені зниження. Кислотність ґрунтів на реперних ділянках була рН=4,5-6,0. Травостій на пониженнях – густий, в основному осоковий. На сухих місцях переважала бідна злакова рослинність.

У результаті дозиметричного обстеження дослідного полігону було виявлено територіальну нерівномірність забруднення радіоактивними викидами, що обумовлено конденсаційним та паливним компонентами аварійного викиду, нерівномірний (плямистий) розподіл радіонуклідів. Потужність експозиційної дози γ - випромінювання була в межах від 600 до 5000 мкР/год. Діапазон щільностей забруднення території дослідницького полігону: ^{137}Cs – 13÷62 МБк/м²; ^{90}Sr – 2,7÷15,6 МБк/м²; ^{241}Am – 0,5÷1,6 МБк/м².

На сучасному етапі ^{137}Cs і ^{90}Sr являються основними випромінювачами, що формують радіоактивність

ґрунту, вклад інших радіонуклідів був незначний. Значення концентрацій радіонуклідів у ґрунті на дослідному полігоні в різних точках відбору суттєво відрізнялись. В таблиці 2 представлено дані питомої активності верхнього шару ґрунту (0-2 см) з різних ділянок дослідного полігону.

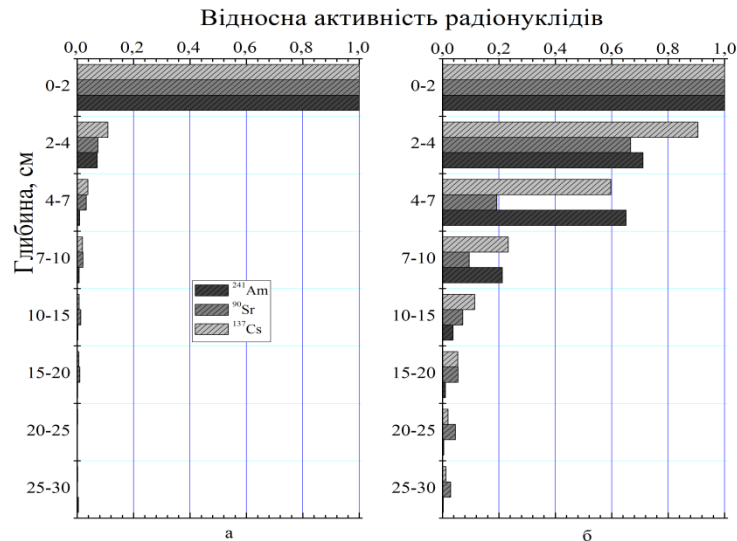
Таблиця 2

Питома активність верхнього шару ґрунту з різних ділянок дослідного полігону

Точка відбору	Питома активність кБк/кг		
	^{137}Cs	^{90}Sr	^{241}Am
1	169 ±8	56±3	4,0±0,2
2	245 ±12	152±8	7,1±0,4
3	319±16	78±4	4,3±0,2
4	436±22	222±11	16,1±0,8
5	447±22	70±4	6,0±0,5
6	1026 ±51	190±10	11,2±0,5

На дослідному полігоні концентрація ^{137}Cs в ґрунті була в 1,5-3 разів більшою, ніж ^{90}Sr .

На рис. 1 представлено вертикальний розподіл радіонуклідів у ґрунтах з різним ступенем зволоження. Експериментальні дані свідчать, що основний вміст радіонуклідів сконцентрований у кореневмісному горизонті ґрунту, що свідчить про низькі темпи вертикальної міграції радіонуклідів.



Динаміка профільної міграції радіонуклідів досить точно описується експоненційною залежністю:

$$A = A_0 \times \exp(-\lambda x),$$

де A_0 – активність радіонукліда у верхньому шарі ґрунту (кБк/кг); A – активність радіонукліда в дослідному шарі ґрунту (кБк/кг); λ – стала, що характеризує міграційну здатність радіонукліда і залежить від фізико-хімічних властивостей радіонукліду та типу ґрунту; x – глибина (см).

Зі збільшенням ступеня зволоження ґрунтів глибина проникнення радіонуклідів суттєво збільшується. Розрахункові оцінки свідчать, що міграційна здатність радіонуклідів на вологих (перезвожених) ґрунтах вища в 1,2-2 рази, порівняно з ґрунтами з помірним зволоженням. Підвищена міграція, імовірно, реалізується внаслідок процесів водної конвекції. З усього розмаїття чинників, які впливають на процеси міграції радіонуклідів у ландшафті, на наш погляд, найбільший вплив чинять властивості ґрунтів і вологозабезпеченість ландшафту.

