

Ю. В. Хомутінін, Ю. О. Іванов, В. К. Кириченко

*Український науково-дослідний інститут сільськогосподарської радіології
Національного університету біоресурсів і природокористування України, Київ*

АЛГОРИТМ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРО РЕАБІЛІТАЦІЮ ЗЕМЕЛЬ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ, ЗАБРУДНЕНИХ ВАЖКИМИ ПРИРОДНИМИ РАДІОНУКЛІДАМИ

Розглянуто питання реабілітації земель сільськогосподарського призначення, забруднених важкими природними радіонуклідами. Запропоновано алгоритм підтримки прийняття рішень про доцільність реабілітації таких земель, який апробовано на базі сільськогосподарських полів і присадибних ділянок, що знаходяться в зоні впливу промайданчика Придніпровського хімічного заводу та його хвостосховищ.

Ключові слова: важкі природні радіонукліди, уран, торій, радій, свинець, полоній, хвостосховища, реабілітація земель.

Вступ

Серед найважливіших джерел природного радіаційного фону особливе місце займають важкі природні радіонукліди (ВПРН). Великі площі (десятки й сотні квадратних кілометрів) з підвищеним природним радіаційним фоном пов'язані з районами виходу на земну поверхню важких пісків, що містять промислові концентрації монациту, збагаченого в основному торієм і продуктами його розпаду. З іншого боку, існують потужні джерела техногенних потоків ВПРН у біосфері - підприємства з видобутку та переробки уранових і торієвих руд, викиди електростанцій на викопному органічному паливі, підприємства з видобутку та переробки фосфорних руд, власне фосфорні добрива тощо.

Забруднення навколишнього середовища в районах розташування урановидобувних підприємств пов'язано з аерозольними викидами цих підприємств, а також з утворенням хвостосховищ (відвалів). В Україні протягом багатьох років функціонують підприємства з видобутку та переробки уранових руд, що призвело до утворення хвостосховищ з високим вмістом ВПРН. Ці підприємства та їхні відвали, як правило, розміщені в районах з розвинутим сільським господарством і є потенційними джерелами забруднення земель сільськогосподарського призначення ВПРН. Значна частина хвостосховищ і могильників радіоактивних відходів, які сформувався в початковий період розвитку атомної промисловості, у даний час не повною мірою відповідають сучасним природоохоронним вимогам.

До 1991 р. в Україні одним із найбільших підприємств із переробки уранових руд був Придніпровський хімічний завод (ПХЗ), розташований у Дніпродзержинську Дніпропетровської області.

За період його роботи з 1949 по 1991 р. на території підприємства та за його межами було утворено дев'ять сховищ відходів уранового виробництва загальною площею 2,68 млн м²: три на території ПХЗ - Західне, Центральний Яр, Південно-східне; шість за межами - Дніпровське (хвостосховище «Д»), «Лантанова фракція», «Сухачівське» (два сховища), База «С», доменна піч ДП № 6. У них накопичено близько 42,2 млн т відходів загальною активністю $3,14 \cdot 10^{15}$ Бк [1, 2]. Іншим значним джерелом забруднення навколишнього середовища ВПРН є підприємства Східного гірничозбагачувального комбінату (СхідГЗК), до складу якого входить гідрометалургійний завод (ГМЗ), розташований у Жовтих Водах. СхідГЗК має сировинну базу у вигляді 12 уранових родовищ. Ці родовища локалізовані у двох рудних вузлах - Кіровоградському і Новокосятинівському. У цей час СхідГЗК експлуатує в Кіровоградській області два родовища уранових руд: Вагутинське (Смолинська шахта) і східну зону Центрального родовища (Інгульська шахта) [3].

У зв'язку з вищенаведеним дуже важливими та актуальними є питання оцінки забруднення ВПРН земель сільськогосподарського призначення, що використовуються населенням для виробництва продуктів харчування, від техногенно-підсиленних джерел природного походження (ТПДПП) і розробки алгоритму підтримки прийняття рішень про доцільність та необхідність їхньої реабілітації. У даній роботі розглянуто ці питання, а також викладено, обґрунтовано та апробовано відповідний алгоритм прийняття рішень про необхідність реабілітації таких сільськогосподарських угідь.

Запропонований алгоритм враховує випадковий характер вмісту ВПРН у ґрунтах, сільсько-

господарських рослинах і продуктах харчування в зоні впливу ТПДПП і забезпечує виконання вимог МАГАТЕ [4 - 10] і НРБУ-97 [11]. Робота базується на результатах узагальнення фактичних даних та висновків вітчизняних і міжнародних науково-дослідних робіт, пов'язаних із вивченням стану земель, забруднених ВПРН, і міграції цих радіонуклідів у біоценозах та харчових ланцюжках. Реалізація цього підходу дає змогу мінімізувати ризик для здоров'я населення, обумовлений споживанням сільськогосподарської продукції, що вироблена на вказаних угіддях та територіях у зоні впливу ТПДПП, та мінімізувати соціальні наслідки.

Основні положення, на яких базується алгоритм підтримки прийняття рішень

Основою (необхідною умовою) реабілітації забруднених ВПРН земель сільськогосподарського призначення, що використовуються для виробництва продуктів харчування, повинно бути науково-обґрунтоване рішення про необхідність та доцільність проведення цієї реабілітації. Після прийняття такого рішення необхідне ефективне планування та проведення адекватних реабілітаційних заходів, що забезпечать радіоекологічну безпеку населення, яке використовує ці землі для виробництва сільськогосподарської продукції і продуктів харчування.

Відповідно до вимог МАГАТЕ [4 - 6] процес реабілітації забруднених ВПРН територій (у тому числі сільськогосподарських угідь) повинен включати в себе визначення (оцінку) початкових характеристик забруднення, визначення критеріїв і параметрів реабілітації (значень характеристик забруднення, які необхідно досягти). Реабілітація сільськогосподарських угідь та її практичне проведення мають бути оптимізовані. Обраний варіант реабілітації сільськогосподарських угідь (той чи інший контрзахід або комплекс контрзаходів) повинен мати найменші економічні витрати з досягненням максимального ефекту, при цьому враховувати як соціальні, так і політичні аспекти. Критерієм цієї оптимізації повинно бути досягнення неперевищення дозових навантажень для населення, що встановлені в НРБУ-97.

Відповідно до класифікації, що наведена в публікації [9], ситуація на сільськогосподарських угіддях і землях, що забруднені ВПРН від ТПДПП і використовуються для виробництва продуктів харчування, належить до ситуацій існуючого опромінення. Ґрунтуючись на загальних вимогах і консервативних допущеннях, сформулюємо критерії, при яких втручання в

радіологічну обстановку на таких землях сільськогосподарського призначення є необхідним.

