

Передбачити, при яких концентраціях в ґрунті виникнуть токсичні ефекти в рослинах надзвичайно складно. Вже задовго до того, як симптоми отруєння і зниження врожайності стануть очевидні, продукти живлення, що отримуються з сільськогосподарських культур з підвищеним рівнем вмісту Cu, представлятимуть значну небезпеку для здоров'я людей.

Мідь присутня майже у всіх продуктах харчування. Джерелами забруднення харчових продуктів можуть бути вироби з міді, які використовують у харчовій промисловості [2].

На рисунку 1 наведено вміст міді у ґрунтах сільськогосподарського призначення Київської області. Ця інформація представлена за даними 2016 року і дозволяє оцінити сучасний стан цієї території.

З рисунку видно, що найбільші значення цього показника отримані у Яготинському, найменші у Білоцерківському районах, а середні показники цієї речовини у Баришівському.

Проаналізувавши вміст міді у ґрунтах сільськогосподарського призначення Київської області можна зробити висновок, що ця територія відноситься до умовно чистої, з точки зору забруднення важкими металами. Отримані значення не перевищують ГДК, що дозволяє зробити висновок про використання цих земель для сільськогосподарського виробництва та отримання екологічно чистої продукції.

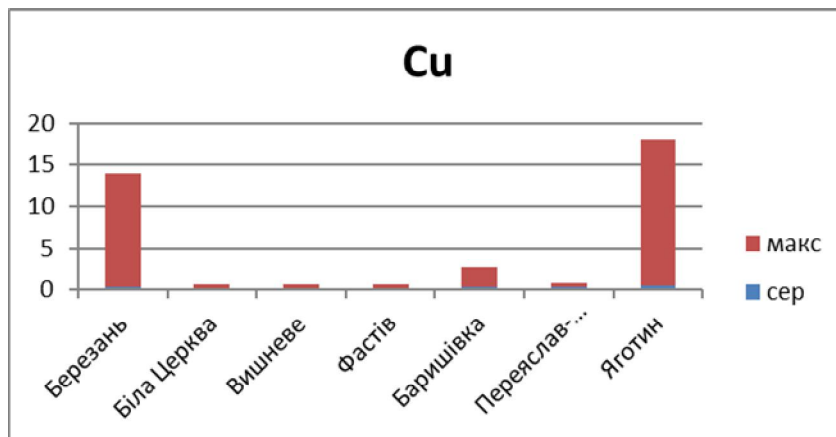


Рис. 1 - Вміст Cu у ґрунтах Київської області.

#### Список використаних джерел

1. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. / Утв. А. Г. Ефремов издание 2-е, М.: 1992. – 27 с.
2. Грабак Н.Х., Топіха І.Н., Давиденко В.М., Шевель І.В. Основи ведення сільського господарства та охорона земель: навчальний посібник, 2-е видання. К.: ВД «Професіонал», 2006 – 496 с.

## СЕКЦІЯ №6 – ХІМІЯ ДОВКІЛЛЯ І ЕКОТОКСИКОЛОГІЯ. ЕКОЛОГІЯ ЛЮДИНИ І ЕКОТРОФОЛОГІЯ. ЕКОЛОГІЯ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА. ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЗАБРУДНЕНИХ РАДІОНУКЛІДАМИ ТЕРИТОРІЙ.

УДК 57.043:63:37.022

І.М. Гудков, доктор біологічних наук, професор, завідувач кафедри радіобіології та радіоекології  
М.М. Лазарєв, кандидат біологічних наук, доцент кафедри Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, [ingudkov@ukr.net](mailto:ingudkov@ukr.net)

### РЕМЕДІАЦІЯ ЗАБРУДНЕНИХ РАДІОНУКЛІДАМИ ТЕРИТОРІЙ ВНАСЛІДОК РАДІАЦІЙНИХ АВАРІЙ

Обговорюються проблеми ремедіації територій, виведених з господарського користування внаслідок радіонуклідного забруднення після радіаційних та ядерних аварій та їх повернення до використання. Викладаються основні підходи до стратегії виробництва на них продукції рослинництва і тваринництва з мінімальним вмістом радіоактивних речовин. На особливу увагу заслуговує концепція модифікації рівнів радіонуклідного забруднення продукції за допомогою застосування контрзаходів – спеціальних радіозахисних технологічних прийомів та методів. Оцінюється ефективність цих прийомів у різні періоди після аварій.