Проведені дослідження демонструють, що для ^{90}Sr характерна більш інтенсивна міграція по профілю досліджених ґрунтів, ніж для ^{137}Cs . Це вказує на інтенсивні процеси іммобілізації ^{137}Cs у ґрунтово-поглинальному комплексі, на відміну від ^{90}Sr . У [5; 6; 13] також відзначали підвищену міграційну рухливість ^{90}Sr у ґрунтах на слідах паливних випадів ЧАЕС.

Досліджено накопичення радіонуклідів рослинами на даному полігоні. У пробах рослинності зареєстровано наявність ^{40}K , ^{137}Cs та ^{90}Sr . Як свідчать результати вимірювань, у представників трав'яного та кущового ярусів уміст ^{137}Cs знаходився в межах 170-730 кБк/кг, а активність ^{90}Sr змінювалась від 121 до 283 кБк/кг (табл. 3).

Таблиця 3

Питома активність рослин із дослідних ділянок полігону

Вид	Питома активність, кБк/кг	
	^{137}Cs	^{90}Sr
<i>Stipa</i> (L.)	283 ± 10	121 ± 17
<i>Carex</i> (L.)	169 ± 7	114 ± 15
<i>Calluna vulgaris</i> (L.)	731 ± 35	131 ± 22
<i>Polýtrichum commune</i> (L.)	693 ± 29	283 ± 37

У *Calluna vulgaris* (L.) у пробах надземної фітомаси реєстрували високі концентрації радіонуклідів ^{90}Sr та ^{137}Cs . Це може бути обумовлено тим, що коріння

вересу тісно оплетене мікоризою, яка покращує доступ поживних речовин/радіонуклідів із радіаційнозабрудненого ґрунту. Гриби інтенсифікують надходження радіонуклідів у складі поживних речовин до вищих рослин, які знаходяться в симбіозі з грибами. Виявлено відмінності в накопиченні радіонуклідів в органах і тканинах вересу, уміст ^{137}Cs та ^{90}Sr зростає в ряду «гілки-листя-пліди».

Для оцінки інтенсивності переходу в системі ґрунт-рослина використовували коефіцієнт накопичення КН – відношення питомої активності радіонукліда в рослині, чи грибі до питомої активності у ґрунті (табл. 4, 5). Показано, що майже всі дослідні рослини накопичують ^{90}Sr більш інтенсивно (КН ^{90}Sr більше в 1, 3-2, 7 рази, ніж ^{137}Cs), винятком є мох (зозулин льон).

Таблиця 4

Коефіцієнти накопичення радіонуклідів різними видами рослин

Вид	КН	
	^{137}Cs	^{90}Sr
<i>Cárex</i> (L.) Осока	0,21	0,58
<i>Stipa</i> (L.) Ковила	0,40	0,55
<i>Polýtrichum commune</i> (L.) Зозулин льон	3,89	1,35
<i>Calluna vulgaris</i> (L.) Верес	0,91	1,37

Найбільший діапазон коливань концентрацій ^{137}Cs відмічали в грибів, уміст в плодових тілах міг змінюватись до 16 разів (табл. 5). Визначено, що рівні накопичення радіонуклідів ^{137}Cs біомасою рослин і грибів неоднакові, у макроміцетів вони в 2-3 рази вищі, ніж у рослин, відібраних на одних і тих же ділянках. Виявлено прямопропорційну залежність рівня накопичення радіонуклідів у надземній фітомасі від їх вмісту в ґрунті. Міжвидові відмінності середніх значень коефіцієнта переходу в макроміцетів різняться до 10 разів.

Таблиця 5

Питома активність та коефіцієнти накопичення ^{137}Cs у грибах

Вид	Питома активність, кБк/кг	КН
<i>Tricholoma terreum</i> L. ex Fr.	885 ± 44	1,9
<i>Tricholomopsis rutilans</i> L. ex Fr.	4845 ± 250	5,3
<i>Boletus badius</i> L. Fr.	8501 ± 400	9,4
<i>Suillus luteus</i> L. ex Fr.	14765 ± 750	16,4
<i>Suillus granulatus</i> L. ex Fr.	4054 ± 220	21,6

По рівню зростання КН ^{137}Cs біооб'єкти складають ряд: гриби >мох>верес>ковила> осока, а ^{90}Sr – верес>мох>осока>ковила. Отже, накопичення радіонуклідів, в основному, залежить від дії двох факторів – інтенсивності міграції радіонуклідів у ґрунті та здатності поглинання радіоактивного елемента даним видом рослин.