Відповідно до НРБУ-97 для осіб категорії "В" (населення) сумарна ефективна річна доза опромінення, включаючи всі джерела (без природного фону), у тому числі опромінення за рахунок споживання продуктів харчування та води, не повинна перевищувати величину $DL_E = 1$ мЗв/рік. При цьому встановлено, що надходження радіонуклідів через органи травлення не повинно перевищувати відповідну величину ALI^{igest} Бк/рік. Ці рівні є радіаційно-гігієнічними регламентами. Їхні числові значення розраховані для умов впливу одного радіонукліда, що надходить в організм людини лише з водою. При цьому не враховувалася міграція радіонуклідів через ланцюги живлення та надходження їх з раціоном харчування людини. Також в НРБУ-97 для осіб категорії "В", які знаходяться в зоні впливу заводів з переробки уранових руд, встановлено сумарну квоту від $DL_E - 20\%$ (0,2 мЗв/рік) за рахунок повітряного та водного шляхів формування дози.

Для оцінки радіаційної небезпеки забруднення земель сільськогосподарського призначення ВПРН від ТПДПП для населення, яке споживає продукти харчування, що вироблені або потенційно можуть вироблятися на цих землях, необхідно було б виділити (оцінити) квоту дози, пов'язану із споживанням продуктів харчування (без води), а також квоту відповідного ліміту надходження ВПРН в організм людини. Однак наведені вище положення НРБУ-97 не дозволяють це зробити. Аналіз літературних публікацій з цього питання показав, що середні оцінки ефективних доз опромінення населення різних областей України, що обумовлені надходженням материнських радіонуклідів ^{238}U і ^{232}Th з продуктами харчування, значно менші за середню по Україні дозу від природних радіонуклідів, що надходять в організм з питною водою ($< 4\%$ для ^{238}U і $< 0,4\%$ для ^{232}Th) [12 - 14]. Проведений нами аналіз оцінок доз внутрішнього опромінення від надходження з їжею та водою ВПРН в організм людини, яка проживає в зоні впливу ПХЗ і його хвостосховищ, також показав, що доза, яку людина отримує від споживання місцевих продуктів харчування, є значно меншою за дозу від споживання питної води (див. табл. 3).

Для того щоб сформулювати в межах НРБУ-97 та вимог МАГАТЕ критерії втручання в радіологічну ситуацію на землях сільськогосподарського призначення, що забруднені ВПРН від ТПДПП, зробимо консервативне припущення. Усе забруднення ВПРН ґрунту, рослин і питної

води на цих територіях пов'язано лише з ТПДПП, що розглядається (забруднення, пов'язане з природним фоновим вмістом ВПРН у ґрунті, не виділяємо). ВПРН надходять до організму людини лише з водою та їжею. Для основної маси населення в зоні впливу ТПДПП величина індивідуальної ефективної дози від споживання місцевих продуктів харчування не повинна бути визначальним фактором у загальній дозі від перорального надходження ВПРН в організм людини (не повинна перевищувати 50 % дози від споживання водопровідної води). Під "основною масою населення" відповідно до [15, 16] розуміється 95 % випадково обраних осіб. Відповідно до вимог МАГАТЕ для основної маси населення сумарне річне надходження ВПРН в організм людини через органи травлення A_2 не повинно перевищувати величини $1 / \sum f_i / ALI_i^{ihgest}$, де f_i – внесок надходження i -го радіонукліда (або $d = \sum A_i / ALI_i^{ihgest} < 1$, A_i – річне надходження i -го радіонукліда) більше, ніж для 5 % населення.

Таким чином, в якості критерію втручання в радіологічну обстановку на землях сільськогосподарського призначення, що забруднені ВПРН і від ТПДПП пропонується прийняти такі умови (реалізація хоча б одної з наступних подій):

розрахункова доза опромінення від ВПРН, яку людина отримує споживаючи місцеві продукти харчування, перевищує 50 % відповідної дози опромінення від споживання місцевої водопровідної води;

сумарне річне надходження ВПРН до організму людини через органи травлення A_2 більш ніж у 5 % випадково обраних осіб у зоні впливу ТПДПП перевищує величину, що рекомендована МАГАТЕ (імовірність перевищення величиною $d = \sum A_i / ALI_i^{ihgest}$ одиниці – більше 5 %).

Викладене вище дозволяє сформулювати деякі положення проекту концепції реабілітації сільськогосподарських угідь, що забруднені ВПРН. Радіологічна обстановка на землях сільськогосподарського призначення, забруднених ВПРН від ТПДПП, передбачає дві можливості.

1. Радіологічна ситуація на сільськогосподарських угіддях і територіях, де виробляються продукти харчування, що забруднені ВПРН (^{210}Pb , ^{210}Po , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}U) за рахунок ТПДПП, не вимагає втручання, якщо всі дві умови критерію втручання не виконані. При цьому оцінки ризику перевищення допустимої величини річного надходження в організм людини через органи травлення та ефективної дози опромінення розраховуються на основі адекватних і репрезентативних результатів радіологічного моніторингу відпові-

дних земель сільськогосподарського призначення, а також радіологічного моніторингу продуктів харчування. Для отримання консервативних оцінок раціон харчування населення в першому наближенні може бути прийнятий таким, як у табл. 1, а значення параметрів варіабельності питомої активності ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}U у продуктах харчування, як у табл. 2.

2. У випадку, якщо за результатами проведених розрахунків хоча б одне положення запропонованого критерію втручання виконано, проводяться уточнення раціону харчування населення, яке проживає в зоні впливу ТПДПП. Якщо значення питомої активності ВПРН у компонентах раціону населення не репрезентативні або дуже консервативні, проводиться додаткове радіологічне обстеження продуктів харчування, що вироблені на цій території, та уточнення вмісту ВПРН у компонентах раціону населення. Зменшується та обґрунтовується консервативність отриманих оцінок, проводяться корегування наведених вище припущень. Якщо і після завершення цих процедур хоча б одне положення критерію втручання виконано – необхідне втручання та реабілітація земель сільськогосподарського призначення, що забруднені ВПРН і де виробляються продукти харчування. При цьому необхідно використовувати методологію, яка добре зарекомендувала себе в реалізації стратегії реабілітації територій, забруднених унаслідок Чорнобильської аварії (наприклад, у системі підтримки ухвалення рішень ReSCA) [18], а також положення публікації [16].

Апробація алгоритму підтримки прийняття рішень про реабілітації сільськогосподарських угідь, забруднених ВПРН

Полігоном для апробації алгоритму підтримки прийняття рішень про реабілітацію сільськогосподарських угідь і земель, що забруднені ВПРН, були взяті сільськогосподарські поля і присадибні ділянки жителів населених пунктів Карнаухівка і Таромське, що знаходяться в безпосередній близькості до територій промайданчика ПХЗ з переробки уранових руд і його хвостосховищ (їхній перелік наведено у вступі). За даними Центру моніторингових досліджень і природоохоронних технологій (ЦМДПТ) із хвостосховищ в атмосферу щороку потрапляє $4,3 \cdot 10^{13}$ Бк радону та 23,9 т радіоактивного пилу із середньою питомою активністю 3,7 кБк/кг, зі сховищ відходів уранового виробництва – $2,3 \cdot 10^{13}$ Бк радону та 8,9 т радіоактивного пилу із середньою питомою активністю 0,01 МБк/кг.