**Ключові слова:** найкрупніші радіаційні аварії, аварія на Чорнобильській АЕС, радіоактивне забруднення, контрзаходи, ремедіація територій

За 33 роки, що пройшли з часу аварії на Чорнобильській АЕС, радіаційна обстановка в Україні покращилася у першу чергу за рахунок природних процесів: фізичного розпаду радіонуклідів, заглибленню і зв'язуванню їх у ґрунті, змиву з площ водозборів, виносу з сільськогосподарською продукцією. Важливу роль у процесах зменшення інтенсивності міграційних процесів радіонуклідів в об'єктах навколишнього середовища, і в першу чергу гальмуванню їх переходу з ґрунту в рослини, відіграють застосування радіозахисних прийомів – контрзаходів у сільському, лісовому, водному господарствах та харчовій промисловості. З усіма підставами можна стверджувати й про суттєве покращення радіаційної ситуації на забруднених внаслідок аварії на АЕС Фукусіма-1 територіях однойменної префектури в Японії, з котрої пройшло вже понад 8 років. У цьому році виповнюється 62 роки з дня аварії на Південному Уралі у Челябінській області на виробничому об'єднанні «Маяк» – підприємстві з виробництва компонентів ядерної зброї та радіоактивних ізотопів (так звана Киштимська аварія), яка за масштабами викиду радіоактивності і забруднення території посідає третє місце після згаданих. Її багаторічний післяаварійний досвід, який вимірюється більш як двома періодами піврозпаду  $^{90}\text{Sr}$  (основного радіоактивного забруднювача), також дозволяє зробити деякі узагальнення.

Чи є щось спільне між цими трьома найкрупнішими аваріями, що їх об'єднує, що різнить? Спільного небагато (табл. 1). У часі їх розділяють десятиліття, у відстані – тисячі кілометрів, розрізняються джерела викиду радіоактивних речовин, їх радіонуклідний склад, об'єми викидів, масштаби радіонуклідного забруднення територій та інше. І все ж таки, є й спільні риси. Усі три аварії, на відміну від деяких інших, наприклад аварії в Уіндскейлі (Велика Британія) 1957 року, яка відбулася у промисловій частині країни і посідає четверте місце у цій черзі, трапились у лісовій зоні. У цьому немає нічого дивного, так як такі небезпечні об'єкти як раз нерідко будуються у віддалених місцях, де деревні масиви, природні чи штучні, виконують у значній мірі захисну функцію на випадок розповсюдження радіонуклідів. Відповідно, спільна і економічна спрямованість регіонів – лісове господарство і землеробство, чи навпаки. Саме тому всі три аварії були названі сільськогосподарськими, навіть лісо-сільськогосподарськими.

Ціла низка підстав дозволяє стверджувати про справедливність цього визначення. По-перше, до 70% населення регіонів аварії – це сільське населення. По-друге, мешкання в умовах сільської місцевості визначає специфічний спосіб життя: виробництво продукції рослинництва і тваринництва на присадибних ділянках чи на тут же розташованих невеликих фермерських господарствах, споживання власно отриманих продуктів харчування, у тому числі молока, м'яса, картоплі, овочів, які формують дозу внутрішнього опромінення, котра в умовах забруднених радіонуклідами територій може досягати 90–95%. За даними ННЦ радіаційної медицини МОЗ України сільські жителі отримують дозу внутрішнього опромінення у багато разів, часом на порядок, більшу, ніж мешканці міст. Зрештою, по-третє, мінімізація наслідків аварій саме у сільськогосподарській сфері на забруднених радіонуклідами територіях, до якої відноситься виконання згаданих радіозахисних заходів в рослинництві й тваринництві, є одним з основних елементів системи радіаційної безпеки населення країни.

Саме тому будь-яка великомасштабна радіаційна чи ядерна аварія, будь-який ядерний інцидент, наслідком яких стає радіонуклідне забруднення великих територій, у переважній більшості випадків може стати сільськогосподарською аварією. І як показала аварія на Чорнобильській АЕС, радіоактивні хмари не знають кордонів і сільськогосподарське виробництво може бути уражене за сотні й навіть тисячі кілометрів від місця аварії.