Досліджено розподіл радіонуклідів по органах і тканинах сосни звичайної, яка зростає на сухому едатопі (табл. 6). Радіоактивне забруднення дерев на даний час, в основному, зумовлене надходженням радіонуклідів кореневим шляхом. Величина вмісту радіонуклідів, у першу чергу, залежить від радіоактивного забруднення верхніх шарів ґрунту в зоні знаходження всмоктувальних коренів дерева. Основна маса цих коренів знаходиться на глибині 11-33 см [14]. Експериментальні дані свідчать, що серед дослідних зразків найвищі концентрації радіонуклідів реєстрували у хвої, найменші – в плодах та корі. Відмічено збільшення радіоактивного забруднення кори при збільшенні висоти її відбору по стовбуру дерева.

Таблиця 6

Концентрація ^{137}Cs та ^{90}Sr в органах і тканинах сосни звичайної

Зразок	Питома активність (кБк/кг)	
	^{137}Cs	^{90}Sr
Гілки	25±3	30±7
Хвоя	40±5	43±9
Шишка	15±3	4±2
Кора h=0,2м	8±2	15±5
Кора h=2м	17±3	14±5

h- висота відбору

Як свідчать результати наших досліджень, ^{90}Sr більш інтенсивно накопичується рослинами, ніж ^{137}Cs . Динаміка забруднення рослинності, у першу чергу, визначається кінетикою розчинення паливних частинок, що обумовлює зміни мобільного радіостронція в кореневому шарі ґрунту. Це зумовлено тим, що за роки після аварії на територіях із паливним компонентом випадіння рухливість і біологічна доступність ^{90}Sr значно зросла за рахунок процесів деструкції та

вилуговування паливних частинок, у яких радіонукліди були депоновані під час випадіння.

Відомо [14-16], що грибний міцелій та підстилка відіграють суттєву роль в утриманні радіонуклідів в органічному шарі лісового ґрунту і є суттєвим джерелом мобільних форм ^{90}Sr у кореневмісному горизонті ґрунту за рахунок її мінералізації. Нами досліджено вміст радіонуклідів у лісовій підстилці, активність підстилки в різних місцях відбору була в межах 474-790 кБк/кг (^{137}Cs), а активність ^{90}Sr змінювалась від 400 до 600 кБк/кг. Слід зазначити, що активність лісової підстилки перевищувала активність ґрунту в 1,5 до 4,0 разів. Це, ймовірно, обумовлює тривале утримання радіонуклідів у поверхневих шарах ґрунту і сприяє низьким темпам їх глибинної міграції.

В результаті проведених досліджень встановлено:

- сучасний стан радіоактивного забруднення території близької зони ЧАЕС (Янів), виявлено територіальну нерівномірність забруднення дослідних ділянок радіоактивними викидами;

- міграційна здатність радіонуклідів на зволжених ґрунтах вища в 1, 2-2 рази, у порівняно з ґрунтами з помірним зволоженням;

- ^{90}Sr інтенсивно накопичується рослинами; за рівнем зростання КН ^{137}Cs біооб'єкти складають ряд: гриби>мох>верес>ковила> осока, а КН ^{90}Sr – верес>мох>осока>ковила.

- радіоактивність лісової підстилки значно перевищує активність ґрунту, що сприяє утриманню радіонуклідів в органічному шарі ґрунту.

- інтенсивність переходу радіонуклідів із ґрунту в рослинність залежить від сукупності факторів, серед яких: форма радіоактивних випадіння, властивості ґрунтово-поглинального комплексу ґрунтів, рН ґрунту, уміст вологи, метеорологічні умови, видові особливості рослин та інші.