Хвостосховища є джерелом забруднення підземних вод на відстані 370 - 860 м від їхнього контуру. Річний винос ВПРН з водами р. Коноплянка у р. Дніпро становить: $^{238}\text{U} - 5,5 \cdot 10^{10}$ Бк; $^{226}\text{Ra} - 1,9 \cdot 10^{10}$ Бк; $^{210}\text{Pb} - 4,4 \cdot 10^{10}$ Бк; $^{210}\text{Po} - 8,8 \cdot 10^9$ Бк; $^{230}\text{Th} - 5,5 \cdot 10^9$ Бк. Річний винос ВПРН з підземними водами в р. Дніпро становить: $^{238}\text{U} - 1,6 \cdot 10^8$ Бк; $^{226}\text{Ra} - 2,5 \cdot 10^7$ Бк; $^{210}\text{Pb} - 1,5 \cdot 10^6$ Бк; $^{210}\text{Po} - 1 \cdot 10^7$ Бк; $^{230}\text{Th} - 2,5 \cdot 10^7$ Бк.

Для оцінки надходження ВПРН з продуктами харчування і водою в організм людей різних вікових груп, які проживають у зоні впливу ПХЗ і його хвостосховищ, та відповідних ефективних доз опромінення населення використовують референтні раціони харчування цих груп населення. Аналіз доступної авторам літератури і нормативних документів показав, що відповідні раціони харчування населення є різними для кожної країни. В Україні для оцінки надходження ВПРН з продуктами харчування і водою в організм людей, які знаходяться у сфері впливу різних джерел, таких референтних раціонів не існує. Рекомендації, які можна знайти в літературі по даній темі, мають на увазі для встановлення такого раціону проведення обстежень відповідних груп населення.

У зоні впливу ПХЗ і його хвостосховищ проживає як міське (Дніпродзержинськ), так і сільське населення (в основному населених пунктів Карнаухівка і Таромське). Для проведення оціночних розрахунків величини річного надходження радіонуклідів ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}U в організм людей з продуктами харчування і

водою, а також відповідної ефективної дози опромінення була прийнята сукупність (група) сільських жителів (дітей і дорослих), споживаючих овочі, фрукти та ягоди з присадибних ділянок, а молоко, м'ясо, яйця, вироблені в особистих підсобних господарствах, що розташовані в зоні впливу ПХЗ. В основу оцінки раціону харчування цієї групи було взято набір продуктів, затверджений постановою КМ України № 656 від 14 квітня 2000 р. для дітей (0 - 6 і 6 - 18 років), працездатного і непрацездатного населення [17]. Для оцінки дози внутрішнього опромінення $D_{\text{вн}} = \sum k_i \cdot A_i$ від ВПРН, що надходять в організм людини з їжею і водою, були використані дозові коефіцієнти k_i з публікації МАГАТЕ [9] для різних вікових груп (1 - 2; 2 - 7; 7 - 12; 12 - 17; > 17 років).

Для отримання консервативних оцінок надходження радіонуклідів ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}U в організм людини і відповідних доз внутрішнього опромінення населення в зоні впливу ПХЗ і його хвостосховищ було умовно розбито на три вікові групи (табл. 1.) У кожній групі відповідно до вказаних нормативних документів були взяті максимальні об'єми споживання продуктів харчування та максимальні дозові коефіцієнти. Для дорослого населення (>17 років) об'єми споживання продуктів були збільшені [8, 18]. У цій же таблиці відповідно [19] наведено референтні об'єми спожитої протягом одного року питної води.

Таблиця 1. Раціон різних вікових груп для розрахунків надходження ВПРН та ефективних доз опромінення населення в зоні впливу ПХЗ і його хвостосховищ, кг/рік

Найменування продукту	Вікова група, роки		
	0 - 7	7 - 17	>17
<i>Частина 1, місцеві продукти</i>			
Картопля	73	93,7	131
Морква, буряк	14,8	19,6	64
Капуста	16,4	21,9	30
Помідори, огірки	23	30,6	70
Цибуля, часник	6,6	8,7	10
Інші овочі та баштанні	21,3	28,5	29
Фрукти (з урахуванням сухофруктів), соки	104	121,1	120
Молочні продукти (без сиру)	193	184,3	200
Сир твердий, м'який	20,5	25	25
Яловичина, телятина	11,7	18,3	18
Баранина			2
Свинина, сало	6,8	10,7	48
Птиця, кріль	5,8	9,2	14
Субпродукти (печінка, язик, мозок)	5,9	9,1	9
Яйця, шт. (1 шт. - 52 г)	182,5 шт.	365 шт.	272 шт.
Вода	300	600	800

Найменування продукту	Вікова група, роки		
	0 - 7	7 - 17	>17
<i>Частина 2, привозні продукти</i>			
Борошно житнє, пшеничне	4,6	7,9	10
Хліб житній, пшеничний	53,8	79,1	101
Крупи (рисова, манна, пшоняна, гречана, вівсяна, бобові та ін.)	11,7	16,1	16
Макаронні вироби	2,9	4	4
Ковбасні вироби	6,3	9,9	9
Морська риба, рибопродукти	12,8	21,9	22

Раціон був умовно (консервативно) розділено на дві частини. До першої частини віднесено воду і місцеві продукти харчування, що виробляються в особистих господарствах і вирощуються на сільськогосподарських полях і присадибних ділянках у зоні впливу ПХЗ і його хвостосховищ (або можуть потенційно вироблятися і вирощуватися): – овочі, фрукти, ягоди, соки, цілісне молоко, сир, сметана; яловичина, баранина, свинина, сало, субпродукти, свійська птиця, яйця тощо. На вміст ВПРН у цих продуктах можуть впливати контрзаходи (якщо вони необхідні). До другої частини (*привозні продукти*) належать борошно, хлібопродукти, крупи, макаронні вироби, морська риба, цукор, рослинна олія, маргарин.

У даній роботі питома активність радіонукліда в компоненті раціону розглянута як випадкова величина, що розподіляється за логнормальним законом

$$f(C_{i,j}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot C_{i,j} \cdot s_{i,j}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(C_{i,j}) - \mu_{i,j}}{s_{i,j}}\right)^2\right),$$

де $C_{i,j}$ – питома активність i -го радіонукліда в j -й компоненті раціону (Бк/кг, Бк/л); $\mu_{i,j}$ – математичне очікування логарифма питомої активності радіонукліда в компоненті раціону; $s_{i,j}^2$ – дисперсія логарифма питомої активності радіонукліда в компоненті раціону.