Є одна суттєва відмінність цієї аварії від інших – це наслідки ураження певних категорій населення радіоактивними ізотопами йоду, зокрема  $^{131}\text{I}$ . У жодному з перерахованих вище випадків забруднення навколишнього середовища штучними радіонуклідами не мало таких негативних наслідків для населення від радіоактивного йоду, як після аварії на Чорнобильській АЕС. Навіть згадана аварія в Уіндскейлі, яка вважається саме йодною – викинуто було з реактора 20 кКі  $^{131}\text{I}$  і лише 0,8 кКі  $^{137}\text{Cs}$ , не призвела до достовірного зростання ракових новоутворень щитоподібної залози. Кількість випадків виникнення раків щитоподібної залози у дітей через 5 років після аварії на Чорнобильській АЕС збільшилося у 100 разів. Вважається, що на 95% доза опромінення щитоподібної залози сформувалася за рахунок споживання молока корів, що випасалися, під час проходження радіоактивної хмари над місцевістю. Дія радіоактивних ізотопів йоду відбувається на протязі короткого часу – декількох тижнів, тому будь-які захисні заходи повинні бути проведені терміново. Це ще раз підкреслює важливість сільськогосподарських аспектів у радіаційному захисті населення у випадку радіаційних аварій. Не сприйняття пріоритетності аграрної ланки у формуванні дозового навантаження на людей після ядерних інцидентів призводить до надважких проблем у стані здоров'я населення через роки після аварій.

Ще однією особливістю розвитку радіаційної ситуації після аварії на Чорнобильській АЕС та впливу її наслідків на населення, зокрема особливістю формування внутрішньої дози опромінення, є те, що основна доза формується за рахунок молока корів – до 95%. Основною причиною такої ситуації є використання природних угідь для випасання худоби і заготівлі грубих кормів на зимовий період, зокрема для корів приватного сектору. Саме природні кормові угіддя є основним джерелом надходження штучних радіонуклідів у організм людини як у гостру фазу аварії так, і у віддалений період після неї. Використання природних кормових угідь, часто-густо розташованих у заплавах річок, заболочених місцевостях, лісових галявинах, які обмежують проведення протирадіаційних заходів, обумовлює на тривалий період існування радіологічно

критичних населених пунктів в Україні. При інтенсифікації кормовиробництва відразу в рази покращується ситуація із радіоактивним забруднення молока і м'яса, про що свідчить досвід Японії і навіть Білорусі. В Україні ж на сьогодні до 80% молока виробляється у приватному секторі, де кормовою базою переважно слугують природні угіддя.

**Таблиця 1 – Спільні та відмінні риси найкрупніших радіаційних аварій**

Показники	Підприємство „Маяк”	Чорнобильська АЕС	АЕС Фукусіма-1
Місце аварії	СРСР, Челябінська область	СРСР, Київська область	Японія, п. Фукусіма
Рік	1957	1986	2011
Пора року, дата	Осінь, 29 вересня	Весна, 26 квітня	Весна, 11 березня
Частина світу	Азія	Європа	Азія
Географічна широта	55,5	51,5	38
Аварійний об'єкт	Сховище РАВ	АЕС	АЕС
Об'єм викиду, Бк	$7,4 \times 10^{16}$	$5,3 \times 10^{18}$	$1,4 \times 10^{18}$
Індекс INIS	6	7	7
Довгоживучі радіонукліди	<sup>90</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs, <sup>90</sup> Sr, <sup>239</sup> Pu	<sup>137</sup> Cs
Фізико-хімічний стан радіонуклідів	Гідрозоль, аерозоль	Аерозоль	Аерозоль
Забруднена територія, тис. км <sup>2</sup>	23	195	55
Напрямок вітру в момент аварії	Південно-східний	Південно-західний	Південно-західний
Переважаючі ґрунти	Сірі лісові, вилугуваний чорнозем	Дерново-підзолисті, торф'яно-болотні	Бурі лісові
Географічна зона	Лісова	Лісова	Лісова
Економічна спрямованість регіону	Землеробство, лісове господарство	Землеробство, лісове господарство	Землеробство, лісове господарство

Тим не менш, завдяки згаданим природним процесам радіаційна ситуація на більшості забруднених радіонуклідами внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС територіях покращилася у сотні разів. І тому найактуальнішою проблемою сучасної вітчизняної радіоекології є ремедіація територій, виведених з господарського користування внаслідок радіонуклідного забруднення після аварій та їх повертання до використання, розробка стратегії виробництва на них продукції рослинництва й тваринництва з мінімальним вмістом радіоактивних речовин. На особливу увагу заслуговує концепція модифікації рівнів радіонуклідного забруднення продукції рослинництва та тваринництва. Радіозахисні заходи – контрзаходи дозволяють оцінити їх ефективність у різні поставарійні періоди.