Представлені в роботі дані можуть бути використані для оцінки та прогнозування змін радіоекологічної ситуації в 30-км зоні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Chernobyl Catastrophe / Baryakhtar V. G. – Kyiv : Export Publishing House. – 1997. – 572 p.
2. 20 лет Чернобыльской катастрофы. Взгляд в будущее // Национальный доклад Украины. – К. : Аттика. – 2006. – 224 с.
3. Кашпаров В. А. Радиоэкологическая значимость топливной компоненты чернобыльских радиоактивных выпадений / В. А. Кашпаров // Проблемы чернобыльской зоны відчуження. – 2009. – Вып. 9. – С. 5–22
4. Бондаренко Г. Н. Особенности вертикальной миграции радионуклидов топливных и конденсационных выпадений в почвах / Г. Н. Бондаренко, Л. В. Кононенко / Радиоизотопы в экологических исследованиях. – Киев: Нукова думка. – 1992. – С. 17–28.
5. Иванов Ю. А. Подвижность радионуклидов выброса ЧАЭС в почвах отчужденных территорий / Ю. А. Иванов, С. Е. Левчук, С. И. Киреев [и др.] // Ядерная физика та енергетика. – 2011. – Т. 12. – № 4. – С. 375–384.
6. Желтоножская М. В. Исследование вертикальной миграции радионуклидов на территории полигона «Рыжий лес» / М. В. Желтоножская, Н. В. Кулич, А. И. Липская, Л. В. Садовников // Ядерная физика та енергетика. 2011. – Т. 12. – С. 394–399.
7. Джепо С. П. Полигонные исследования миграции радионуклидов на участке пункта временной локализации радиоактивных отходов «Рыжий лес» ЧАЭС / С. П. Джепо, А. С. Скальский, Д. А. Бугай [и др.] // Проблемы Чернобыльской зоны відчуження. – 1995. – Вып. 2. – С. 77–84.
8. Силантьев А. Н. Вертикальная миграция в почве радионуклидов, выпавших в результате аварии на Чернобыльской АЭС / А. Н. Силантьев, И. Г. Шкуратов, И. И. Бобовникова // Атом. энер. – 1989. – Т. 66. – Вып. 3. – С. 194–197.
9. Prister B. S. Experimental Substantiation and Parameterization of Model Describing ^{137}Cs and ^{90}Sr Behavior in a Soil-Plant System / B. S. Prister, V. G. Baryakhtar, L. V. Perepelyatnikova [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. –2003. – Special Issue 1. – P. 126–136.
10. Яковець І. І. Прогнозування поведінки ^{137}Cs у лісових екосистемах інструментами математичного моделювання / І. І. Яковець, Л. А. Прокопенко, Л. А. Райчук // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2009. – Вып. 134. – Ч. 1. – С. 214–222
11. Методика відбору ґрунтових і рослинних проб для визначення в них вмісту радіоактивних речовин. – К. : МінАПК. УкрНДІСТР. – 1987. – 48 с.

12. Желтоножская М. В. Новые методические подходы к одновременному измерению активности ^{90}Sr и ^{137}Cs в объектах окружающей среды / М. В. Желтоножская, Н. В. Кулич, А. И. Липская, В. И. Николаев, Н. В. Стрельчук // Ядерная физика та енергетика. – 2012. – Т. 13. – № 4. – С. 403–408
13. Kashparov V. A. Soil contamination with ^{90}Sr mobility in the Chernobyl accident // V. A. Kashparov, S. V. Lundin, Yu. V. Khomutinin [et.al.] / Journal of Environment Radioactivity. – 2001. – Vol. 56. – No 3. – P. 285 – 298.
14. Краснов В. П. Прикладная радиэкология леса / В. П. Краснов, А. А. Орлов, В. А. Бузун, В. П. Ландин, З. М. Шелест – Житомир : Полисса. – 2007. – 679 с.
15. Щеглов А. И. Роль лесных экосистем при радиоактивном загрязнении / А. И. Щеглов, О. Б. Цветнова // Природа. Чернобыль и проблемы радиобиологии. – 2001. – № 4. – С. 23–32.
16. Иванов Ю. А. Анализ факторов, определяющих долговременную динамику миграции радионуклидов в почвенно-растительном покрове / Ю. А. Иванов // Проблеми чорнобильської зони відчуження 2009. – № 9. – С. 23–39.

Рецензенти: **Кутлахмедов Ю. О.**, д.б.н., професор Інституту клітинної біології та генетичної інженерії НАН України (м. Київ).

Петрук В. Г., д.х.н., професор Вінницького національного технічного університету (м. Вінниця).

© Липська А. І., Желтоножський В. О., Николаев В. І.,

Шитюк В. А., Кулич Н. В., 2013

Дата надходження статті до редколегії 10.04.2013 р.

ЛИПСЬКА Алла Іванівна – д.б.н., завідувач відділом радіобіології і радіоекології Інституту ядерних досліджень Національної академії наук України, м. Київ.

Коло наукових інтересів: радіобіологія, радіоекологія.

ЖЕЛТОНОЖСЬКИЙ Віктор Олександрович – д.ф.-м.н., провідний науковий співробітник відділу структури ядра Інституту ядерних досліджень Національної академії наук України, м. Київ.

Коло наукових інтересів: ядерна спектроскопія, ізомерні співвідношення, радіоекологія.

НИКОЛАЄВ Володимир Іванович – науковий співробітник відділу радіобіології і радіоекології Інституту ядерних досліджень Національної академії наук України, м. Київ.

Коло наукових інтересів: радіоекологія.

ШИТЮК Віталій Анатолійович – головний інженер відділу радіобіології і радіоекології Інституту ядерних досліджень Національної академії наук України, м. Київ.

Коло наукових інтересів: інструментальні методи ядерної спектрометрії, радіоекологія.

КУЛІЧ Надія Владиславівна – науковий співробітник відділу структури ядра Інституту ядерних досліджень Національної академії наук України, м. Київ.

Коло наукових інтересів: радіоекологія.