Оцінки медіан питомої активності радіонуклідів у компонентах раціону $\overline{C_{i,j}} = \exp(\mu_{i,j})$ і середнє квадратичне відхилення логарифма питомої активності радіонукліда $s_{i,j}$ наведено в табл. 2.

Для їхнього отримання та аналізу було використано методи математичної статистики та теорії ймовірностей [20]. Для визначення оцінок $\overline{C_{i,j}}$

для компонент раціону було використано різні джерела. Питому активність для основних овочевих і зернових культур було визначено за результатами радіологічного обстеження сільськогосподарських угідь і присадибних ділянок, що

знаходяться в зоні впливу ПХЗ і його хвостосховищ. Додатково було розраховано консервативні оцінки з використанням відповідних коефіцієнтів накопичення, що рекомендовані МАГАТЕ [7]. Питома активність ВПРН у місцевих продуктах тваринництва, у птиці та яйцях визначалась з використанням коефіцієнтів переходу радіонукліда з добового раціону в той або інший продукт тваринництва [7]. Компоненти добових раціонів годівлі тварин наведено в довіднику [21]. Враховано також співвідношення, що спостерігаються, між вмістом ВПРН в органах і тканинах різних тварин [22 - 24]. Для вмісту ВПРН у *привозних продуктах* харчування було використано дані по населених пунктах Миколаївської області [18] і відповідні середні значення по Україні. При відсутності інформації щодо забруднення компонентів раціону ВПРН було використано результати, отримані різними авторами на території європейської частини СРСР [22 - 31]. В якості консервативних оцінок питомої активності ^{210}Po в рибі було взято усереднені значення питомої активності цього радіонукліда в морській та прісноводній рибі за даними, що наведені в [22, 23]. При оцінці питомої активності ^{210}Pb і ^{210}Po в продуктах харчування бралось до уваги спостережуване співвідношення між цими радіонуклідами [22]. Для ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}U було прийнято, що в борошно і крупи надходить 70 % активності від зерна, а в хліб і хлібопродукти – 50 %. Узагальнені результати наведено в табл. 2.

Однак вміст ВПРН у *привозних продуктах* харчування при оцінках їхнього надходження в організм людини і відповідних доз внутрішнього опромінення не враховувався, оскільки для населення в зоні впливу ПХЗ і його хвостосховищ, опромінення, що пов'язане з ними, є фонове. У табл. 2 відповідні значення наведено лише для довідки.

При аналізі перорального надходження ВПРН в організм людини і відповідних доз внутрішнього опромінення було розглянуто водопровідну та колодязну воду. Для оцінки питомої активності ВПРН у питній воді в населених пунктах у зоні

Таблиця 2. Усереднені (консервативні) оцінки медіан вмісту ВПРН (природна вологість) і відповідних середніх квадратичних відхилень логарифма питомої активності ВПРН у компонентах раціону харчування населення в зоні впливу ПХЗ і його хвостосховищ

Найменування продукту	²¹⁰ Po		²¹⁰ Pb		²²⁶ Ra		²³² Th		²³⁸ U	
	\bar{C} , Бк/кг	s_p	\bar{C} , Бк/кг	s_p	\bar{C} , Бк/кг	s_p	\bar{C} , Бк/кг	s_p	\bar{C} , Бк/кг	s_p
Місцеві продукти										
Картопля	$1,5 \cdot 10^{-6}$	0,56	$4,0 \cdot 10^{-6}$	0,56	$4,6 \cdot 10^{-4}$	0,37	$5,5 \cdot 10^{-44}$	0,52	$2,6 \cdot 10^{-4}$	0,81
Морква, буряк	$1,1 \cdot 10^{-6}$	0,69	$3,0 \cdot 10^{-6}$	0,69	$1,5 \cdot 10^{-4}$	0,37	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,57	$5,0 \cdot 10^{-5}$	0,81
Капуста	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,58	$3,2 \cdot 10^{-4}$	0,58	$5,0 \cdot 10^{-3}$	0,39	$1,8 \cdot 10^{-5}$	0,56	$1,1 \cdot 10^{-3}$	0,72
Помідори, огірки	$2,2 \cdot 10^{-5}$	0,58	$6,0 \cdot 10^{-5}$	0,58	9,4E-4	0,39	$9,3 \cdot 10^{-4}$	0,56	$8,0 \cdot 10^{-4}$	0,77
Цибуля, часник	$2,2 \cdot 10^{-5}$	0,69	$6,0 \cdot 10^{-5}$	0,69	$3,9 \cdot 10^{-3}$	0,37	$9,5 \cdot 10^{-4}$	0,57	$4,5 \cdot 10^{-4}$	0,81
Баштанні	$2,2 \cdot 10^{-5}$	0,55	$6,0 \cdot 10^{-5}$	0,55	$9,4 \cdot 10^{-4}$	0,39	$9,3 \cdot 10^{-4}$	0,56	$8,0 \cdot 10^{-4}$	0,77
Фрукти, ягоди	$4,5 \cdot 10^{-5}$	0,55	$6,0 \cdot 10^{-5}$	0,55	$9,4 \cdot 10^{-4}$	0,39	$9,3 \cdot 10^{-4}$	0,56	$8,0 \cdot 10^{-4}$	0,77
Молоко	$4,0 \cdot 10^{-6}$	0,73	$5,3 \cdot 10^{-5}$	0,73	$7,4 \cdot 10^{-4}$	0,69 ^{c)}	$2,4 \cdot 10^{-2}$	0,83	$5,5 \cdot 10^{-4}$	1,06
Сир	$1,1 \cdot 10^{-4}$	0,73	$3,2 \cdot 10^{-4}$	0,65	$7,4 \cdot 10^{-3}$ ^{a)}	0,69	$2,4 \cdot 10^{-1}$ ^{a)}	0,83	$5,5 \cdot 10^{-3}$ ^{a)}	1,06
Яловичина	$2,9 \cdot 10^{-5}$	0,85	$7,1 \cdot 10^{-5}$	0,85	$8,9 \cdot 10^{-4}$	0,56 ^{c)}	$4,4 \cdot 10^{-3}$	0,83 ^{c)}	$5,7 \cdot 10^{-5}$	0,98
Баранина	$2,0 \cdot 10^{-5}$	0,81	$6,5 \cdot 10^{-5}$	0,81	$1,3 \cdot 10^{-4}$	0,56 ^{d)}	$6,4 \cdot 10^{-4}$	0,83 ^{d)}	$8,3 \cdot 10^{-6}$	0,97
Свинина	$9,3 \cdot 10^{-6}$	0,85 ^{d)}	$4,8 \cdot 10^{-6}$	0,85 ^{d)}	$1,1 \cdot 10^{-4}$	0,56 ^{d)}	$4,0 \cdot 10^{-5}$	0,83 ^{d)}	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,96
М'ясо птиці	$3,2 \cdot 10^{-5}$	0,67	$7,2 \cdot 10^{-5}$	0,67	$8,8 \cdot 10^{-4}$	0,56 ^{d)}	$4,2 \cdot 10^{-5}$	0,83 ^{d)}	$1,2 \cdot 10^{-4}$	1,1
Субпродукти	$8,0 \cdot 10^{-4}$	0,57 ^{c)}	$1,3 \cdot 10^{-3}$	0,57 ^{c)}	$7,2 \cdot 10^{-4}$	0,57 ^{c)}	$2,0 \cdot 10^{-3}$	0,67 ^{c)}	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,97
Яйця	$4,2 \cdot 10^{-5}$	0,67	$4,7 \cdot 10^{-5}$	0,78 ^{d)}	$4,7 \cdot 10^{-4}$	0,56 ^{d)}	$2,1 \cdot 10^{-5}$	0,83 ^{d)}	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,88
Вода колодезна	0,003	0,41	0,01	0,61	0,035	0,51	0,07	0,45	0,83	0,48
Вода водопровідна	0,003	0,41	0,01	0,61	0,015	0,51	0,07	0,45	0,024	0,48
Привозні продукти										
Борошно житнє, пшеничне	0,014 ^{b)}	0,67	0,031 ^{b)}	0,58	0,073	0,64	0,200	0,56	0,014	0,86
Хліб житній, пшеничний	0,012 ^{b)}	0,67	0,026 ^{b)}	0,67	0,052	0,64	0,143	0,56	0,010	0,86
Крупи	0,014 ^{b)}	0,67	0,031 ^{b)}	0,67	0,073	0,64	0,200	0,56	0,014	0,86
Макаронні вироби	0,008 ^{b)}	0,67	0,017 ^{b)}	0,67	0,052	0,64	0,143	0,56	0,010	0,86
Ковбасні вироби	0,026 ^{b)}	0,85	0,037 ^{b)}	0,85	0,056 ^{c)}	0,56	0,053 ^{c)}	0,83	0,12	0,97
Риба, рибопродукти	0,4	1,0	0,1	0,65	0,078 ^{c)}	0,50	0,074 ^{c)}	0,40	0,13	0,63