В Україні була розроблена і широко використана (на території 4 млн. га) система виробництва продукції рослинництва і тваринництва з мінімальним вмістом радіонуклідів. Вона являє собою комплекс радіозахисних заходів упродовж всього харчового ланцюга на шляху до людини. Ця стратегія передбачає найактивніше використання прийомів протягом всіх його ланок: ґрунт–рослина, рослина (корми)–тварина, продукція рослинництва і тваринництва–людина з метою блокування переходу і накопичення радіонуклідів у кінцевому продукті. Чим на більш ранньому етапі цього переходу дане завдання буде вирішене, тим ефективнішим стає захист людини від дії іонізуючої радіації.

За рахунок цілеспрямованих протирадіаційних заходів, котрі були проведені у перші роки після аварії на Чорнобильській АЕС, дози опромінення населення були знижені як найменш удвічі. Протирадіаційні заходи, що були спрямовані на зменшення радіонуклідного забруднення сільськогосподарських угідь, в Україні не знайшли, на жаль, ні державної ні місцевої підтримки на відміну, наприклад, від японської стратегії подолання наслідків аварії у префектурі Фукусіма і суміжних з нею територіях. Можливості зменшення радіонуклідного забруднення саме території дуже обмежені і фактично зводяться до двох прийомів: зняття верхнього забрудненого шару ґрунту і спрямованої фітодезактивації. Перший прийом є ефективним, але за певними причинами недооцінений в Україні, хоча був апробований у польових умовах з величезною ефективністю – зменшенням переходу радіонуклідів в рослини до 40 разів. Звичайно на сільськогосподарських угіддях Полісся, що піддаються агротехнологічній обробці, він може бути застосований лише у перші роки, а, точніше, у перший рік після випадання радіонуклідів на територію. Проте в Японії навіть на важких мінеральних ґрунтах даний захід проводиться протягом усіх післяаварійних років. Ефективність другого значно менша і тільки при регулярному застосуванні протягом багатьох років можна досягти певного результату. Проте, за пройдеши 33 роки теоретично можна було «висмоктати» з ґрунту практично всю радіоактивність. Але обидва прийоми мають великий недолік – супроводжуються формуванням величезної кількості радіоактивних відходів. У першому випадку на мінеральних ґрунтах при знятті 4–5-сантиметрового шару з гектару угідь виникає 400–500 м<sup>3</sup> забрудненого ґрунту. На торфових ґрунтах кількість радіоактивних відходів була б набагато меншою. У другому при використанні у якості очищувача найбільш зручної для зони Полісся культури – люпину, утворюється з гектара до 40–50 тон забрудненої зеленої маси.

Саме тому всі методи і прийоми були спрямовані і спрямовуються на запобігання, а, точніше, зменшення переходу радіонуклідів з ґрунту в рослини (табл. 2).

**Таблиця 2. Ефективність деяких радіозахисних технологій щодо зменшення вмісту радіонуклідів в продукції рослинництва і тваринництва та дози опромінення людини**

Контрзахід	Кратність зменшення вмісту в продукції		Кратність зменшення дози
	<sup>137</sup> Cs	<sup>90</sup> Sr	
Глибока оранка з обертанням скиби	6–10	4–8	3–6
Зняття верхнього шару ґрунту	4–8	3–6	2–5
Вапнування кислих ґрунтів	1,5–4	1,5–2,5	2–5
Внесення підвищених норм фосфорно-калійних добрив	2–4	1,5–2	2–3
Докорінне покращення луків і пасовищ	2,5–10	2–6	2–5
Додавання до раціону тварин фероцину	2–8	–	1,5–5
Переробка молока у вершкове масло	10–30	10–20	5–15
Виварювання м'яса, овочів та інших	1,5–3	1,5–3	1,5–2