^{a)} – умовно прийнято на порядок більше, ніж у молоці; ^{b)} – за даними для м. Санкт-Петербург [22]; ^{c)} – усереднена величина за розрахунковими і наведеними в роботах [24, 29] результатами; ^{d)} – умовно прийнято як для яловичини; ^{e)} – прийнято як для населених пунктів Миколаївської області [18].

впливу ПХЗ і його хвостосховищ були використані методичні вказівки [32] та результати досліджень, що наведені в роботах [1, 2, 33], за результатами яких в населеному пункті Таромське, що безпосередньо знаходиться в зоні впливу хвостосховища База "С", було виявлено підвищений вміст ²²⁶Ra і ²³⁸U в колодезній воді на території деяких присадибних ділянок. Оскільки джерелом водопровідної води в зоні впливу ПХЗ і його хвостосховищ є р. Дніпро, то в якості консервативних оцінок вмісту ВПРН у водопровідній воді були прийняті відповідні усереднені оцінки для води р. Дніпро і Дніпродзержинського водосховища за 2001 і 2007 рр.

Оцінки параметрів варіабельності питомого вмісту ВПРН у продуктах харчування $s_{i,j}$, що вироблені з продукції рослинництва, визначаються варіабельністю забруднення ВПРН цієї продукції. Тому в якості консервативних оцінок $s_{i,j}$ продуктів рослинного походження були взяті

значення для відповідних рослин. Відповідно варіабельність вмісту ВПРН у продуктах харчування, що вироблено з продукції тваринництва, в основному визначається варіабельністю забруднення ВПРН раціонів годівлі тварин та варіабельністю відповідних коефіцієнтів переходу. Це також було взято за основу наведених у табл. 2 консервативних оцінок $s_{i,j}$ для відповідних продуктів харчування. Деякі з них було відкореговано з урахуванням реально спостережуваної варіабельності [24, 28, 29]. На варіабельність вмісту ВПРН у рибі і рибних продуктах впливає декілька факторів, основні з них: варіабельність забруднення ВПРН водойм, варіабельність гідрохімічних показників водойм, видовий склад рибної сировини. В якості консервативних оцінок $s_{i,j}$ для риби і рибних продуктів були взяті результати, отримані на основі літературних даних [18, 22, 24, 30].

Надходження i -го радіонукліда в організм

людини з раціоном харчування та споживання води визначається за формулою $A_i = \sum M_j \cdot C_{i,j}$, де M_j – річне споживання j -ї компоненти раціону людини (кг). Ця величина, а також величина $d = \sum A_i / ALI_i^{ingest}$, яка характеризує сумарне річне надходження ВПРН в організм людини через органи травлення, є випадковими величинами. Імовірність перевищення величиною $d = \sum A_i / ALI_i^{ingest}$ одиниці (ризик перевищення) у загальному випадку може бути обчислена методом статистичного моделювання. Розподіл імовірностей можливих значень річного надходження ВПРН в організм людини добре апроксимується логнормальним законом (див. рис. 3).

Результати та обговорення

На основі даних, наведених у табл. 1 і 2, розраховано середні значення річного надходження

^{210}Pb , ^{210}Po , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}U в організм людини в зоні впливу ПХЗ і його хвостосховищ за рахунок питної води (водопровідної, колодезної) та продуктів харчування різних категорій, а також внесок у це надходження місцевих продуктів харчування. Ці результати наведено на рис. 1 і 2, а також у табл. 3. Оскільки A_i – випадкові величини, то $D_{\text{вн}}$ також є випадковою величиною як функція випадкових аргументів. На рис. 3 і в табл. 3 наведено медіанні значення річної ефективної дози внутрішнього опромінення людини різних вікових груп у зоні впливу ПХЗ і його хвостосховищ, що обумовлені пероральним надходженням ^{210}Po , ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{232}Th і ^{238}U з їжею і питною водою. Однак точкові оцінки (медіанні значення) надходження ВПРН в організм людини та оцінки відповідних доз внутрішнього опромінення за рахунок цього надходження не повною мірою характеризують ці випадкові величини.