Так, вапнування кислих ґрунтів з одного боку зменшує рухомість радіонуклідів та їх надходження в рослини, а з іншого, кальцій вапна, проявляючи антагоністичні властивості щодо свого хімічного аналога стронцію, може блокувати його перехід в рослини. Аналогічні взаємовідносини виникають між калієм і цезієм і саме тому внесення калійних добрив зменшує перехід цезію в рослини. Фосфор фосфорних добрив утворює зі стронцієм важкорозчинні комплексні сполуки типу вторинних і третинних фосфатів. Адсорбенти типу цеолітів, монтморилонітів та інших глинистих мінералів поглинають й утримують радіонукліди, до речі, як і деякі елементи живлення. Заміни сільськогосподарських культур, зміна режиму зрошення та більшість інших прийомів не зменшують вміст радіонуклідів у ґрунті – вони знижують інтенсивність їх надходження з ґрунту в рослини. В тваринництві використовуються такі прийоми, як поверхневе та докорінне покращення луків і пасовищ, додавання до раціону мінеральних солей та ентеросорбентів, переробка забрудненого молока, як основного дозоформуючого продукту, у вершкове масло та деякі інші молочні продукти.

З роками відбувається зменшення рівнів радіоактивного забруднення сільськогосподарської продукції <sup>137</sup>Cs. Причиною цього є так зване «старіння» цезію – його зв'язування у ґрунті за рахунок фіксації у кристалічних структурах деяких мінералів, утворення комплексних сполук. В результаті доступність цезію до кореневого засвоєння рослинами знижується, про що свідчать зниження у декілька разів коефіцієнтів накопичення. Втім, треба відзначити, що ефективність контрзаходів по відношенню до <sup>137</sup>Cs – основного радіоактивного забруднювача всіх компонентів навколишнього середовища не зменшилася. Зменшення ефективності вищезгаданих протирадіаційних заходів відбувається при порушенні рекомендованих співвідношень між К і N (2:1) при застосуванні мінеральних добрив. Слід ще раз нагадати, що легкі за механічним складом ґрунти Українського Полісся, що зазнали радіоактивного забруднення, збіднені на калій і додавання цього макроелементу ефективно блокує надходження радіоактивного цезію у рослини. Додавання азоту, особливо у кислих формах мінеральних добрив, навпаки стимулює надходження радіонуклідів у рослини. Оскільки в Україні калійні добрива не виробляються і ціни на них достатньо високі, фермери використовують доступні азотні добрива і створюється думка, що агротехнічні заходи не ефективні щодо зниження вмісту <sup>137</sup>Cs в рослинницькій продукції. На протязі останніх 5 років було проведено серію експериментів щодо оцінки ефективності апробованих у перші роки після аварії агротехнічних і агрохімічних заходів, що підтвердили їх ефективність і у віддалений період.

У пізню фазу розвитку радіаційної аварії основна дозоутворююча роль належить радіоактивним ізотопам цезію і стронцію. Що стосується <sup>137</sup>Cs, ситуація, зумовлена його згаданим «старінням», природним шляхом рухається до поліпшення із різною динамікою в залежності від ґрунтових умов – набагато краще на родючих важких за гранулометричним складом ґрунтах і повільніше на легких ґрунтах. На торфових ґрунтах ця динаміка співпадає з періодом піврозпаду радіонукліду.

Деяка інша ситуація склалася зі <sup>90</sup>Sr, який випав у складі паливної компоненти – дуже слабо розчинної матриці ядерного палива. З часом під впливом води, кисню, мікрофлори ця матриця руйнується і радіонуклід стає доступнішим для рослин. Саме тому підвищення рівнів забруднення рослинницької продукції цим радіонуклідом може спостерігатися до теперішнього часу. Цьому за умов відсутності державних програм щодо вапнування кислих ґрунтів сприяють процеси природного підкислення ґрунтів

Про це свідчать дані про збільшення вмісту <sup>90</sup>Sr у злакових рослинах на ґрунтах господарств, що межують із зоною відчуження Чорнобильської АЕС, де рівні вмісту цього радіонукліду у зерні можуть перевищувати вимоги ДР-2006 для харчового зерна. Тішить лише те, що основна частина паливної компоненти радіоактивних випадань залишилася у межах зони відчуження.

Радіологічний контроль параметрів міграції <sup>137</sup>Cs та <sup>90</sup>Sr трофічними ланцюгами від ґрунту до організму людей необхідно проводити обов'язково з урахуванням характеру традиційного харчування мешканців Полісся. Такий контроль дозволив виявити ще одну відносно небезпечну ланку надходження радіонуклідів

у організм людини – лісові ягоди і гриби. На Поліссі в окремі роки цей шлях за рівнем надходження радіонуклідів може перевищувати сільськогосподарський. Особливістю цього шляху є те, що з ним практично не можливо боротися за рахунок розроблених протирадіаційних заходів крім заборони неконтрольованого збирання дарів лісу або застосування технологій ретельної переробки цих продуктів перед вживанням. Система запропонованих заходів дозволяє в багато разів зменшувати накопичення радіонуклідів сільськогосподарськими рослинами та продуктивними тваринами і тим ефективніше, чим раніше ці заходи будуть проводитися. Навіть на ґрунтах зони безумовного (обов'язкового) відселення у теперішній можна в більшості випадків одержувати продукцію, що відповідає вимогам радіаційної безпеки. Завдяки цим заходам зменшення дози опромінення населення у декілька разів є цілком реальним завданням. При цьому найбільш ефективними вони є при систематичному застосуванні.

Дуже орієнтовні і усереднені цифри, наведені у табл. 3, свідчать, що з часом після аварії на Чорнобильській АЕС ефективність контрзаходів у зменшенні надходження радіонуклідів в рослини знижується, а роль природних процесів, у котрій основний внесок припадає на розпад радіоактивних ядер, зростає. І є всі підстави вважати, що з переносом радіоактивності у більш глибокі шари ґрунту роль цього процесу стане вирішальною.

Узагальнені результати дослідження у сфері ремедіації забруднених радіонуклідами територій, можливості їх використання у різних сферах господарювання, є базою для оцінки соціально-економічної ефективності впровадження контрзаходів, що, по суті, являють собою систему послідовних радіаційно-біологічних технологій. Всі ці положення були покладені в основу теорії екобезпечного проживання населення на забруднених радіонуклідами територіях, концепції радіозахисного харчування – мінімізації надходження і накопичення радіонуклідів в організмі людини та зменшення дії радіації, яка базується на п'яти основних положеннях: обмеження надходження радіонуклідів з продуктами харчування, блокування процесів всмоктування радіонуклідів у шлунково-кишковому тракті та їх депонування в окремих органах, захист від опромінення радіонуклідів, прискорення виведення з організму інкорпорованих радіонуклідів і активація процесів післярадіаційного відновлення. Не можна не торкнутися ще одного дуже важливого питання, пов'язаного з покращенням радіаційної обстановки, яке все частіше піднімається на різних рівнях – можливості повертання у господарське користування відчужених територій. Це дуже важлива проблема, яка вимагає комплексного вирішення і яке у теперішній час вкрай утруднене внаслідок низки причин і обставин:

**Таблиця 3. Відносний внесок природних процесів і контрзаходів у зменшенні переходу  $^{137}\text{Cs}$  з ґрунту в продукцію рослинництва, %**

Процеси і заходи		Період					
		1986–1996		1996–2006		2006–2016	
Природні процеси	Розпад ядер	20	50	40	70	50	80
	Вертикальна міграція	10		10		10	
	Горизонтальна міграція	10		10		10	
	Винос з рослинністю	10		10		10	
Штучні процеси	Вапнування	25	50	15	30	10	20
	Внесення добрив	25		15		10	

1. Після евакуації населення й припинення господарської діяльності у зоні відчуження і зоні безумовного (обов'язкового) відселення за 33 роки на забруднених радіонуклідами територіях була повністю або частково розруйнована інфраструктура – будівлі, дороги, системи електрозабезпечення, водозабезпечення, каналізації, меліоративні системи та інші.

2. За цей час на виведених з сільськогосподарського користування угіддях відбулося заліснення, заболочування, деградація ґрунтової родючості.

3. Внаслідок фактичної ліквідації колективного сільськогосподарського виробництва, складної соціально-економічної ситуації в країні у теперішній час немає нагальної потреби та економічної доцільності у масштабному використанні забруднених радіонуклідами земель.

4. Суспільство дуже насторожено відносно до спроб використання забруднених угідь для виробництва будь-якої споживчої продукції, в особливості продуктів харчування.

Пілотні проекти щодо використання забруднених територій для вирощування деяких видів технічних культур (наприклад, ріпаку для отримання біопалива), ведення деяких галузей тваринництва, не пов'язаних з отриманням продуктів харчування (конярство, хутрове звіроводство), котрі періодично висуваються різними організаціями, вимагають величезних інвестицій при досить сумнівній виправданості. Саме тому перевід цих територій до статусу заповідних слід вважати найкращим вирішенням проблеми використання забруднених радіонуклідами територій, у тому числі сільськогосподарських і лісних угідь.