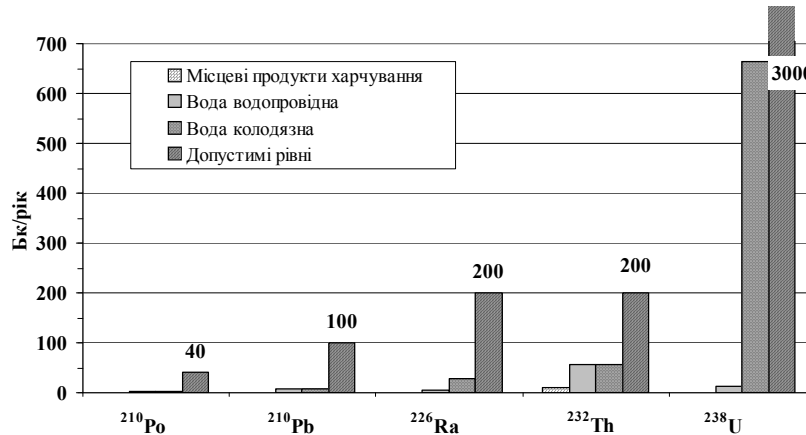


Рис. 1. Надходження ВПРН в організм дорослої людини в зоні впливу ПХЗ і його хвостосховищ за рахунок води і продуктів харчування.

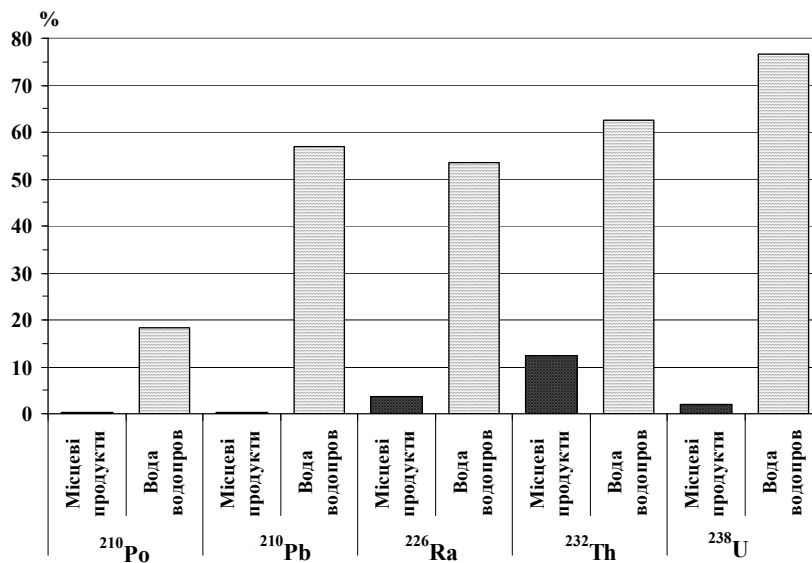


Рис. 2. Вклад продуктів харчування і питної води в надходження ВПРН в організм дорослої людини в зоні впливу ПХЗ і його хвостосховищ.

Таблиця 3. Медіанні значення надходження та ймовірності перевищення допустимої величини ВПРН в організм людини в зоні впливу ПХЗ і його хвостосховищ через органи травлення та відповідні сумарні дози внутрішнього опромінення

Показник	²¹⁰ Po	²¹⁰ Pb	²²⁶ Ra	²³² Th	²³⁸ U	
ALI^{igest} (категорія «В»), Бк/рік	40	100	200	2000	3000	
Вікова група, 0 - 7 років						
Надходження, Бк/рік	місцеві продукти	0,02	0,04	0,60	9,80	0,38
	питна водопровідна вода	0,9	3,00	4,5	21	7,2
$Ver(d \geq 1)$	0,0					
Доза внутрішнього опромінення, мЗв/рік	місцеві продукти	0,003				
	вода	0,011				
Вікова група, 7 - 17 років						
Надходження, Бк/рік	місцеві продукти	0,02	0,05	0,72	10,75	0,44
	питна водопровідна вода	1,8	6	9	42	14,4
$Ver(d \geq 1)$	0,004					
Доза внутрішнього опромінення, мЗв/рік	місцеві продукти	0,004				
	вода	0,021				
Вікова група, >17 років						
Надходження, Бк/рік	місцеві продукти	0,02	0,06	0,84	11,19	0,51
	питна водопровідна вода	2,4	8	12	56	19,2
$Ver(d \geq 1)$	0,03					
Доза внутрішнього опромінення, мЗв/рік	місцеві продукти	0,004				
	вода	0,029				

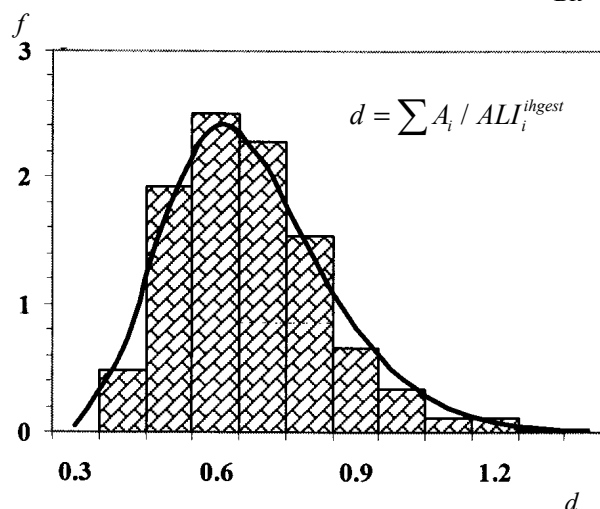
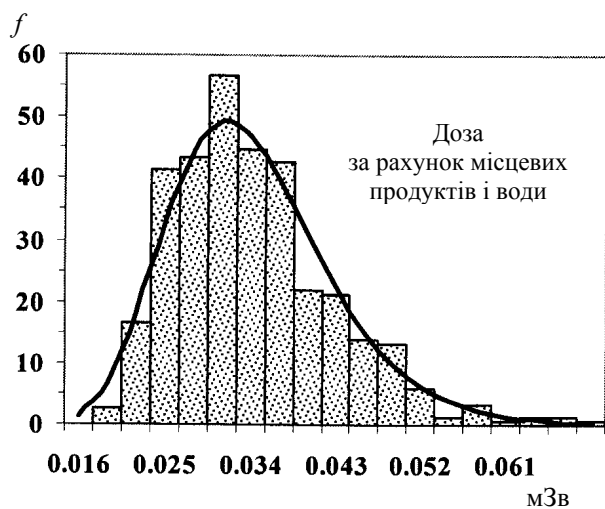
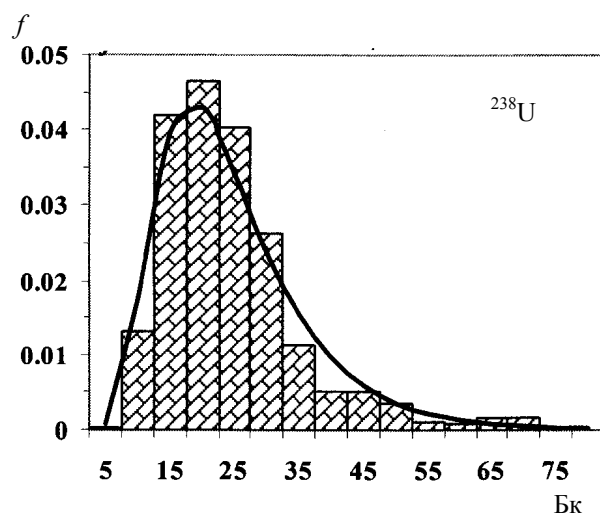
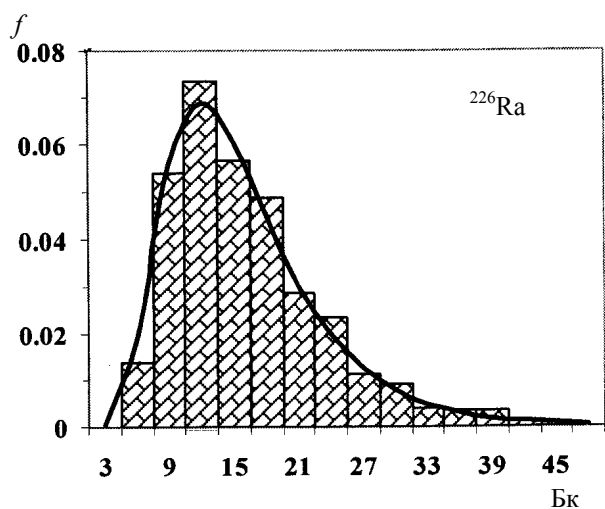


Рис. 3. Характерний вид щільності розподілу ймовірностей можливих значень річного надходження ВПРН в організм дорослої людини і відповідних значень сумарних доз внутрішнього опромінення і величини d .

На рис. 3 наведено щільності розподілу ймовірностей можливих значень річного надходження ^{210}Po , ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{232}Th і ^{238}U в організм людини і відповідних сумарних доз внутрішнього опромінення для категорії >17 років (доросле населення). Ці результати отримано методом статистичного моделювання. На рис. 3 наведено й апроксимацію отриманих результатів за логнормальним законом розподілу. Для даного випадку (доросле населення) середнє квадратичне відхилення логарифму цих величин має такі значення: для річного надходження ^{210}Po – 0,38, для річного надходження ^{210}Pb – 0,61, для річного надходження ^{226}Ra – 0,45, для річного надходження ^{232}Th – 0,35, для річного надходження ^{238}U – 0,46, для річної дози внутрішнього опромінення за рахунок споживання місцевих продуктів харчування і водопровідної води – 0,26, для величини d – 0,27.

У табл. 3 наведено середні значення оцінок річного надходження ^{210}Po , ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{232}Th і ^{238}U в організм людини для різних вікових груп у зоні впливу ПХЗ і його хвостосховищ, а також відповідні оцінки річної ефективної дози внутрішнього опромінення людині за рахунок споживання місцевих продуктів харчування і питної водопровідної води. Там же наведено ймовірність перевищення річного надходження ВПРН в організм людини через органи травлення, що рекомендована МАГАТЕ (величиною $d = \sum A_i / ALI_i^{igest}$ одиниці).

З наведених у табл. 3 результатів видно, що для всіх категорій населення в зоні впливу ПХЗ і його хвостосховищ оцінки доз внутрішнього опромінення від споживання місцевих продуктів значно менші, ніж від споживання питної води (знаходяться в межах 14 - 27 %).

Радіологічна ситуація на сільськогосподарських угіддях і присадибних ділянках у зоні впливу ПХЗ і його хвостосховищ, що обумовлена їхнім забрудненням ВПРН (^{210}Po , ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{232}Th і ^{238}U), навіть при самих консервативних припущеннях (усе забруднення ВПРН місцевих продуктів харчування і питної води пов'язане з ПХЗ) не потребує втручання. При цьому доза внутріш-

нього опромінення, обумовлена споживанням місцевих продуктів харчування і питної води не перевищує 17 % від квоти ліміту дози DL_E – 0,2 мЗв/рік для заводів по переробці уранових руд. Ця ситуація відповідає запропонованим у даній роботі критеріям.

Висновки

Запропоновано критерії втручання в радіологічну обстановку на землях сільськогосподарського призначення, що забруднені ВПРН за рахунок ТПДПП.

На основі узагальнення фактичних даних та висновків вітчизняних і міжнародних науководослідних робіт запропоновано алгоритм підтримки прийняття рішень про доцільність втручання в радіологічну ситуацію на землях сільськогосподарського призначення, що забруднені ВПРН за рахунок ТПДПП. Цей алгоритм апробовано на базі сільськогосподарських полів і присадибних ділянок жителів населених пунктів Карнаухівка і Таромське, що знаходяться у безпосередній близькості до територій промайданчика ПХЗ і його хвостосховищ.

Оцінено статистичні характеристики вмісту ^{210}Po , ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}U в сільськогосподарських рослинах і продуктах харчування в зоні впливу ПХЗ і його хвостосховищ, а також відповідні оцінки середніх квадратичних відхилень логарифма вмісту цих радіонуклідів на вказаних об'єктах.

Оцінено надходження ^{210}Po , ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}U в організм людини різних вікових груп через органи травлення в зоні впливу ПХЗ і його хвостосховищ, ймовірності перевищення ними допустимої величини та річна ефективна доза внутрішнього опромінення людини за рахунок споживання місцевих продуктів харчування і питної води.

Показано, що радіологічна ситуація на сільськогосподарських угіддях і присадибних ділянках у зоні впливу ПХЗ і його хвостосховищ при їхньому забрудненні в даний час ^{210}Po , ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}U не потребує втручання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Balonov M., Konoplev A., Levins D. et al. Radiological conditions in the Dnieper river basin. - Vienna: IAEA, 2006. - 185 p.
2. Войцехович О.В. Наукова еколого-експертна оцінка радіаційного впливу хвостосховищ та інших радіаційно небезпечних об'єктів колишнього ВО "ПХЗ" (м. Дніпродзержинськ). - УкрНДІЕП, 2006. - 8 с.
3. Авдеев О.К., Кретинин А.А., Леденев А.И. и др. Радиоактивные отходы Украины. Состояние. Проблемы. Решения. - К., 2003. - 152 с.
4. Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards. general safety requirements/ IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. - Vienna: IAEA, 2011.
5. Remediation Process for Areas Affected by Past

- Activities and Accidents. Safety Guide / IAEA Safety Standards Series No. WS-G-3.1
6. *Remediation of Areas Contaminated by Past Activities and Accidents. Safety Requirements: Safety Standards Series No. WS-R-3.* - Vienna: IAEA, 2003.
 7. *Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments.* - Vienna: IAEA-TRS-462, 2010. - 194 p.
 8. Система поддержки принятия решения по реабилитации радиоактивно загрязненных территорий ReSCA. Стратегия реабилитации территорий, загрязненных после Чернобыльской аварии. Руководство пользователя. - Вена, Австрия, 2006. - 61с.
 9. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности. Общие требования безопасности. - Вена: МАГАТЭ, 2011. - 311 с.
 10. *ТС проект RER/9/074 «Стратегия долгосрочных мер защиты и мониторинг облучения населения сельских территорий, подвергшихся воздействию Чернобыльской аварии».* Радиационный мониторинг облучения в отдаленный период после аварии на ЧАЭС. - Вена, 2007. - 119 с.
 11. *Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97) ДГН 6.6.1.-6.5.001 - 98.* - К.: МЗУ, 1998. - 135 с.
 12. *Севальнев А.І., Костенецький М.І.* Оцінка ризику при опроміненні населення та радіаційно-гігієнічний моніторинг // Довкілля та здоров'я. - 2010. - № 2. - С. 48 - 49.
 13. *Павленко Т.А., Лось І.П.* Дозовые нагрузки населения Украины для различных ситуаций облучения // www.snrc.gov.ua/nuclear/doccatalog/document?id=96238.
 14. *Лось І.П., Павленко Т.А.* Ограничение облучения человека техногенно-усиленными источниками природного происхождения // Довкілля та здоров'я. - 2003. - № 1. - С. 49 - 54.
 15. *ICRP. Assessing Dose of the Representative Individual for the PURPOSE of Radiation Protection of the Public: Draft for Consultation (WEB Version).* - 2005. http://www.icrp.org/docs/individual_web_cons_draft_42_106_05.pdf
 16. *ICRP. Publication 101: Assessing dose of the representative person for the purpose of radiation protection of the public.* - ICRP, 2006.
 17. *Кабінет Міністрів України.* Постанова № 656 від 14 квітня 2000 р. Про затвердження наборів продуктів харчування, наборів непродовольчих товарів та наборів послуг для основних соціальних і демографічних груп населення. - Документ 656-2000-п. - К., 2000.
 18. *Григор'єва Л.І., Томлін Ю.А.* Концептуальна модель опромінення населення окремих районів півдня України від природних і техногенно-підсилених джерел іонізуючого випромінювання природного походження // Вісник проблем біології і медицини. - 2008. - Вип. 4. - С. 43 - 47.
 19. *Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97) ДГН 6.6.1.-6.5.001 - 98.* - К.: МЗУ, 1998. - 135 с.
 20. *Четыркин Е.М. Калихан И.Л.* Вероятность и статистика. - М.: Финансы и статистика, 1982. - 319 с.
 21. *Справочник зоотехника /* Под ред. А. П. Калашникова, О. К. Смирнова. - М.: Агропромиздат, 1986. - 479 с.
 22. *Ермолаева-Маковская А.Л., Литвер Б.Д.* Свинец-210 и полоний-210 в биосфере. - М.: Атомиздат, 1978. - 160 с.
 23. *Перцов Л.А.* Природная радиоактивность биосферы. - М.: Атомиздат, 1964. - 316 с.
 24. *Перцов Л.А.* Биологические аспекты радиоактивного загрязнения моря. - М.: Атомиздат, 1978. - 160 с.
 25. *Перцов Л.А.* Ионизирующие излучения биосферы. - М.: Атомиздат, 1979. - 288 с.
 26. *Основные свойства, виды и источники радиоактивных излучений //* Информация научно-производственного предприятия «МР-КВАНТ». - <http://www.mrkvant.com.ua/radiation/4/>.
 27. *Искра А.А., Бахуров В.А.* Естественные радионуклиды в биосфере. - М.: Энергоиздат, 1981. - 124 с.
 28. *Алексахин Р.М., Васильев А.В., Дикарев В.Г.* Сельскохозяйственная радиоэкология. - М.: Экология, 1992. - 400 с.
 29. *Радиоактивность биосферы: Учеб. пособие.* - Ростов-на-Дону, 2007. - 51 с.
 30. *Ладинская Л.А., Парфенов Ю.Д., Арутюнов Р.С., Попов Д.К.* Природные концентрации ^{210}Pb и ^{210}Po в растениях степных фитоценозов // Экология. - 1976. - № 1. - С. 32 - 35.
 31. *Алексахин Р.М., Архипов Н.П., Бархударов Р.М. и др.* Тяжелые естественные радионуклиды в биосфере: Миграция и биологическое действие на популяции и биогеоценозы / Под. ред. Р. М. Алексахина. - М.: Наука, 1990. - 368 с.
 32. *Методичні вказівки "Радіаційно-гігієнічне регламентування проведення робіт на об'єктах ліквідованого Придніпровського хімічного заводу (ПХЗ)" /* Міністерство охорони здоров'я України, наказ № 3 від 11.01.2007 р.
 33. *Звіт Центру моніторингових досліджень і природоохоронних технологій (ЦМДПТ) про результати виконання робіт згідно з програмами і регламентами радіаційного моніторингу (Наук. кер. О. В. Войцехович).* - К., 2007. - 56 с.

Ю. В. Хомутинин, Ю. А. Иванов, В. К. Кириченко

АЛГОРИТМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ О РЕАБИЛИТАЦИИ ЗЕМЕЛЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ ЕСТЕСТВЕННЫМИ РАДИОНУКЛИДАМИ

Рассмотрен вопрос реабилитации земель сельскохозяйственного назначения, загрязненных тяжелыми естественными радионуклидами (^{210}Pb , ^{210}Po , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}U). Предложен алгоритм поддержки принятия решений о целесообразности реабилитации таких земель, который апробирован на базе сельскохозяйственных полей и при-

усадебних участков, находящихся в зоне влияния Приднепровского химического завода и его хвостохранилищ.

Ключевые слова: тяжелые естественные радионуклиды, уран, торий, радий, свинец, полоний, хвостохранилища, реабилитация земель.

Yu. V. Khomutinin, Yu. A. Ivanov, V. K. Kirichenko

**DECISION MAKING ALGORITHM OF THE REHABILITATION OF AGRICULTURAL LANDS
CONTAMINATED WITH HEAVY NATURAL RADIONUCLIDES**

Problem of rehabilitation of agricultural land contaminated with heavy natural radionuclides (^{210}Pb , ^{210}Po , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}U) was considered. Algorithm of decision making support on advisability of rehabilitation of mentioned land was suggested. Proposed algorithm was tested on the base of agricultural farmlands located in the affected zone of Pridneprovsky Chemicals Plant and its tailing dumps.

Keywords: heavy natural radionuclides, uranium, thorium, radium, lead, polonium, tailing dump, rehabilitation of agricultural land.

Надійшла 12.03.2013

Received 12.03.2013